

NGUYỄN ĐÌNH THẮNG

# VẬT LIÊU KỸ THUẬT ĐIỆN

Thu Vien DHKTCN-TN



MGT06008947



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT



TS. NGUYỄN ĐÌNH THẮNG

# VẬT LIỆU KỸ THUẬT ĐIỆN



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT  
HÀ NỘI

*Chịu trách nhiệm xuất bản:* PGS. TS. TÔ ĐĂNG HẢI  
*Biên tập* : NGOC KHUÊ, NGUYỄN ĐĂNG  
*Vẽ bìa* : TRẦN THẮNG

---

In 800 bản khổ 16 x 24cm tại xưởng in NXB Văn hoá dân tộc.  
Giấy phép xuất bản số : 6 – 384 – 17/9/2004.  
In xong và nộp lưu chiểu quý I / 2005.

# LỜI NÓI ĐẦU

Quyển sách **Vật liệu kỹ thuật điện** này được biên soạn theo chương trình giảng dạy của Bộ Giáo dục và Đào tạo nhằm cung cấp những kiến thức cơ bản về vật liệu cách điện, bán dẫn, dẫn điện và vật liệu từ cho sinh viên các ngành điện của trường đại học kỹ thuật.

*Nội dung cuốn sách đề cập đến những vấn đề chính sau đây:*

1) Phân loại vật liệu kỹ thuật điện theo công dụng, thành phần cấu tạo và các đặc tính của chúng.

2) Trình bày lý thuyết cơ bản, những hiện tượng vật lý, xảy ra trong vật liệu cách điện khi ở điện áp thấp và điện áp cao; từ đó có thể tiến hành nghiên cứu, thí nghiệm, đánh giá chất lượng của vật liệu dùng trong kỹ thuật điện.

3) Nêu lên những tính chất chủ yếu của các loại vật liệu để có thể lựa chọn vào mục đích sử dụng đem lại hiệu quả kinh tế cao.

4) Trình bày những đặc điểm chính của công nghệ sản xuất vật liệu kỹ thuật điện.

5) Trình bày khá chi tiết về các đặc tính về điện, tính chất cơ, lý, hoá và các yếu tố ảnh hưởng đến các tính chất của vật liệu kỹ thuật điện.

Cuốn sách được biên soạn nhằm phục vụ cho sinh viên các trường đại học, cao đẳng, ..., đồng thời còn phục vụ cho các cán bộ, chuyên viên, nghiên cứu viên, cán bộ quản lý chuyên ngành điện, các kỹ sư điện và những người quan tâm trong lĩnh vực sản xuất, sử dụng vật liệu kỹ thuật điện.

Do tài liệu tham khảo không nhiều, trình độ người biên soạn có hạn nên không tránh khỏi những thiếu sót. Tác giả rất mong đợi những nhận xét, đánh giá, góp ý của đông đảo bạn đọc và đồng nghiệp.

Ý kiến xin gửi về địa chỉ: **Bộ môn Hệ thống điện, khoa Điện, trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Email: evnbk @ hn. vnn. vn.**

*Hà Nội, tháng 9 năm 2004*

**Tác giả**



## KÝ HIỆU CÁC ĐẠI LƯỢNG CHÍNH DÙNG TRONG SÁCH

$\alpha$  - hệ số phân cực

$\alpha_l$  - hệ số giãn nở nhiệt theo chiều dài;

$\beta$  - hệ số;

$\gamma$  - tỷ trọng; điện dẫn suất;

$\gamma_s$  - điện dẫn suất bề mặt;

$\gamma_T$  - nhiệt dẫn suất;

$\delta$  - góc tổn hao;

$\varepsilon$  - hằng số điện môi;

$\eta$  - độ nhớt động lực học;

$\lambda$  - chiều dài đoạn đường chuyển động tự do; bước sóng;

$\mu$  - mômen lưỡng cực phân tử; độ từ thẩm; hệ số suy giảm bức xạ;

$\nu$  - hệ số tái hợp; độ nhớt động học; hệ số quan hệ đàn hồi;

$\rho$  - mật độ; điện trở suất;

$\rho_v$  - điện trở suất khối;

$\rho_s$  - điện trở suất mặt;

$\rho_T$  - nhiệt trở suất;

$\sigma$  - giới hạn bền;

$\tau$  - thời gian;

$\varphi$  - độ ẩm không khí; góc;

$\psi$  - tính hút nước; độ ẩm vật liệu;

$\omega$  - tần số góc;

B - cảm ứng từ; hằng số;

b - hằng số

C - điện dung tụ điện; nhiệt dung;

c - tốc độ ánh sáng; suất nhiệt dung;  
D - cảm ứng điện;  
d - đường kính;  
E - cường độ điện trường; môđun đàn hồi;  
 $E_{hd}$  - độ bền điện;  
e - điện tích điện tử; cơ số của lôgarit tự nhiên;  
F - lực; độ bền đối với xung nhiệt;  
f - tần số dòng điện; tần số dao động nhiệt;  
G - hệ số cấu trúc;  
g - gia tốc lực trọng trường;  
H - cường độ từ trường;  
h - hằng số Plank; chiều cao; chiều dày; chiều dài;  
I - cường độ dòng điện;  
i - trị số tức thời của cường độ dòng điện;  
j - mật độ dòng điện;  
K - độ linh hoạt;  
k - hằng số Bôlzoman;  
l - chiều dài;  
M - trọng lượng phân tử; mômen;  
m - khối lượng; mômen điện;  
N - số phân tử trong một phân tử gam; số Avogadro;  
n - hệ số khúc xạ;  
 $n_0$  - mật độ;  
P - công suất; cường độ phân cực;  
p - áp lực; suất tổn hao công suất;  
Q - điện tích của tụ điện; hệ số phẩm chất;  
q - điện tích;  
R - hằng số khí; bán kính; điện trở;  
r - bán kính; điện trở;



S – bề mặt; diện tích;  
T – nhiệt độ tuyệt đối; động năng;  
TK – hệ số nhiệt độ;  
t – nhiệt độ, °C;  
U – hiệu điện thế (điện áp);  
u – độ linh hoạt; thế năng;  
v – tốc độ;  
V – thể tích;  
W – năng lượng;  
w – năng lượng kích thích; bề rộng vùng cấm;  
Z – tổng trở; số thứ tự nguyên tố;  
z – lượng dịch chuyển gia tăng;



# QUAN HỆ GIỮA CÁC ĐƠN VỊ ĐO LƯỜNG CỦA MỘT SỐ ĐẠI LƯỢNG VẬT LÝ – KỸ THUẬT

<i>Mật độ</i>	$1\text{kg/m}^3 = 0,001\text{ g/cm}^3$
<i>Trọng lượng (lực)</i>	$1\text{N} = 0,102\text{ kG} \approx 0,1\text{kG}$
<i>Áp suất và các đại lượng khác cùng loại (giới hạn bền khi kéo ...)</i>	$1\text{N/m}^2 = 10,2 \cdot 10^{-6}\text{kG/cm}^3 \approx 10^{-5}\text{kG/cm}^2 \approx 10^{-7}\text{kG/mm}^2$
<i>Ứng suất dai va đập</i>	$1\text{J/m}^2 = 1,02 \cdot 10^{-3}\text{kG.cm/cm}^2 \approx 10^{-3}\text{kG.cm/cm}^2$
<i>Sức căng bề mặt</i>	$1\text{N/m} = 10^3\text{dyn/cm}$
<i>Độ nhớt động lực học</i>	$1\text{N.s/m}^2 = 10\text{P} = 1.000\text{cP}$
<i>Độ nhớt động học</i>	$1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{cm}^2$
<i>Nhiệt dẫn suất</i>	$1\text{W}/(\text{m.độ}) \approx 2,4 \cdot 10^{-3}\text{cal}/(\text{cm.s.độ})$
<i>Tỷ nhiệt</i>	$1\text{J}/(\text{kg.độ}) \approx 2,4 \cdot 10^{-4}\text{cal}/(\text{kg.độ})$
<i>Điện trở suất</i>	$1\Omega\text{ m} = 100\Omega\text{cm} = 10^6\Omega.\text{mm}^2/\text{m}$
<i>Điện dẫn suất</i>	$1\text{S/m} = 0,01\Omega^{-1},\text{ cm}^{-1} = 10^{-6}\text{m}/(\Omega.\text{mm}^2)$
<i>Độ bền điện (cường độ điện trường)</i>	$1\text{V/m} = 10^{-6}\text{kV/mm} = 10^{-5}\text{kV/cm}$
<i>Độ linh hoạt hạt mang điện</i>	$1\text{m}^2/(\text{V.s}) = 10^4\text{cm}^2/(\text{V.s})$
<i>Cường độ từ trường</i>	$1\text{A/m} = 0,01\text{A/cm} = 12,6 \cdot 10^{-3}\text{ec}$
<i>Cảm ứng từ</i>	$1\text{T} = 10^4\text{gauxơ}$

# PHẦN THỨ NHẤT

## NHỮNG VẤN ĐỀ CHUNG

### Chương I

## CẤU TẠO VÀ PHÂN LOẠI VẬT CHẤT

### 1.1. CẤU TẠO NGUYÊN TỬ

Như chúng ta đã biết mọi vật chất được cấu tạo từ nguyên tử và phân tử. Nguyên tử là phần tử cơ bản nhất của vật chất. Theo mô hình nguyên tử của Bor, nguyên tử được cấu tạo bởi hạt nhân mang điện tích dương và các điện tử (électron-e) mang điện tích âm chuyển động xung quanh hạt nhân theo quỹ đạo nhất định.

Hạt nhân nguyên tử được tạo nên từ các hạt prôton và notron. Notron là các hạt không mang điện tích, còn prôton có điện tích dương với số lượng bằng  $Z \cdot q$  với  $Z$ - số lượng điện tử của một nguyên tử đồng thời cũng là số thứ tự của nguyên tố nguyên tử đó trong bảng tuần hoàn Mendelêép;

$q$  - điện tích của điện tử  $e$  ( $q_e = 1,601 \cdot 10^{-19}$  culông). Proton có khối lượng bằng  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg, electron ( $e$ ) có khối lượng bằng  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg. Cấu tạo hạt nhân nguyên tử, tính chất các điện tử lấp đầy lớp vỏ một cách tuần hoàn được phản ánh trong bảng Mendelêép.

Ở trạng thái bình thường nguyên tử được trung hoà về điện, tức là trong nguyên tử có tổng các điện tích dương của hạt nhân bằng tổng các điện tích âm của các điện tử. Nếu vì lý do nào đó nguyên tử mất đi một hay nhiều điện tử thì sẽ trở thành điện tích dương, ta thường gọi là ion dương, ngược lại nếu nguyên tử trung hoà nhận thêm điện tử thì trở thành ion âm.

Để có khái niệm về năng lượng của điện tử ta xét nguyên tử của hidro, nguyên tử này được cấu tạo từ một proton và một điện tử.

Khi điện tử chuyển động trên quỹ đạo tròn bán kính  $r$  xung quanh hạt nhân thì điện tử sẽ chịu lực hút của hạt nhân  $f_1$  và được xác định bởi công thức sau:

$$f_1 = \frac{q^2}{r^2} \quad (1-1)$$

Lực hút  $f_1$  sẽ được cân bằng với lực ly tâm của chuyển động  $f_2$ :

$$f_2 = \frac{mv^2}{r} \quad (1-2)$$

Trong đó:  $m$  - khối lượng của điện tử ;  
 $v$  - tốc độ chuyển động của điện tử.

Từ (1-1) và (1-2) ta có:  $f_1 = f_2$  hay:

$$mv^2 = \frac{q^2}{r} \quad (1-3)$$

Trong quá trình chuyển động, điện tử có một động năng  $T = \frac{mv^2}{2}$  và một thế năng  $U = -\frac{q^2}{r}$ , cho nên năng lượng của điện tử sẽ bằng:

$$W = T + U = -\frac{q^2}{2r} \quad (1-4)$$

Biểu thức (1-4) chứng tỏ mỗi điện tử của nguyên tử có một mức năng lượng nhất định, năng lượng này tỉ lệ nghịch với bán kính quỹ đạo chuyển động của điện tử. Để di chuyển điện tử từ quỹ đạo chuyển động bán kính  $r$  ra xa vô cùng cần phải cung cấp cho nó một năng lượng lớn hơn hoặc bằng  $\frac{q^2}{2r}$ .

Năng lượng tối thiểu cung cấp cho điện tử để điện tử tách rời khỏi nguyên tử trở thành điện tử tự do người ta gọi là *năng lượng ion hoá* ( $W_i$ ). Khi bị ion hoá (bị mất điện tử), nguyên tử trở thành ion dương. Quá trình biến nguyên tử trung hoà thành ion dương và điện tử tự do gọi là *quá trình ion hoá*.

Trong một nguyên tử năng lượng ion hoá của các lớp điện tử khác nhau cũng khác nhau, các điện tử hoá trị ngoài cùng có mức năng lượng ion hoá thấp nhất vì chúng cách xa hạt nhân (xem công thức 1-4).

Khi điện tử nhận được năng lượng nhỏ hơn năng lượng ion hoá chúng sẽ bị kích thích và có thể di chuyển từ mức năng lượng này sang mức năng lượng khác,

song chúng luôn có xu thế trở về vị trí của trạng thái ban đầu. Phần năng lượng cung cấp để kích thích nguyên tử sẽ được trả lại dưới dạng năng lượng quang học (quang năng).

Trong thực tế, năng lượng ion hoá và năng lượng kích thích nguyên tử có thể nhận được từ nhiều nguồn năng lượng khác nhau, ví dụ như: nhiệt năng, quang năng, điện năng, năng lượng của các tia sóng ngắn như:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  hay tia rơnghen...v.v...

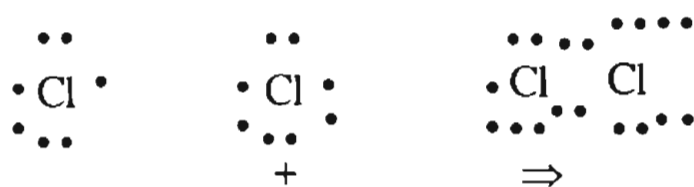
## 1.2. CẤU TẠO PHÂN TỬ

Phân tử được tạo nên từ những nguyên tử thông qua các liên kết phân tử. Trong vật chất tồn tại bốn loại liên kết sau.

### 1.2.1. Liên kết đồng hoá trị

Liên kết đồng hoá trị được đặc trưng bởi sự dùng chung những điện tử của các nguyên tử trong phân tử. Khi đó mật độ đám mây điện tử giữa các hạt nhân trở thành bão hoà, liên kết phân tử bền vững.

Lấy cấu trúc của phân tử clo làm ví dụ: phân tử clo ( $\text{Cl}_2$ ) gồm 2 nguyên tử Clo, mỗi nguyên tử clo có 17 điện tử, trong đó 7 điện tử hoá trị ở lớp ngoài cùng. Hai nguyên tử này được liên kết bền vững với nhau bằng cách sử dụng chung hai điện tử, lớp vỏ ngoài cùng của mỗi nguyên tử được bổ sung thêm một điện tử của nguyên tử kia (hình 1-1).



Hình 1-1. Liên kết đồng hoá trị trong phân tử clo.

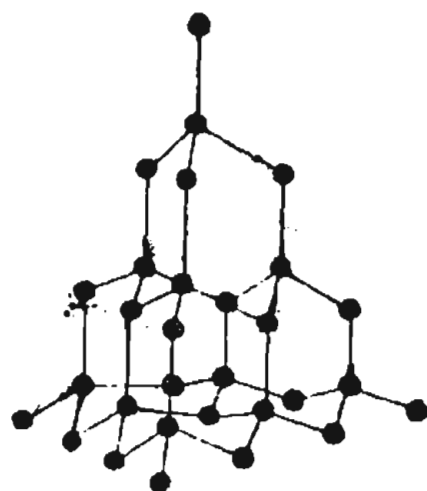
Tùy thuộc vào cấu trúc đối xứng hay không đối xứng mà phân tử liên kết đồng hoá trị có thể là **trung tính** hay **cực tính** (lưỡng cực).

- Phân tử có trọng tâm của các điện tích dương và âm trùng nhau là phân tử trung tính. Các chất được tạo nên từ các phân tử trung tính gọi là **chất trung tính**.

- Phân tử có trọng tâm của các điện tích dương và điện tích âm không trùng nhau, cách nhau một khoảng cách  $a$  "nào đó được gọi là **phân tử cực tính** hay còn gọi là **lưỡng cực**". Phân tử cực tính đặc trưng bởi momen lưỡng cực  $m = q.a$ . Dựa

vào trị số momen lưỡng cực của phân tử người ta chia ra thành chất cực tính yếu và cực tính mạnh. Những chất được cấu tạo bằng các phân tử cực tính gọi là *chất cực tính*.

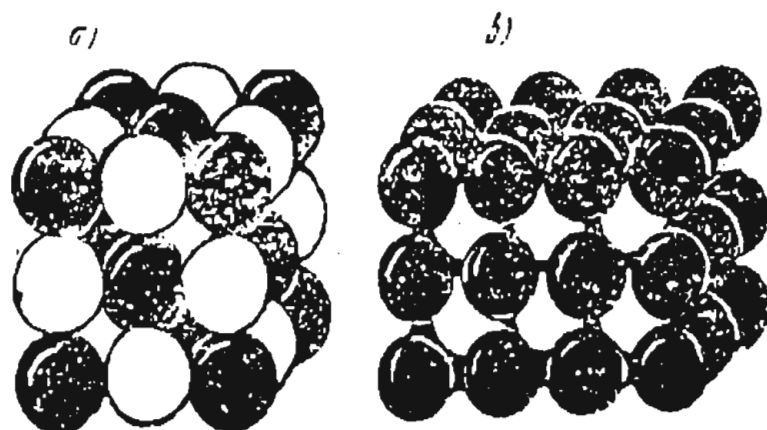
Liên kết đồng hoá trị còn thấy ở cả chất rắn. Vô cơ có mạng tinh thể cấu tạo từ các nguyên tử, ví dụ như kim cương. Cấu tạo của kim cương được mô tả trên hình 1-2.



Hình 1-2. Cấu tạo tinh thể kim cương.

### 1.2.2. Liên kết ion

Liên kết ion được xác lập bởi lực hút giữa các ion dương và các ion âm trong phân tử. Liên kết ion là liên kết khá bền vững. Do vậy, vật rắn có cấu tạo ion đặc trưng bởi độ bền cơ học và nhiệt độ nóng chảy cao. Ví dụ điển hình về tinh thể ion là các muối halogen của các kim loại kiềm.



Hình 1-3. Cấu trúc liên kết ion clorua natri (a) và clorua xêzi (b).

Cấu trúc tinh thể ion clorua natri và clorua xêri được chỉ rõ ở hình 1-3. Qua hình vẽ cho thấy ở chất thứ nhất các ion được ràng buộc chặt chẽ, còn chất thứ hai không chặt chẽ.

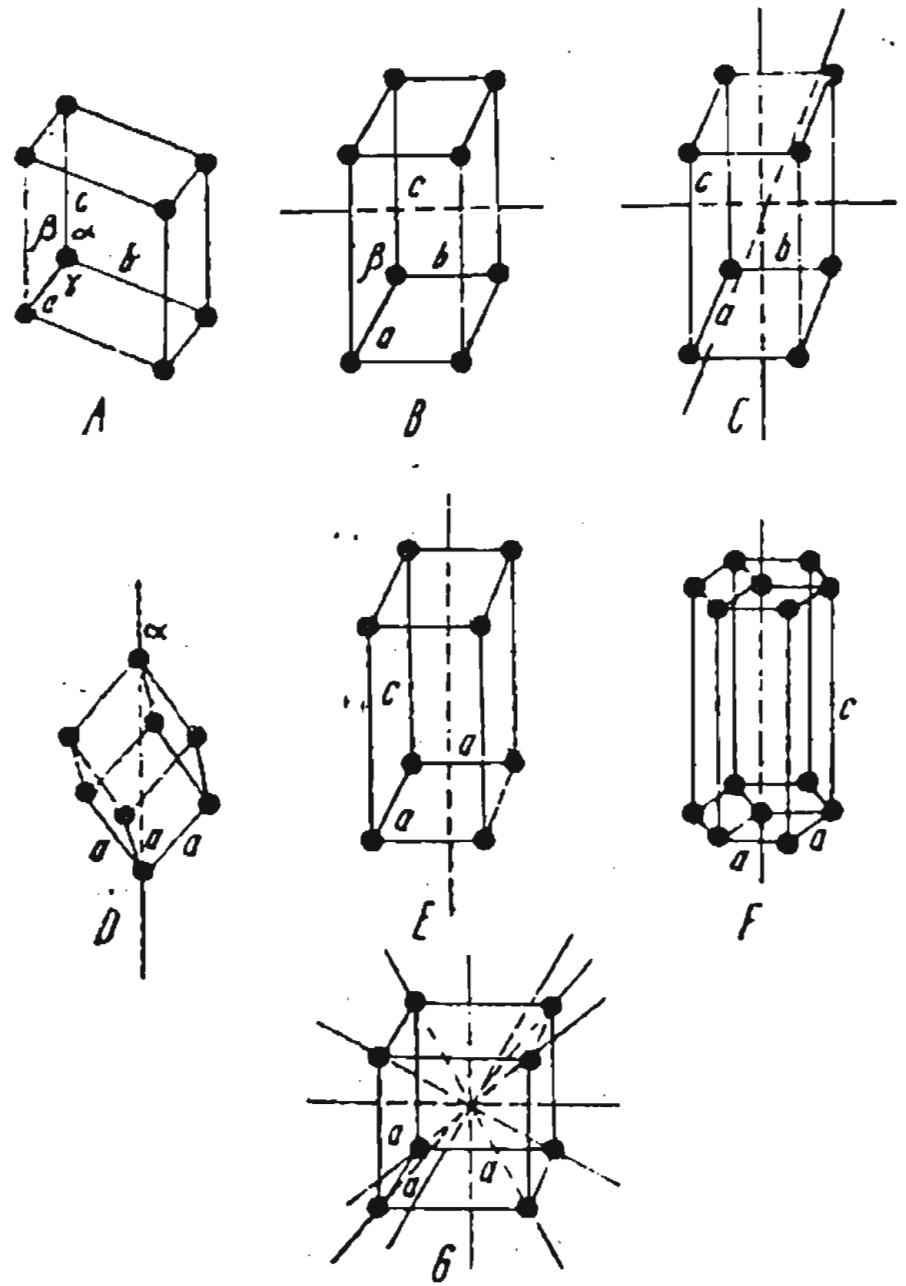
Trên hình 1-4 trình bày 7 hệ thống chính liên kết tinh thể ion cơ bản. Sự phân loại tinh thể theo hình học chưa đủ để phân biệt những cấu trúc và tính chất của vật chất. Các tinh thể vật chất có thể có sự khác nhau về khúc xạ kép, về tính chất áp điện và nhiệt điện, về sự cấu thành các trung tâm hấp phụ, về công thoát của điện tử v.v...

Khả năng tạo nên một chất hoặc một hợp chất mạng không gian nào đó phụ thuộc chủ yếu vào kích thước nguyên tử và hình dáng lớp điện tử hoá trị ngoài cùng.

### 1.2.3. Liên kết kim loại

Dạng liên kết này tạo nên các tinh thể vật rắn. Kim loại được xem như là một hệ thống cấu tạo từ các ion dương nằm trong môi trường các điện tử tự do (hình 1-5). Lực hút giữa các ion dương và các điện tử tạo nên tính nguyên khối của kim loại. Chính vì vậy liên kết kim loại là liên kết bền vững, kim loại có độ bền cơ học và nhiệt độ nóng chảy cao.

Sự tồn tại các điện tử tự do làm cho kim loại có tính ánh kim và tính dẫn điện, dẫn nhiệt cao. Tính dẻo của kim loại được giải thích bởi sự dịch chuyển và trượt trên nhau giữa các lớp ion, cho nên kim loại dễ cán kéo thành lớp mỏng.



Hình 1-4. Các tế bào cơ bản của bảy hệ thống.

- A - Ba góc; B - Đồng góc; C - Trục thoi;
- D - Khối mặt thoi; E - Tứ giác; F - Lục giác;
- G - Hình hộp; a,b,c - chiều dài cạnh;
- $\alpha, \beta, \gamma$  - góc các mặt có trị số khác  $90^\circ$ .

### 1.2.4. Liên kết Vandec-Vanx

Liên kết này là dạng liên kết yếu, cấu trúc mạng tinh thể phân tử không vững chắc. Do vậy những chất liên kết phân tử là liên kết Vandec-Vanx có nhiệt độ nóng chảy và độ bền cơ thấp ví dụ như "parafin".

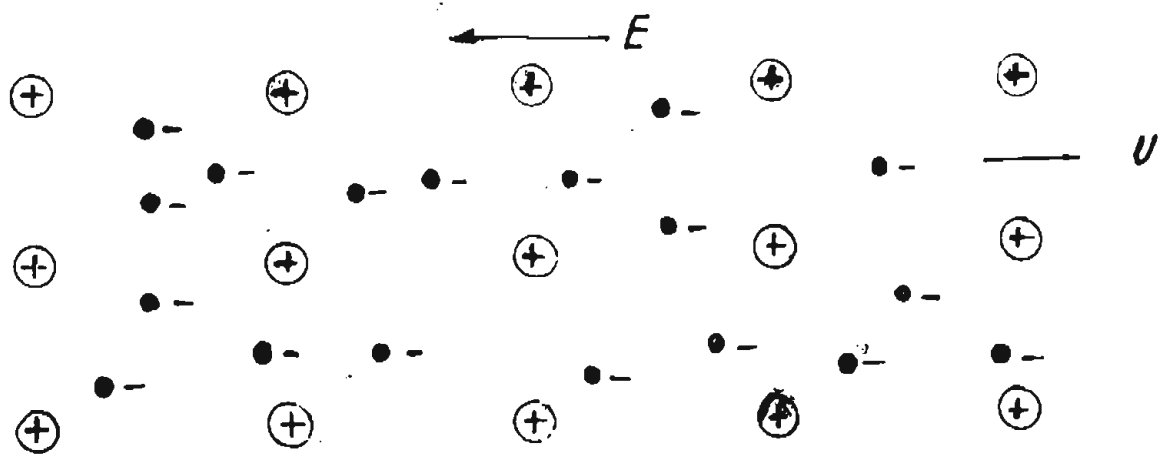
## 1.3. KHUYẾT TẬT TRONG CẤU TẠO VẬT RẮN

Các tinh thể vật rắn có thể có kết cấu đồng nhất. Sự phá huỷ các kết cấu đồng nhất và tạo nên các khuyết tật trong vật rắn thường gặp nhiều trong thực tế. Những

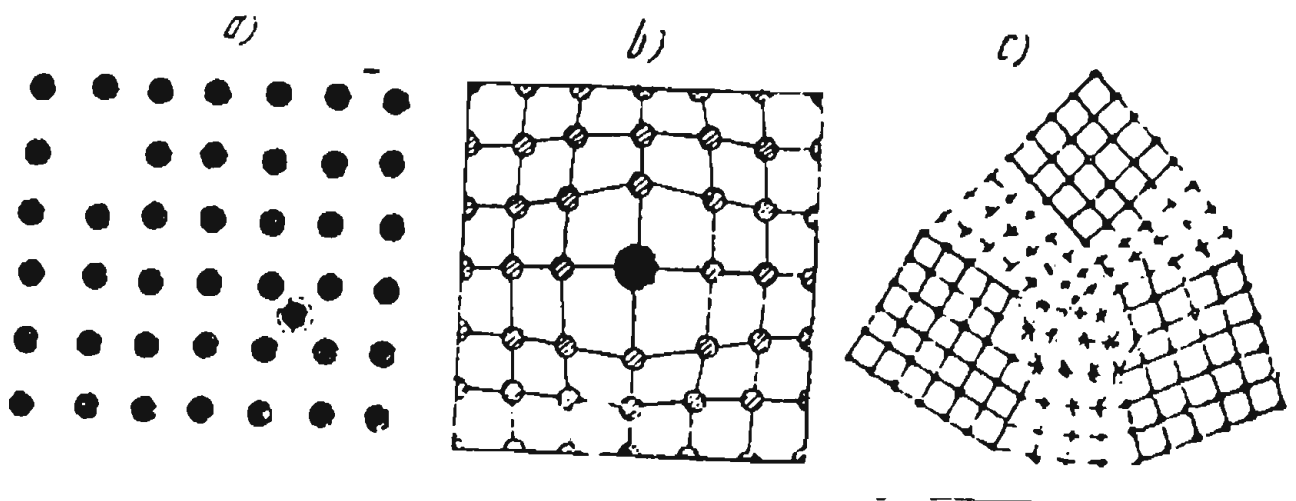


khuyết tật có thể được tạo nên bằng sự ngẫu nhiên hay cố ý trong quá trình công nghệ chế tạo vật liệu.

Khuyết tật của vật rắn là bất kỳ hiện tượng nào phá vỡ tính chất chu kỳ của trường tinh điện mạng tinh thể như: phá vỡ thành phần hợp thức; sự có mặt của các tạp chất lạ; áp lực cơ học; các lượng tử của dao động đàn hồi - photon; mặt tinh thể phụ - đoạn tầng; khe rãnh, lỗ xóp v.v... (xem hình 1-6).



Hình 1-5. Sơ đồ cấu tạo kim loại.



Hình 1-6. Khuyết tật mạng tinh thể.

- a- Nút trống và ion riêng giữa các nút;
- b- Nguyên tử lạ trong nút của mạng;
- c- Cấu tạo dạng khối của tinh thể đoạn tầng.

Khuyết tật sẽ làm thay đổi các đặc tính cơ học, lý học, hoá học và các tính chất về điện của vật liệu. Khuyết tật có thể tạo nên các tính năng đặc biệt tốt (ví dụ như: vi mạch IC...) và cũng có thể làm cho tính chất của vật liệu kém đi (ví dụ như: vật liệu cách điện có lẫn kim loại).

Trong kỹ thuật điện người ta sử dụng rộng rãi cả vật liệu có cấu tạo thứ tự cũng như không thứ tự, khó có thể kết luận kim loại nào có ý nghĩa hơn.

## 1.4. LÝ THUYẾT PHÂN VÙNG NĂNG LƯỢNG TRONG VẬT RẮN

Có thể sử dụng lý thuyết phân vùng năng lượng để giải thích, phân loại vật liệu thành các nhóm vật liệu dẫn điện, bán dẫn và điện môi (cách điện).

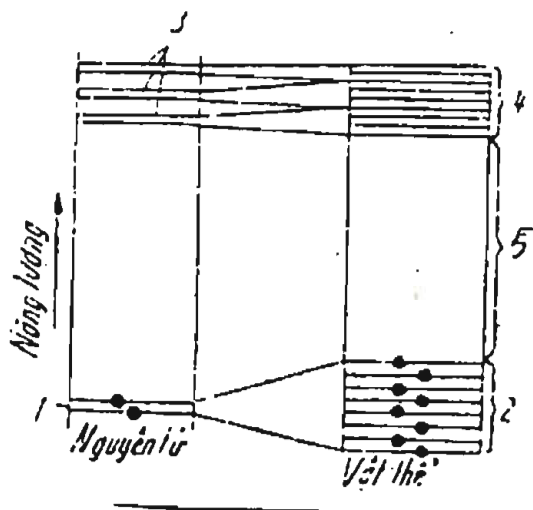
Việc nghiên cứu quang phổ phát xạ của các chất khác nhau ở trạng thái khí khi các nguyên tử ở cách xa nhau một khoảng cách lớn đã chỉ rõ rằng: nguyên tử của mỗi chất được đặc trưng bởi những vạch quang phổ hoàn toàn xác định. Điều đó chứng tỏ rằng các nguyên tử khác nhau có những trạng thái năng lượng hay mức năng lượng khác nhau.

Khi nguyên tử ở trạng thái bình thường không bị kích thích, một số trong các mức năng lượng được các điện tử lấp đầy, còn ở các mức năng lượng khác điện tử chỉ có thể có mặt khi nguyên tử nhận được năng lượng từ bên ngoài tác động (trạng thái kích thích). Nguyên tử luôn có xu hướng quay về trạng thái ổn định. Khi điện tử chuyển từ mức năng lượng kích thích sang mức năng lượng nguyên tử nhỏ nhất, nguyên tử phát ra phần năng lượng dư thừa.

Những điều nói trên có thể đặc trưng bằng biểu đồ năng lượng vẽ trên hình (1-7). Khi chất khí hoá lỏng và sau đó tạo nên mạng tinh thể của vật rắn, các nguyên tử nằm sát nhau, tất cả các mức năng lượng của nguyên tử xê dịch do tác động của các nguyên tử bên cạnh tạo nên một dải năng lượng hay còn gọi là vùng các mức năng lượng.

Do không có năng lượng của chuyển động nhiệt nên vùng năng lượng bình thường của nguyên tử ở vị trí thấp nhất và được gọi là vùng hoá trị hay còn gọi là vùng đầy (ở không độ tuyệt đối ( $0^{\circ}\text{K}$ ) các điện tử hoá trị của nguyên tử lấp đầy vùng này).

Những điện tử tự do có mức năng lượng hoạt tính cao hơn, các dải năng lượng của chúng tập hợp thành vùng tự do hay vùng điện dẫn (phần trên cùng của



**Hình 1-7. Sơ đồ phân bố mức năng lượng nguyên tử riêng biệt và của vật rắn phi kim loại.**

- 1- Mức năng lượng bình thường của kim loại; 2- Vùng điện tử lấp đầy; 3- Mức năng lượng kích thích của nguyên tử;
- 4- Vùng tự do; 5- Vùng cấm.

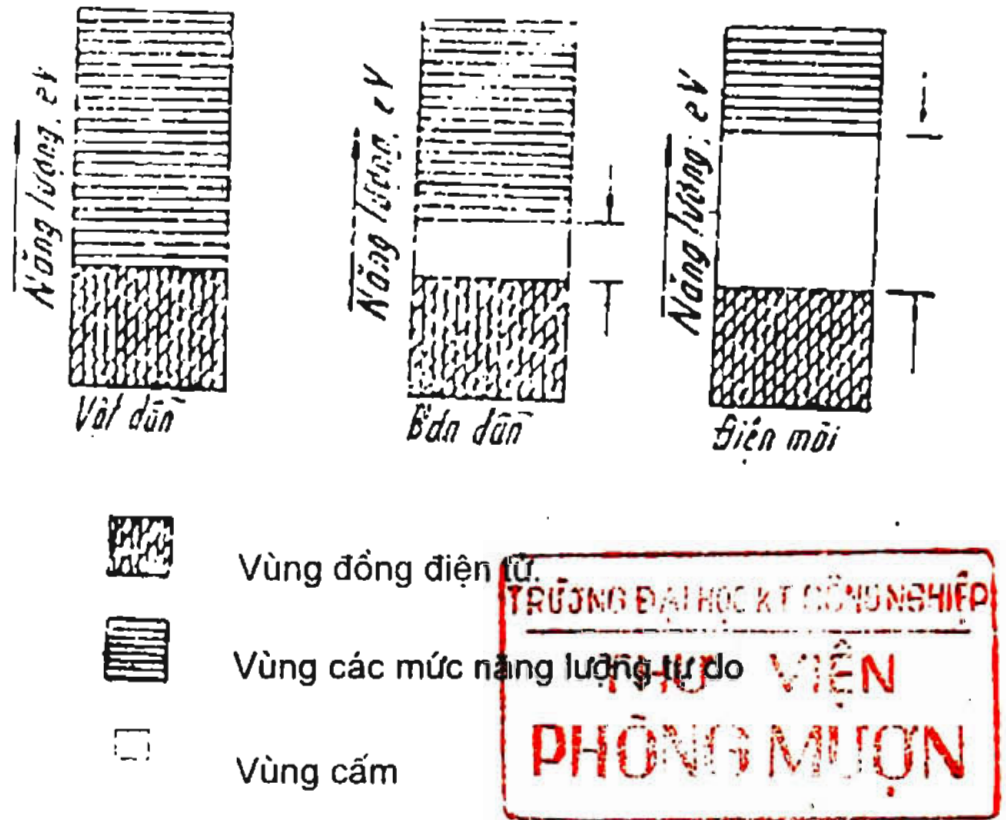
sơ đồ phân bố vùng năng lượng). Giữa vùng tự do và vùng đầy tồn tại vùng năng lượng được gọi là vùng cấm hay vùng trống. Tùy theo chiều rộng của vùng cấm ( $\Delta W$ ) vật liệu phân ra thành: vật liệu dẫn điện, vật liệu bán dẫn và vật liệu cách điện (điện môi).

**Điện môi** là chất có vùng cấm lớn đến mức ở điều kiện bình thường sự dẫn điện bằng điện tử không xảy ra. Các điện tử hoá trị tuy được cung cấp thêm năng lượng của chuyển động nhiệt vẫn không thể di chuyển tới vùng tự do để tham gia vào dòng điện dẫn. Chiều rộng vùng cấm của điện môi  $\Delta W$  nằm trong khoảng từ 1,5 đến vài điện tử von (eV).

**Bán dẫn** là chất có vùng cấm hẹp hơn so với điện môi, vùng này có thể thay đổi nhờ tác động năng lượng từ bên ngoài. Chiều rộng vùng cấm chất bán dẫn bé ( $\Delta W = 0,2 \div 1,5$  eV), do đó ở nhiệt độ bình thường một số điện tử hoá trị ở trong vùng đầy được tiếp sức của chuyển động nhiệt có thể di chuyển tới vùng tự do để tham gia vào dòng điện dẫn.

**Vật dẫn** là chất có vùng tự do nằm sát với vùng đầy thậm chí có thể chồng lên vùng đầy ( $\Delta W < 0,2$  eV). Vật dẫn điện có số lượng điện tử tự do rất lớn; ở nhiệt độ bình thường các điện tử hoá trị trong vùng đầy có thể chuyển sang vùng tự do rất dễ dàng, dưới tác dụng của lực điện trường các điện tử này tham gia vào dòng điện dẫn. Chính vì vậy vật dẫn có tính dẫn điện tốt.

Trong chất bán dẫn khi không có điện tử tự do ( $T = 0^{\circ}\text{K}$ ) nếu đặt vào hiệu điện thế thì trong nó không gây nên dòng điện. Nếu năng lượng đưa từ ngoài vào đủ lớn để di chuyển các điện tử từ vùng đầy qua vùng cấm trở thành tự do, các điện tử đó có thể chuyển động dưới tác dụng của điện trường tạo nên điện dẫn điện tử của chất bán dẫn.



Hình 1-8. Cho sơ đồ phân bố vùng năng lượng của vật rắn ở nhiệt độ  $0^{\circ}\text{K}$ .

Khi các điện tử thoát khỏi vùng đầy thì tại đó hình thành các “*lỗ trống*”. Các lỗ trống này luôn có xu thế trở lại trạng thái ban đầu, chúng được lấp kín ngay bởi các điện tử của những nguyên tử lân cận, do đó sẽ tạo nên các lỗ trống ở vị trí khác và quá trình cứ tiếp diễn liên tục. Như vậy dưới tác dụng của điện trường lỗ trống sẽ chuyển động theo chiều của trường giống như một điện tích dương. Cùng với quá trình điện tử chuyển sang trạng thái tự do còn xảy ra hiện tượng ngược lại là hiện tượng điện tử quay về trạng thái bình thường. Kết quả là trong vật chất sẽ duy trì một trạng thái cân bằng, nghĩa là số điện tử chuyển sang vùng tự do bằng số điện tử trở về trạng thái bình thường.

Khi nhiệt độ tăng thì số điện tử tự do trong chất bán dẫn tăng lên, còn khi nhiệt độ giảm đến độ không tuyệt đối số lượng điện tử tự do giảm đến số không tuyệt đối. Như vậy, tính chất của vật liệu sẽ thay đổi khi nó ở nhiệt độ cao hơn.

Năng lượng cần thiết để điện tử chuyển sang trạng thái tự do hoặc để tạo nên lỗ trống không chỉ do chuyển động nhiệt mà còn do các nguồn năng lượng khác như: năng lượng của ánh sáng (quang năng); năng lượng điện trường và từ trường (điện năng); năng lượng cơ học (cơ năng), năng lượng của các tia sóng ngắn  $\alpha, \beta, \gamma$  hay tia ronghen v.v...

Số lượng các điện tử tự do hay lỗ trống trong một chất tăng lên dưới tác dụng của dạng năng lượng nào đó sẽ làm tăng độ dẫn điện, tăng cường độ dòng điện và xuất hiện sức điện động.

Các tính chất về điện phụ thuộc vào điều kiện tương tác giữa các nguyên tử của vật chất. Những tính chất của vật liệu không phải là vĩnh cửu, ở điều kiện môi trường nào đó vật liệu là điện môi, song ở điều kiện khác nó trở thành bán dẫn hay dẫn điện và ngược lại.

Tạp chất và các khuyết tật trong vật liệu có thể làm thay đổi tính chất ban đầu của vật liệu. Do vậy trong công nghệ sản xuất vật liệu kỹ thuật điện cần phải hạn chế tới mức tối đa số lượng tạp chất và khuyết tật.

## 1.5. PHÂN LOẠI VẬT LIỆU THEO TỪ TÍNH

Theo từ tính người ta phân vật liệu thành nghịch từ, thuận từ và dẫn từ.

**Nghịch từ** là những chất có độ từ thẩm  $\mu < 1$  và không phụ thuộc vào cường độ từ trường bên ngoài. Loại này gồm có hydro, các khí hiếm, đa số các hợp chất hữu cơ, muối mỏ và các kim loại như: đồng, kẽm, bạc, vàng, thủy ngân, gali, antimoan.

**Thuận từ** là những chất có độ từ thẩm  $\mu > 1$  và cũng không phụ thuộc vào cường độ từ trường bên ngoài. Loại này gồm có oxy, nitơ oxít, muối đất hiếm, muối sắt, các muối coban và niken, kim loại kiềm, nhôm, bạch kim.

Chất nghịch từ và thuận từ có độ từ thẩm xấp xỉ bằng 1.

**Chất dẫn từ** là các chất có  $\mu \gg 1$  và phụ thuộc vào cường độ từ trường bên ngoài. Loại này gồm có: sắt, niken, coban, và các hợp kim của chúng; hợp kim crom và mangan, gadolonit, pherit có các thành phần khác nhau.

Trong các phần trình bày tiếp theo sẽ nghiên cứu những tính chất của vật liệu cách điện, bán dẫn, dẫn điện và vật liệu từ dùng trong kỹ thuật điện.

## PHẦN THỨ HAI

### VẬT LIỆU CÁCH ĐIỆN

# NHỮNG HIỆN TƯỢNG XẢY RA TRONG ĐIỆN MÔI KHI ĐẶT VÀO TRONG ĐIỆN TRƯỜNG

Khi đặt điện môi vào trong điện trường  $E$ , điện môi sẽ chịu tác dụng của cường độ điện trường. Tùy theo dạng cường độ điện trường (mạnh hay yếu, một chiều, xoay chiều, hay xung kích, tần số của điện trường....) và thời gian tác dụng của điện trường, mà trong điện môi xảy ra những hiện tượng với các đặc điểm khác nhau, đồng thời yếu tố môi trường như nhiệt độ, độ ẩm, áp suất... cũng ảnh hưởng đến các quá trình xảy ra trong điện môi dưới tác dụng của điện trường trong điện môi, có thể xảy ra hai hiện tượng cơ bản, đó là hiện tượng dẫn điện và phân cực điện môi.

Theo nguyên lý chung vật liệu cách điện thì phải cách điện hoàn toàn, song trên thực tế, vật liệu cách điện dùng trong kỹ thuật điện luôn tồn tại các điện tích và các điện tử tự do. Dưới tác dụng của lực điện trường, các điện tích dương chuyển động theo chiều của điện trường, các điện tích âm (bao gồm cả điện tử tự do) chuyển động theo chiều ngược lại, chúng tạo nên một dòng điện đi trong điện môi. Như vậy, điện dẫn của điện môi được xác định bởi sự chuyển động, có hướng của các điện tích dưới tác dụng của điện trường bên ngoài.

Trị số của dòng điện phụ thuộc vào số lượng điện tích tự do có trong điện môi. Thực tế số lượng điện tích tự do của các điện môi không nhiều, do đó dòng điện đi trong điện môi có trị số rất nhỏ.

Quá trình đặc trưng chủ yếu của điện môi là sự phân cực điện môi khi có điện trường bên ngoài tác động. Phân cực là sự dịch chuyển có giới hạn của các điện tích liên kết hay là sự định hướng của các phân tử lưỡng cực dưới tác dụng của điện trường. Trong quá trình phân cực cũng tạo nên dòng điện phân cực.

Do có dòng điện dẫn và sự phân cực mà một phần năng lượng điện bị tiêu hao và toả ra dưới dạng nhiệt năng làm cho điện môi nóng lên. Phần năng lượng tiêu hao đó gọi là *tổn hao điện môi*, dựa vào trị số tổn hao điện môi người ta đánh giá chất lượng của vật liệu cách điện.

Mỗi một điện môi với chiều dày nhất định chỉ chịu được điện áp giới hạn nhất định. Khi điện áp cao hơn trị số giới hạn sẽ xảy ra *hiện tượng phóng điện* làm hỏng điện môi. *Độ bền điện* của vật liệu là khả năng vật liệu chịu điện áp mà không bị phá huỷ. Độ bền điện được đặc trưng bởi trị số cường độ điện trường đánh thủng ( $E_{dt} = \frac{U_{dt}}{h}$  [kV/mm]).

Trong quá trình vận hành điện môi phải chịu tác động của môi trường và điện trường. Sau một thời gian các tính chất về *cơ học, lý học, hoá học* và *điện...* của điện môi sẽ bị thay đổi khác với tính chất ban đầu, khi đó điện môi biến tính hay còn gọi là "lão hóa".

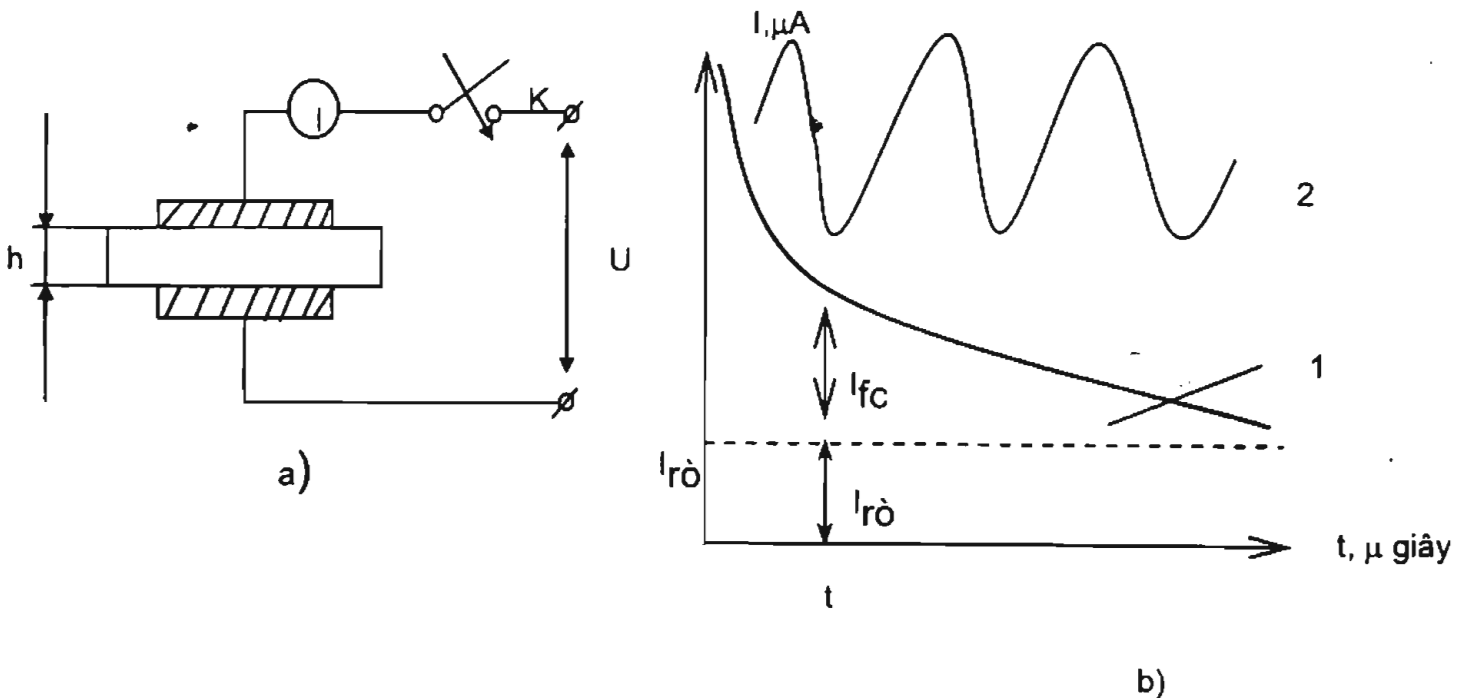
Sau đây chúng ta sẽ nghiên cứu những hiện tượng cơ bản xảy ra trong điện môi.

## Chương II

# TÍNH DẪN ĐIỆN CỦA ĐIỆN MÔI

### 2.1. KHÁI NIỆM CHUNG VỀ ĐIỆN DẪN CỦA ĐIỆN MÔI

Khi đặt điện môi vào trong điện trường  $E$ , điện áp là  $U$ , đo trị số dòng điện đi qua điện môi, ta thấy dòng điện biến thiên theo thời gian, được biểu diễn ở hình 2-1.



**Hình 2-1. Quan hệ giữa dòng điện với thời gian.**

a) Sơ đồ thí nghiệm; b) Đồ thị  $I(t)$ .

1- Dòng điện đo ở điện áp một chiều; 2- Dòng điện đo ở điện áp xoay chiều

Dòng điện đi trong điện môi gồm có hai thành phần là dòng điện rò ( $I_{r0}$ ) và dòng điện phân cực ( $I_{fc}$ ):

$$I = I_{r0} + I_{fc} \quad (2-1)$$



Ở điện áp một chiều, dòng điện phân cực chỉ tồn tại trong thời gian quá trình quá độ khi đóng hay ngắt điện. Đối với điện áp xoay chiều dòng điện phân cực tồn tại trong suốt thời gian đặt điện áp.

Dựa vào trị số của dòng điện rò để đánh giá chất lượng của vật liệu cách điện. Nếu dòng điện rò có trị số bé thì cách điện tốt, còn nếu lớn thì tính chất cách điện của vật liệu kém. Như vậy, tính chất của vật liệu cách điện được xác định qua **điện dẫn suất ( $\gamma$ )** hay **điện trở suất  $\rho$** :

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (2-2)$$

Điện trở cách điện của khối điện môi  $R_{cd}$  là:

$$R_{cd} = \frac{U}{I_{rB}} \quad (2-3)$$

Trong đó:  $U$  - điện áp một chiều đặt lên điện môi.

Đối với điện môi rắn có hai khái niệm: điện trở suất khối " $\rho_v$ " và điện trở suất mặt  $\rho_s$ .

**Điện trở suất khối** là điện trở của khối lập phương có cạnh bằng 1cm hình dung cắt ra từ vật liệu khi dòng điện đi qua hai mặt đối diện khối lập phương đó, đơn vị đo bằng ( $\Omega.cm$ ):

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{h} \quad [\Omega.cm] \quad (2-4)$$

Trong đó:  $R_v$  - điện trở khối của mẫu, [ $\Omega$ ];

$S$  - diện tích của điện cực đo, [ $cm^2$ ];

$h$  - chiều dày khối điện môi, [ $cm$ ].

**Điện trở suất mặt** là điện trở của một hình vuông bề mặt vật liệu khi dòng điện đi qua hai cạnh đối diện:

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l} \quad [\Omega] \quad (2-5)$$

Trong đó:  $R_s$  - điện trở mặt của mẫu vật liệu, [ $\Omega$ ];

$d$  - chiều dài điện cực, [ $cm$ ];

$l$  - khoảng cách giữa hai cực, [ $cm$ ].

Tương ứng với  $\rho_v$  có điện dẫn suất khối  $\gamma_v = \frac{1}{\rho_v}$ ,  $[\Omega, \text{cm}]^{-1}$  ứng với  $\rho_s$  có

điện dẫn suất mặt  $\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}$ ,  $[\Omega]^{-1}$  hay còn có đơn vị đo là S (Simen).

Điện dẫn toàn phần tương ứng với điện trở cách điện  $R_{cd}$  của điện môi rắn bằng tổng các điện dẫn khối và mặt.

Độ dẫn điện của vật liệu cách điện được xác định bởi trạng thái của chất khí, lỏng hoặc rắn và phụ thuộc vào độ ẩm, nhiệt độ của môi trường. Cường độ điện trường khi tiến hành đo cũng gây một số ảnh hưởng đối với điện dẫn của điện môi.

Khi làm việc lâu dài dưới điện áp, dòng điện đi trong điện môi rắn và lỏng có thể tăng hoặc giảm theo thời gian. Dòng điện giảm theo thời gian chứng tỏ độ dẫn điện của vật liệu mà được xác định bởi các ion của các tạp chất đã được giảm đi do sự tẩy sạch về điện. Còn dòng điện tăng theo thời gian, chứng tỏ có sự tham gia của các điện tích mới xuất hiện trong cấu trúc bản thân hay quá trình lão hoá xảy ra trong vật liệu dưới tác dụng của điện áp, có thể gây nên sự phá huỷ dần dần và dẫn tới hiện tượng đánh thủng điện môi.

Tích số điện trở cách điện của điện môi với điện dung của tụ điện được gọi là hằng số thời gian tự phóng của tụ điện:

$$\tau_o = R_{cd} \cdot C \quad (2-6)$$

Trị số  $\tau_o$  được xác định từ biểu thức:

$$u = u_o e^{-\frac{\tau}{\tau_o}}; u_{\tau_o} = u_o e^{-\frac{\tau}{\tau_o}} = \frac{u_o}{e} \quad (2-$$

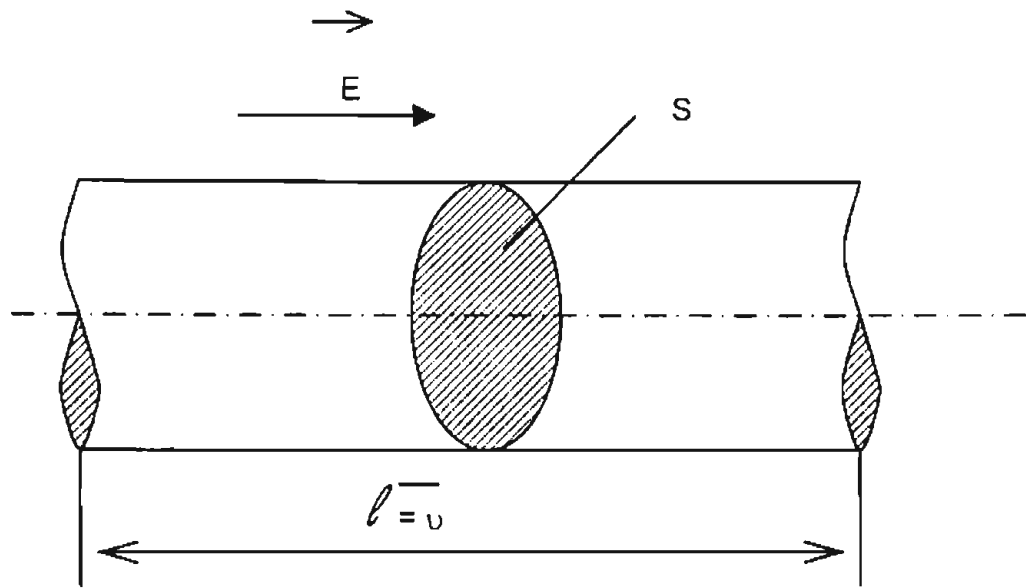
7)

Ở đây:  $u$  - điện áp trên các điện cực của tụ điện sau thời gian  $\tau$  tính từ lúc ngắt điện ra khỏi nguồn điện áp;  $u_o$  - điện áp đạt được do tụ tích điện ( $\tau = 0$ );  $R_{cd}$  - điện trở cách điện;  $C$  - điện dung của tụ điện.

## 2.2. ĐIỆN DẪN CỦA ĐIỆN MÔI

**Mật độ dòng điện** chạy trong điện môi được tính bằng tổng các điện tích chuyển động qua một đơn vị diện tích vuông góc với phương điện trường trong một đơn vị thời gian.

Để đưa ra khái niệm về điện dẫn của điện môi, ta xét mô hình điện môi có dạng hình trụ với tiết diện là  $S$ , chiều dài hình trụ bằng vận tốc trung bình của các điện tích  $\bar{v}$ . Chiều của điện trường bên ngoài trùng với trục hình trụ (hình 2-2).



Hình 2.2. Minh họa khái niệm về điện dẫn của điện môi.

Nếu gọi  $n$  là **mật độ điện tích tự do** chứa trong điện môi, mỗi phần tử có điện tích là  $q$ , dưới tác dụng của điện trường  $E$  tất cả các điện tích tự do sẽ chuyển động đến các điện cực (điện tích dương đi về phía cực âm, điện tích âm đi về phía cực dương) và tạo nên dòng điện đi trong điện môi. Tổng các điện tích chuyển động qua tiết diện  $S$  bằng tổng các điện tích chứa trong thể tích  $V$  của hình trụ cũng chính bằng dòng điện qua điện môi:

$$Q = n \cdot q \cdot V = n \cdot q \cdot s \cdot \bar{v} = I \quad (2-8)$$

Mặt khác ta có:

$$I = j \cdot s \quad (2-9)$$

Từ (2.8) và (2.9) ta có:

$$j = n \cdot q \cdot \bar{v} \quad (2-10)$$

Với  $j$  - là mật độ dòng điện ( $A/m^2$ ).

Trong điện môi tồn tại các dạng điện tích tự do khác nhau, chúng có thể là các điện tử, ion dương, ion âm hay là các khối mang điện tích. Dưới tác dụng của điện trường, các điện tích này sẽ chuyển động với những vận tốc trung bình khác nhau. Tốc độ chuyển động được xác định theo công thức:

$$v_{(+)} = K_{(+)} \cdot E ; \quad v_{(-)} = K_{(-)} \cdot E \quad (2-11)$$

Với:  $v_{(+)}$ ,  $v_{(-)}$  - tốc độ trung bình của các điện tích dương và âm;

$K_{(+)}, K_{(-)}$  - độ linh hoạt của các điện tích dương và âm.

**Độ linh hoạt** của các điện tích là đại lượng đặc trưng cho khả năng chuyển động của chúng dưới tác dụng của điện trường bên ngoài. Về trị số nó bằng vận tốc trung bình của điện tích tính trên một đơn vị cường độ điện trường ( $K = \frac{\bar{v}}{E}$ ).

Như vậy ta có thể viết:

$$j = n_{(+)} \cdot q_{(+)} \cdot \bar{v}_{(+)} + n_{(-)} \cdot q_{(-)} \cdot \bar{v}_{(-)} = [n_{(+)} \cdot q_{(+)} \cdot K_{(+)} + n_{(-)} \cdot q_{(-)} \cdot K_{(-)}] \cdot E \quad (2-12)$$

Trong vật liệu kỹ thuật điện có nhiều loại điện tích tự do khác nhau tham gia vào quá trình dẫn điện. Dựa vào thành phần của dòng điện dẫn người ta chia điện dẫn thành ba loại sau.

1) **Điện dẫn điện tử**: thành phần của loại điện dẫn này là các điện tử tự do trong điện môi.

2) **Điện dẫn ion**: thành phần của loại điện dẫn này là các ion dương và ion âm. Các ion sẽ chuyển động đến điện cực khi có điện trường tác động, tại điện cực các ion sẽ được trung hoà về điện và tích luỹ dần trên bề mặt điện cực giống như quá trình điện phân. Vì vậy, **điện dẫn ion** còn gọi là **điện dẫn điện phân**.

3) **Điện dẫn điện di** hay còn gọi là điện dẫn môtion. Thành phần của dòng điện này là các nhóm phân tử hay tạp chất được tích điện tồn tại trong điện môi, chúng được tạo nên bởi ma sát trong quá trình chuyển động nhiệt.

### 2.3. ĐIỆN DẪN CỦA ĐIỆN MÔI KHÍ

Các chất khí có mật độ phân tử rất bé, khoảng cách giữa các phân tử khí lớn hơn nhiều so với bán kính của chúng, vì vậy lực tương tác giữa các phân tử khí cũng rất nhỏ. Trong các chất khí luôn tồn tại các điện tích tự do là các điện tử, các ion dương và ion âm. Những điện tích này được tạo nên bởi quá trình ion hoá và kết hợp tự nhiên.

**Ion hoá** là quá trình phân ly phân tử trung hoà thành điện tử và ion dương. Nói cách khác là quá trình tách điện tử ra khỏi phân tử trung hoà do các yếu tố tự nhiên, ví dụ như: năng lượng bức xạ mặt trời, các tia phóng xạ, sóng ngắn ... Số lượng điện tích xuất hiện do các ion hoá tự nhiên là rất nhỏ. Chính vì vậy điện dẫn của điện môi khí có trị số bé và hầu hết các chất khí ở trong một điều kiện môi trường nào đó là những điện môi tốt.

Trong điện môi khí luôn xảy ra quá trình *ion hoá tự nhiên*, khi điều kiện môi trường không thay đổi, trong các chất khí bao giờ cũng chỉ tồn tại một số lượng điện tích tự do nhất định. Sở dĩ có hiện tượng này là vì trong điện môi khí tồn tại quá trình tái hợp song song với quá trình ion hoá, đó là *quá trình kết hợp* giữa các điện tích trái dấu tạo thành phân tử trung hoà. Trạng thái cân bằng của điện môi đạt được khi số điện tích xuất hiện do ion hoá cân bằng với số điện tích bị tái hợp.

Dưới tác động của điện trường bé, các điện tích sinh ra bởi quá trình ion hoá tự nhiên chuyển động và tạo nên dòng điện dẫn trong điện môi khí. Dòng điện dẫn này thường được gọi là "*điện dẫn không tự duy trì*".

Khi cường độ điện trường đặt lên điện môi khí đủ lớn, những điện tích có trong điện môi sẽ nhận được năng lượng và tăng tốc chuyển động, khi va chạm với phân tử trung hoà sẽ gây nên ion hoá (*ion hoá do va chạm*). Số lượng điện tích được tạo nên bởi quá trình *ion hoá do va chạm* sẽ tăng lên theo hàm số mũ làm cho dòng điện dẫn tăng. Điện dẫn của chất khí trong trường hợp này gọi là "*điện dẫn tự duy trì*".

Giả sử tại thời điểm nhất định trong một đơn vị thể tích khí có  $n_0$  ion dương và cùng số lượng đó ion âm. Khi đó số ion tái hợp  $n_1$  trong đơn vị thể tích tính trong một đơn vị thời gian sẽ bằng:

$$n_1 = \nu \cdot n_0^2 \quad (2-14)$$

Trong đó:  $\nu$  - hệ số tái hợp ; đối với không khí:  $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Nếu gọi  $n_2$  là số lượng ion được tạo ra bởi quá trình ion hoá, trong điều kiện cân bằng ta có:

$$n_2 = n_1 = \nu \cdot n_0^2 \quad (2-15)$$

Khi chất khí đặt vào giữa hai điện cực phẳng song song có điện áp một chiều là  $UV$ , khoảng cách giữa các điện cực là  $s$  cm thì điện trường tạo nên giữa hai điện cực là:  $E = \frac{U}{s}$  (kV/cm). Dưới tác dụng của điện áp (điện trường), các ion sẽ chuyển động và trong mạch xuất hiện dòng điện. Một số ion bị trung hoà trên các điện cực, một số khác mất đi do tái hợp. Xuất phát từ đó có thể viết đẳng thức sau:

$$n_2 = \nu \cdot n_0^2 + \frac{j}{q} \quad (2-16)$$

Trong đó:  $j$  - mật độ dòng điện;  $q$ - điện tích của ion.

Với biểu thức trên ta xét hai trường hợp giới hạn:

**Trường hợp thứ nhất:** Khi mật độ dòng điện  $j$  nhỏ và nhỏ tới mức  $j/q \ll n_0^2$ ; tức là có thể bỏ qua lượng ion tách ra từ điện cực. Khi đó  $n_2 = v \cdot n_0^2$  và mật độ dòng điện sẽ là:

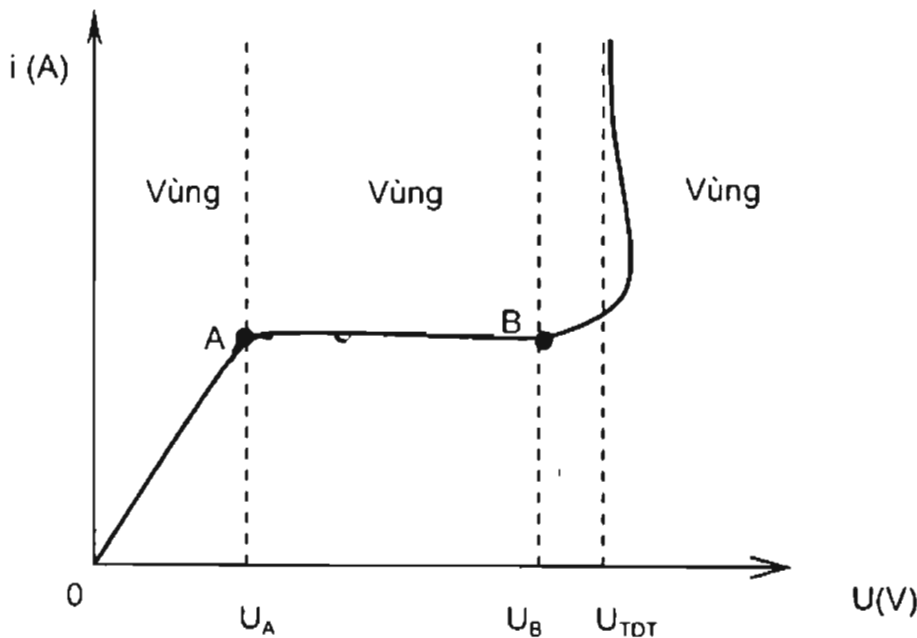
$$j = n_0 \cdot q [v_{(+)} + v_{(-)}] = n_0 q [K_{(+)} + K_{(-)}] \cdot E \quad (2-17)$$

Trong đó:  $v_{(+)}, v_{(-)}$  - là tốc độ chuyển động của các ion dương và âm khi đặt dưới điện trường;  $K_{(+)}, K_{(-)}$  - độ linh hoạt của các ion tương ứng, về trị số bằng tốc độ các ion khi cường độ điện trường bằng đơn vị;  $E$  - cường độ điện trường.

Từ biểu thức (2-17) ta thấy: khi cường độ điện trường yếu, mật độ dòng điện của điện môi khí tỉ lệ thuận với cường độ điện trường tuân theo định luật Ôm.

**Trường hợp thứ hai:** Khi mật độ dòng điện lớn và lượng ion giảm bớt chỉ liên quan tới hiện tượng trung hoà trên các điện cực, còn sự tái hợp rất yếu, ta có thể bỏ qua thành phần thứ nhất của phương trình (2-16), khi đó:

$$n_2 = \frac{j}{q} \quad (2-18)$$



Hình 2-3. Quan hệ giữa dòng điện và điện áp đối với chất khí.

Từ biểu thức (2-18) thấy rõ ràng là mật độ dòng điện trong trường hợp này không phụ thuộc vào điện áp. Dòng điện đó được gọi là "dòng điện bão hoà ( $j = n_2 q$ )".

Trên hình 2-3 biểu diễn mối quan hệ giữa dòng điện và điện áp của chất khí hay còn gọi là đặc tính von - ampe (V - A). Với đặc tính trên ta có thể giải thích như sau:

**Vùng I:** Đoạn đầu của đường cong, điện áp tăng từ "0" cho đến  $U_A$  tương ứng với miền của định luật Ôm, trong chất khí có thể xem số lượng ion dương và âm ( $n_+$ ) không đổi. Khi điện áp đặt lên hai điện cực tăng, thì cường độ điện trường ( $E = \frac{U}{S}$ ) sẽ tăng lên. Lực điện trường tác dụng lên các điện tích tăng ( $F = q.E$ ); do đó tốc độ chuyển động của các điện tích sẽ tăng lên; mật độ dòng điện tăng và dòng điện sẽ tăng tuyến tính với điện áp tuân theo định luật Ôm.

**Vùng II:** Ứng với khu vực điện trường có dòng điện bão hoà. Khi điện áp tăng cao, cường độ điện trường đủ lớn, tốc độ chuyển động của các điện tích lớn, các ion chưa kịp tái hợp đã bị kéo đến điện cực. Điều đó có nghĩa là: có bao nhiêu điện tích sinh ra thì có bấy nhiêu điện tích đi về các điện cực và trung hoà. Nhưng số lượng điện tích sinh ra bởi ion hoá tự nhiên không đổi, cho nên dòng điện đạt tới trị số bão hoà, mặc dù điện áp vẫn tăng lên nhưng không làm cho dòng điện tăng, ứng với đoạn nằm ngang của đồ thị.

Đối với không khí ở điều kiện bình thường với khoảng cách giữa các điện cực là 10 mm và cường độ điện trường khoảng 0,0006 V/mm thì dòng điện đạt trị số bão hoà với mật độ dòng điện khoảng  $10^{-21}$  A/mm<sup>2</sup>. Vì thế có thể xem không khí là điện môi tốt khi chưa có các điều kiện đưa đến ion hoá va chạm.

**Vùng III:** Ứng với khu vực có cường độ điện trường mạnh. Ở khu vực này dòng điện bắt đầu tăng nhanh không tuân theo định luật Ôm. Điều này có thể giải thích dựa trên cơ sở của hiện tượng ion hoá do va chạm khi cường độ điện trường đặt lên điện môi khí có trị số lớn. Khi mật độ điện tích lớn sẽ gây nên phóng điện tạo thành dòng plasma nối liền giữa hai điện cực, chất khí trở thành vật liệu dẫn điện, dòng điện tăng lên theo hàm số mũ. Song theo nguyên lý bảo toàn năng lượng và do công suất nguồn có hạn, để duy trì dòng điện phóng điện áp sẽ không tăng mà sẽ giảm tới điện áp tự duy trì ( $U_{TDT}$ ). Về vấn đề này sẽ trình bày rõ hơn ở chương V "Sự phóng điện trong điện môi".

## 2.4. ĐIỆN DẪN CỦA ĐIỆN MÔI LỎNG

Dòng điện trong điện môi lỏng được xác định bởi sự chuyển dịch các ion hay các phân tử mang điện tích. Trong các điện môi lỏng tồn tại hai loại điện dẫn đó là

*điện dẫn ion* và *điện dẫn điện di*. Ta sẽ nghiên cứu từng loại điện dẫn một cách riêng biệt.

### 2.4.1. Điện dẫn ion của các điện môi lỏng

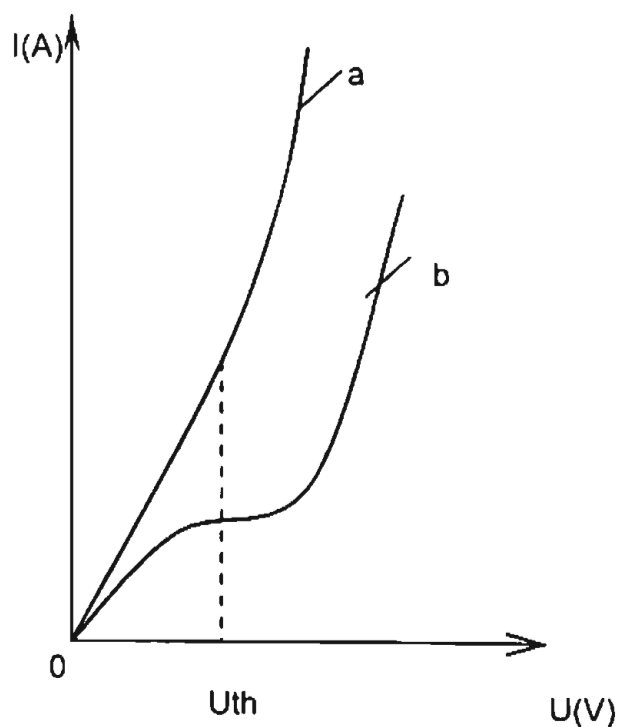
Khác với điện môi khí, trong điện môi lỏng các điện tích tự do xuất hiện không chỉ do ion hoá tự nhiên mà còn do quá trình phân ly các phân tử của chính bản thân chất lỏng và tạp chất.

Trong điện môi lỏng kỹ thuật bao giờ cũng tồn tại một số lượng tạp chất nhất định. Thông thường các phân tử tạp chất dễ bị phân ly hơn các phân tử của chính điện môi đó. Do vậy điện dẫn điện môi lỏng bao gồm điện dẫn của điện môi chính và điện dẫn của tạp chất. Điện dẫn của điện môi lỏng phụ thuộc vào độ tinh khiết của điện môi đó. Nếu loại trừ được các tạp chất trong điện môi lỏng sẽ làm tăng điện trở suất hay có thể nói sẽ làm giảm dòng điện dẫn đi trong điện môi.

Trên hình 2-4 biểu diễn quan hệ giữa dòng điện và điện áp của điện môi lỏng. Đường cong "a" là đặc tính von - ampe của điện môi lỏng có chứa nhiều tạp chất. Trên đồ thị này không thấy phần dòng điện bão hoà, dòng điện tăng tuyến tính với điện áp đến giá trị  $U_{th}$  (điện áp tới hạn), sau đó xuất hiện quá trình ion hoá va chạm, điện tích tăng lên theo hàm số mũ, dòng điện cũng tăng nhanh và dẫn tới phóng điện trong điện môi lỏng.

Tuy nhiên đối với các điện môi lỏng tinh khiết mà được điều chế trong phòng thí nghiệm thì trên đường đặc tính von - ampe có xuất hiện một đoạn nhỏ giống như đoạn bão hoà của điện môi khí (đường cong "b" hình 2-4). Những chất lỏng như vậy được gọi là chất lỏng sạch giới hạn (tinh khiết).

Điện môi lỏng cực tính bao giờ cũng có điện dẫn suất cao hơn điện môi lỏng trung tính. Khi hằng số điện môi



**Hình 2-4. Quan hệ giữa dòng điện với điện áp của điện môi lỏng.**



tăng thì điện dẫn suất cũng tăng lên. Những điện môi lỏng cực tính mạnh có điện dẫn cao tới mức có thể xem chúng không phải là điện môi mà là vật dẫn có điện dẫn ion.

Nước là một dạng tạp chất phổ biến nhất trong các điện môi lỏng. Nước từ môi trường bên ngoài có thể xâm nhập vào các chất lỏng trong khi vận chuyển, hay khi cất giữ và vận hành. Nước tồn tại trong điện môi lỏng ở ba dạng sau: nước *hoà tan*, *nước huyền phù* hay còn gọi là *nước nhũ tương* và *nước lỏng đọng*. Thông thường dầu máy biến áp, dầu tụ điện hay cáp điện có tỷ trọng nhỏ hơn ( $0,86 \div 0,88$ ) lần so với nước, mà tỷ trọng của nước là  $1000\text{kg/m}^3$ .

Nước ở trong điện môi lỏng có thể chuyển từ dạng này sang dạng khác là tùy thuộc vào nhiệt độ. Khi nhiệt độ tăng một phần nước lỏng đọng chuyển sang dạng nhũ tương hoặc chuyển từ dạng nhũ tương sang hoà tan. Khi nhiệt độ giảm thì quá trình xảy ra ngược lại.

Điện dẫn ion của điện môi lỏng phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ. Khi nhiệt độ tăng thì chuyển động nhiệt các phân tử điện môi lỏng sẽ tăng, điện môi lỏng có sự giãn nở nhiệt, lực liên kết giữa các phân tử giảm đi, độ nhớt sẽ giảm, mức độ phân ly các phân tử do nhiệt sẽ tăng lên và làm tăng độ điện dẫn điện môi lỏng.

Ở nhiệt độ bình thường các phân tử chất lỏng luôn ở trạng thái chuyển động nhiệt. Số lượng ion  $n_3$  được giải phóng bởi chuyển động nhiệt trong một đơn vị thời gian, trong một đơn vị thể tích và có khả năng chuyển dịch theo một hướng nào đó của không gian, được biểu diễn bằng biểu thức:

$$n_3 = \frac{n_0}{6} \cdot f \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \quad (2-19)$$

Trong đó:

$n_0$  - mật độ các điện tích của điện môi;  $f$  - tần số dao động nhiệt;  $W$  - năng lượng kích thích hay còn gọi là năng lượng hoạt tính.

Số "6" nằm ở mẫu số là do xét đến khả năng chuyển động nhiệt theo một trong sáu hướng của không gian 3 chiều. Thừa số  $e^{-\frac{W}{kT}}$  tương ứng với xác suất có liên quan tới trị số năng lượng của nó bằng hoặc lớn hơn năng lượng của hàng rào điện thế;  $k$  - là hằng số Boltzomal ( $k = 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ erg/}^\circ\text{K}$ ).

Khi nằm trong điện trường các ion của điện môi nhận tốc độ bổ xung theo hướng của trường, tức là thu nhận thêm năng lượng do trường cung cấp. Các ion khác loại chuyển động theo chiều ngược lại bị mất một phần năng lượng. Như vậy

hàng rào điện thế đối với một số ion sẽ giảm, còn với số khác thì sẽ tăng lên. Số ion chuyển động theo chiều của trường thẳng được hàng rào điện thế được tăng lên một lượng bằng:

$$\begin{aligned} \Delta n &= \frac{n_0}{6} f \left( e^{-\frac{w-\Delta w}{kT}} - e^{-\frac{w+\Delta w}{kT}} \right) = \\ &= \frac{n_0 f}{6} e^{-\frac{w}{kT}} \left( e^{-\frac{\Delta w}{kT}} - e^{+\frac{\Delta w}{kT}} \right) \end{aligned} \quad (2-20)$$

Trong đó:  $\Delta W = \frac{q|E}{2}$

$q$  - điện tích của ion;  $l$  - khoảng cách giữa các hạt;  $E$  - cường độ điện trường.

Phân tích hàm số mũ  $e^{-\frac{\Delta w}{kT}}$  và  $e^{+\frac{\Delta w}{kT}}$  thành chuỗi và lấy hai số hạng đầu với điều kiện  $\Delta W \ll kT$ , ta có:

$$\Delta n = n_0 \cdot q \cdot k = \frac{n_0 q E l f}{6kT} e^{-\frac{w}{kT}} \quad (2-21)$$

Số lượng chuyển dịch gia tăng  $z$  thực hiện bởi một ion trong một giây theo hướng của trường sẽ là:

$$z = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{q l f}{6kT} E e^{-\frac{w}{kT}} \quad (2-22)$$

Vận tốc chuyển động  $v$  của ion theo hướng điện trường sẽ bằng tích số lượng chuyển dịch gia tăng  $z$  của một ion trong một giây và một đoạn  $l$  mà ion đi qua trong mỗi lần chuyển dời:

$$v = Z \cdot l = \frac{q l^2 f}{6kT} E e^{-\frac{w}{kT}} \quad (2-23)$$

Độ linh hoạt  $K$  của ion được tính bằng biểu thức:

$$K = \frac{v}{E} = \frac{q l^2 f}{6kT} e^{-\frac{w}{kT}} \quad (2-24)$$

Nếu ta cho độ linh hoạt của điện tích dương và âm bằng nhau thì điện dẫn suất có thể viết như sau:

$$\gamma = n_o \cdot q \cdot K = \frac{n_o q^2 l^2 f}{6kT} e^{-\frac{w}{kT}} \quad (2-25)$$

Đặt:  $\frac{n_o q^2 l^2 f}{6kT} = A$  và  $\frac{w}{k} = a$  ta có:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{a}{T}} \quad (2-26)$$

Từ biểu thức (2-25) ta thấy: điện dẫn của điện môi lỏng trong điện trường yếu phụ thuộc vào mật độ điện tích tự do, cấu trúc chất lỏng và nhiệt độ và không phụ thuộc vào cường độ điện trường. Quan hệ giữa dòng điện với điện áp tuân theo định luật Ôm.

Trong thực tế khi phạm vi nhiệt độ thay đổi không lớn lắm thì quan hệ giữa điện dẫn suất của điện môi lỏng với nhiệt độ thường được biểu diễn bằng công thức sau:

$$\gamma = \gamma_o \cdot e^{\alpha t} \quad (2-27)$$

Trong đó:  $\gamma_o$  - điện dẫn của điện môi lỏng đo ở nhiệt độ bình thường (20°C);

$\alpha$  - hệ số mũ đối với chất lỏng đã cho;

t- nhiệt độ đo bằng °C.

Điện dẫn điện môi lỏng phụ thuộc vào độ nhớt của nó, nếu gọi  $\eta$  là độ nhớt của điện môi lỏng, thì:

$$\eta = \frac{6kT}{fl^3} e^{\frac{w}{kT}} \quad (2-28)$$

Từ biểu thức (2-25) và (2-28) thì tích  $\eta \cdot \gamma$  sẽ là:

$$\eta \cdot \gamma = \frac{6kT}{fl^3} e^{\frac{w}{kT}} \cdot \frac{n_o q^2 l^2 f}{6kT} e^{-\frac{w}{kT}} = \frac{n_o q^2}{l} \quad (2-29)$$

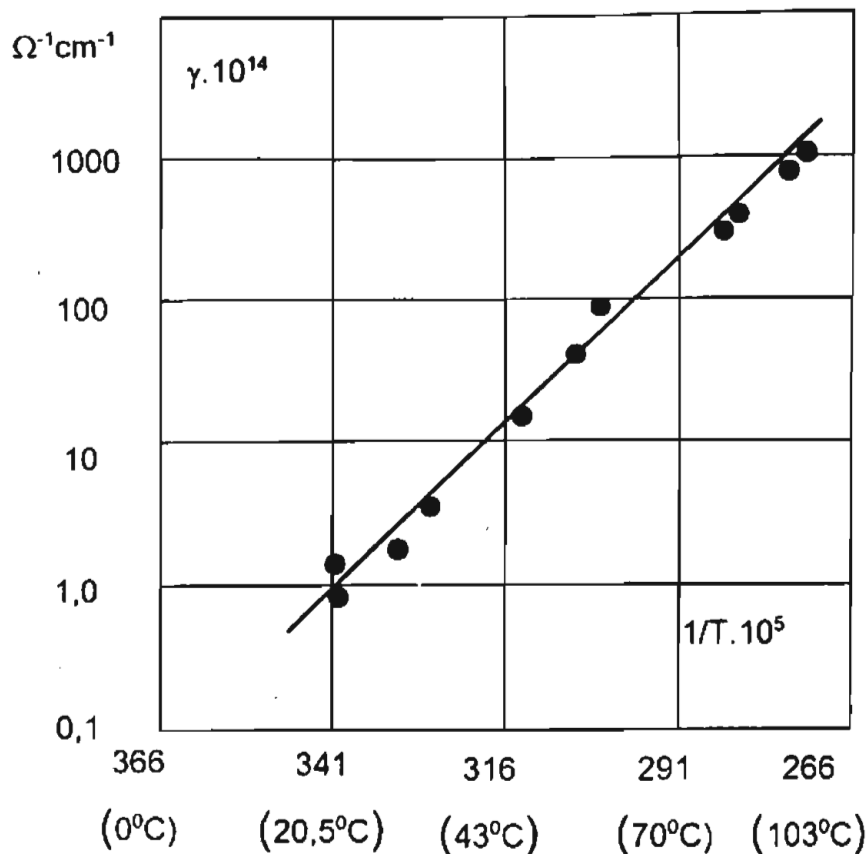
Khi nhiệt độ không thay đổi thì tích số độ nhớt và điện dẫn suất của một điện môi có trị số không đổi ( $\eta \cdot \gamma = \text{const}$ ). Nếu biết một trong hai thành phần ta sẽ tính được thành phần còn lại:

$$\gamma = \frac{n_o q^2}{l \eta} \quad (2-30)$$

Từ biểu thức (2-30) thấy rằng khi nhiệt độ tăng, độ nhớt điện môi lỏng giảm, điện dẫn của điện môi lỏng sẽ tăng lên.

Đối với chất lỏng cực tính (ví dụ dầu gai) thì tích  $\eta \cdot \gamma$  hầu như không biến đổi ở các nhiệt độ khác nhau. Nhưng với dầu máy biến áp, độ dẫn điện được xác định bởi sự chuyển động của các ion tạp chất, mức độ phân ly các ion này tăng theo nhiệt độ, vì thế tích  $\eta \cdot \gamma$  của dầu máy biến áp cũng tăng theo nhiệt độ.

Trên hình 2-5 trình bày giữa quan hệ giữa điện dẫn suất của hỗn hợp dầu côlôfan với nhiệt độ khi giá trị hệ số  $a = 9100$ .



Hình 2-5. Quan hệ điện dẫn suất theo nhiệt độ của hỗn hợp lỏng dầu côlôfan.

Khi cường độ điện trường mạnh (khoảng 10÷100 kV/mm) năng lượng của điện trường đáng kể so với năng lượng của chuyển động nhiệt, dòng điện trong điện môi lỏng tăng nhanh không tuân theo định luật Ôm. Điều này thấy rõ khi phân tích hàm số mũ  $e^{\pm X}$  thành chuỗi số hạng ta lấy 4 số hạng đầu của chuỗi:

$$e^{-\frac{\Delta'w}{kT}} - e^{+\frac{\Delta'w}{kT}} = \frac{qIE}{kT} \left( 1 + \frac{q^2 l^2 E^2}{24k^2 T^2} \right) A$$

Từ đó điện dẫn của điện môi lỏng khi cường độ điện trường mạnh sẽ là:

$$\gamma = \frac{n_o q^2 l^2 f}{6kT} e^{-\frac{w_o}{kT}} \left( 1 + \frac{q^2 l^2 E^2}{24k^2 T^2} \right) \quad (2-31)$$

Từ biểu thức (2-31) ta thấy điện dẫn suất của điện môi lỏng trong điện trường mạnh không chỉ phụ thuộc vào mật độ điện tích tự do, cấu trúc chất lỏng và nhiệt độ mà còn phụ thuộc vào cường độ điện trường.

Như hình 2-4 đã trình bày đặc tính von - ampe của điện môi lỏng, khi điện áp cao, cường độ điện trường lớn gây nên ion hoá mãnh liệt, số lượng điện tích sinh ra lớn tới mức gây nên phóng điện trong điện môi lỏng.

## 2.4.2. Điện dẫn điện di

*Điện dẫn điện di* còn có tên gọi là điện dẫn mōlion được tạo nên bởi sự chuyển động có hướng của các phần tử mang điện tích dưới tác dụng của điện trường bên ngoài.

Điện môi lỏng thường chứa các tạp chất ở dạng hạt keo, xơ sợi, bụi bẩn ... lơ lửng ở bên trong, do có quá trình chuyển động nhiệt các tạp chất này ma sát với phân tử điện môi lỏng và chúng bị nhiễm điện. Tùy theo hằng số điện môi của tạp chất lớn hơn hay nhỏ hơn hằng số điện môi điện môi lỏng mà tạp chất có thể bị nhiễm điện tích dương hay âm. Nếu hằng số điện môi của tạp chất lớn hơn hằng số điện môi chất lỏng ( $\epsilon_{lc} > \epsilon_{dm}$ ) thì tạp chất bị **nhiễm điện tích dương (+)**. Nếu hằng số điện môi của tạp chất nhỏ hơn hằng số điện môi chất lỏng ( $\epsilon_{lc} < \epsilon_{dm}$ ) thì tạp chất sẽ bị **nhiễm điện tích âm (-)**.

Dưới tác dụng của điện trường các khối điện tích dương và âm của tạp chất sẽ chuyển động: khối điện tích dương đi về cực âm, khối điện tích âm đi về cực dương, chúng tạo nên dòng điện dẫn điện di. Thực chất dòng điện này là sự chuyển động của các khối mang điện tích dưới tác dụng của điện trường. Khi tiếp cận với điện cực các điện tích của tạp chất sẽ được trung hoà về điện. Như vậy xung quanh điện cực sẽ tập trung số lượng tạp chất lớn và mật độ tạp chất trong điện môi sẽ giảm tức là xảy ra quá trình làm sạch điện môi. Do hiệu ứng làm sạch nên điện dẫn của điện môi lỏng sẽ giảm đi sau khi đóng mạch vào nguồn điện áp một chiều. Ở điện áp xoay chiều hiệu ứng này không xuất hiện bởi vì có sự thay đổi hướng chuyển động liên tục, các tạp chất chuyển động theo tần số của điện áp.

Trong bảng 2.1 đưa ra các giá trị điện trở suất khối của một số chất lỏng đo ở nhiệt độ 20°C.

**Bảng 2.1: Giá trị điện trở suất  $\rho$  và hằng số điện môi  $\epsilon$ .**

Tên chất lỏng	Đặc điểm cấu tạo	Điện trở suất $\rho_v$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ] đo ở $t = 20^\circ\text{C}$	Hằng số điện môi $\epsilon$
- Benzen	Trung tính	$10^{13} \div 10^{14}$	2,2
- Dầu biến áp	Trung tính	$10^{12} \div 10^{15}$	2,2
- Xăng	Trung tính	$10^{12} \div 10^{15}$	2,0
- Sôvôn	Cực tính yếu	$10^{10} \div 10^{12}$	4,5
- Thầu dầu	Cực tính yếu	$10^{10} \div 10^{12}$	4,6
- Axêton	Cực tính mạnh	$10^6 \div 10^7$	22
- Rượu Êtilic	Cực tính mạnh	$10^6 \div 10^7$	33
- Nước cất	Cực tính mạnh	$10^5 \div 10^6$	82

Qua số liệu bảng 2.1 ta thấy: điện dẫn của điện môi lỏng phụ thuộc tính chất cực tính của điện môi, điện dẫn sẽ tăng lên khi hằng số điện môi tăng.

## 2.5. ĐIỆN DẪN CỦA ĐIỆN MÔI RẮN

Điện môi rắn có nhiều loại, chúng đa dạng về cấu trúc, thành phần hoá học, nguồn gốc và mức độ lẫn các tạp chất bụi bẩn... do vậy điện dẫn của điện môi rắn rất phức tạp. Điện dẫn điện môi rắn được tạo nên là do sự chuyển dịch các ion tạp chất dưới tác dụng của điện trường. Ở một số vật liệu tính dẫn điện của chúng còn có thể do sự chuyển động của các điện tử tự do.

Điện dẫn của điện môi rắn khác nhau không những được xác định bởi loại điện môi, mà còn xác định bởi thành phần tạp chất và điều kiện làm việc của chúng. Trong điện môi rắn luôn tồn tại các điện tích tự do, chúng có thể là các điện tử các ion của bản thân điện môi và của các tạp chất. Chính vì vậy điện dẫn của điện môi rắn có thể là điện dẫn điện tử, điện dẫn ion hay tổng hợp của cả hai loại trên. Các loại dòng điện này đi trong khối điện môi tạo nên thành dòng khối ( $I_v$ ). Để đánh giá chất lượng của điện môi người ta thường xác định điện dẫn suất khối ( $\gamma_v$ ) hay điện trở suất khối ( $\rho_v$ ):

$$\rho_v = \frac{1}{\gamma_v}$$

Về trị số, **điện trở suất khối** là điện trở của khối vật liệu dạng hình lập phương có cạnh là 1 cm khi dòng điện đi qua hai mặt đối diện của khối điện môi đó. Đơn vị đo điện trở suất khối là " $\Omega \cdot \text{cm}$ ".

Trên bề mặt điện môi rắn tồn tại các điện tích của bản thân điện môi và do các bụi bẩn và lớp nước ẩm gây nên. Các điện tích này sẽ tạo nên dòng điện dẫn mặt ( $\gamma_s$ ) mà nghịch đảo là điện trở suất mặt ( $\rho_s$ ).

**Điện trở suất mặt** là điện trở của một phần mặt điện môi có dạng hình vuông với cạnh bất kỳ khi dòng điện đi qua hai cạnh đối diện. Đơn vị đo của  $\rho_s$  là " $\Omega$ " (ôm).

Trong trường hợp tổng quát, điện dẫn suất của điện môi rắn ở một nhiệt độ T nào đó được biểu diễn bằng quan hệ sau đây:

$$\gamma = q \cdot n_{OT} \cdot K_T \quad (2-32)$$

Trong đó: q- điện tích của hạt mang điện;  $n_{OT}$  - số hạt mang điện trong đơn vị thể tích (mật độ điện tích),  $\text{cm}^{-3}$ ;  $K_T$  - độ linh hoạt của các điện tích,  $\text{cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$ ;  $\gamma$  - điện dẫn suất,  $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

Điện tử có độ linh hoạt cao hơn nhiều lần so với độ linh hoạt của các ion, ví dụ ở biôxýt titan độ linh hoạt của điện tử vào khoảng  $1\text{cm}^2/\text{s.V}$ , trong khi đó độ linh hoạt của ion trong gốm silicat nhôm chỉ bằng  $10^{-9} \div 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s.V}$ . Vì thế, trong điện môi có tính dẫn điện bằng điện tử, mật độ của điện tử nhỏ hơn số hạt trong điện môi có tính dẫn điện bằng ion  $10^9 \div 10^{12}$  lần, khi các điện tích giống nhau thì điện dẫn suất có trị số bằng nhau.

Trong điện môi rắn có cấu tạo ion, độ dẫn điện được xác định chủ yếu do sự chuyển dịch của các ion đã được giải phóng bởi quá trình chuyển động nhiệt. Ở nhiệt độ thấp có các ion chuyển dịch là các ion liên kết yếu (ví dụ: các ion của tạp chất), ở nhiệt độ cao có cả một số ion của mạng tinh thể bản thân điện môi được giải phóng. Còn trong các điện môi rắn có cấu tạo tinh thể là các nguyên tử và phân tử thì điện dẫn chỉ xuất hiện khi có các tạp chất. Số lượng ion phân ly phụ thuộc vào nhiệt độ theo quan hệ hàm số mũ sau:

$$n_{\text{OT}} = n_0 \cdot e^{-\frac{W_{\text{pl}}}{kT}} \quad (2-33)$$

Trong đó:  $n_0$  - mật độ ion;  $W_{\text{pl}}$  - năng lượng phân ly;  $k$  - hằng số Bônzômal;  $T$  - nhiệt độ tuyệt đối.

Độ linh hoạt của các ion theo nhiệt độ cũng được biểu diễn bằng hàm số mũ:

$$K_T = K_m e^{-\frac{W_{\text{cd}}}{kT}} \quad (2-34)$$

Trong đó:  $K_m$  - độ linh hoạt giới hạn của ion;  $W_{\text{cd}}$  - năng lượng chuyển dời ion từ vị trí không ổn định này sang vị trí khác.

Thay  $n_{\text{OT}}$  và  $K_T$  vào công thức tính điện dẫn suất (2-32) và gộp chung các hằng số  $n_0 \cdot q$  và  $K_m$  bằng một hệ số  $A$  ta có:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{b}{T}} \quad (2-35)$$

Trong đó: 
$$b = \frac{W_{\text{pl}} + W_{\text{cd}}}{k} \quad (2-36)$$

Công thức (2-35) chỉ rõ rằng, khi năng lượng phân ly và chuyển dịch càng lớn thì điện dẫn suất càng biến đổi mạnh theo nhiệt độ. Giá trị của hệ số  $b$  tìm được từ quan hệ giữa điện dẫn suất với nhiệt độ:

$$b = \frac{\Delta \ln \gamma}{\Delta \frac{1}{T}} \quad (2-37)$$

Thực tế thường có  $W_{pi} \gg W_{cd}$  nên khi nhiệt độ thay đổi, điện dẫn suất được xác định chủ yếu bởi sự thay đổi mật độ điện tích trong vật liệu.

Trường hợp dòng điện trong điện môi sinh ra do sự chuyển động của các ion khác loại, biểu thức (2-35) có dạng:

$$\gamma = \sum A_i e^{-\frac{w_i}{kT}} \quad (2-38)$$

Do đó, đường biểu diễn logarit của điện dẫn suất theo nhiệt độ có chỗ gãy, như hình 2-6.

Ở nhiệt độ thấp, người ta không đo điện dẫn riêng của chất đó mà thường đo điện dẫn do các tạp chất gây nên. Trong một số trường hợp, chỗ gãy trong quan hệ điện dẫn suất theo nhiệt độ được giải thích bởi các ion của bản thân vật liệu gốc có năng lượng phân ly khác nhau.

Thay  $\rho = \frac{1}{\gamma}$  ta có biểu thức biểu diễn quan hệ giữa điện trở suất khối với nhiệt độ như sau:

$$\rho = B.e^{\frac{b}{T}} \quad (2-39)$$

Trong đó: b, B - là các hằng số đặc trưng cho vật liệu đã cho.

Trong thực tế, khi xét quan hệ  $\gamma$  và  $\rho$  theo nhiệt độ người ta thường dùng các công thức sau:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\alpha t} \quad (2-40)$$

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha t} \quad (2-41)$$

Trong đó:  $\gamma_0$  - điện dẫn suất khối của vật liệu đo ở  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $\rho$  - điện trở suất khối của vật liệu đo ở  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  - hệ số nhiệt của vật liệu.

Nói chung điện dẫn suất của các điện môi rắn và quan hệ của nó với nhiệt độ được xác định bởi cấu tạo và thành phần vật liệu. Trong các vật liệu có cấu tạo tinh thể ion, điện dẫn còn phụ thuộc vào hoá trị của các ion đó. Tinh thể ion hoá trị một có điện dẫn lớn hơn các tinh thể ion nhiều hoá trị. Ví dụ, tinh thể NaCl có điện dẫn cao hơn các tinh thể MgO hay  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nhiều lần.

Các điện môi cấu tạo phân tử như lưu huỳnh, poliêtilen, paraffin ... có điện dẫn suất rất nhỏ và chỉ phụ thuộc vào số lượng tạp chất chứa trong các điện môi đó.



Điện dẫn của các chất không định hình liên quan trước hết tới thành phần của chúng. Các chất hữu cơ trùng hợp cao phân tử có điện dẫn suất phụ thuộc nhiều vào: thành phần hoá học, các tạp chất, mức độ trùng hợp, mức độ lưu hoá ...

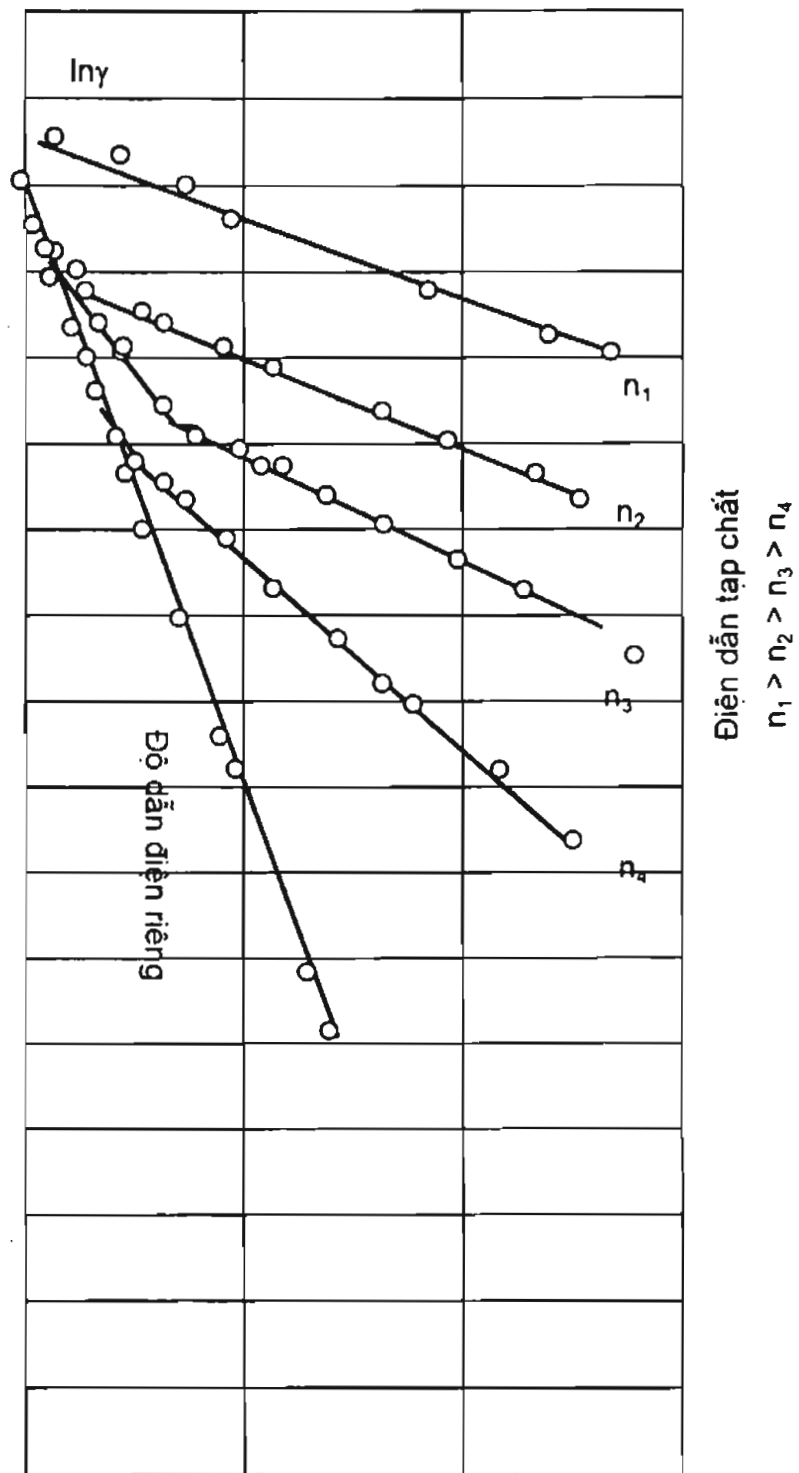
Điện môi hữu cơ trung tính không kết tinh, ví dụ như polistirol có đặc điểm là điện dẫn suất nhỏ.

Các thuỷ tinh vô cơ hợp thành một nhóm lớn các chất không kết tinh. Độ dẫn điện của thuỷ tinh liên quan rất chặt chẽ với thành phần hoá học, điều đó cho phép trong nhiều trường hợp nhận được giá trị điện dẫn suất định trước.

Trên hình 2-7 cho quan hệ điện trở suất khối của thạch anh theo nhiệt độ.

Thuỷ tinh thạch anh - thạch anh nóng chảy và anhydrít boric nóng chảy có điện dẫn suất rất nhỏ. Quan hệ theo nhiệt độ của điện dẫn của các thuỷ tinh này rất lớn, chúng tỏ rằng năng lượng giải phóng ion lớn (hệ số  $b \approx 22.000$ ).

Đưa vào thành phần của thuỷ tinh các axit kim loại của các nhóm khác nhau sẽ gây tác dụng khác nhau đến độ dẫn điện. Đưa các axit kim loại kiềm của nhóm thứ nhất vào thành phần thuỷ tinh sẽ làm cho điện dẫn suất tăng mạnh, độ tăng này phụ thuộc vào bán kính ion. Ion natri có bán kính nhỏ hơn kali nên điện dẫn suất tăng nhiều hơn ion kali (hệ số  $b$  của thuỷ tinh có các ion kiềm gần bằng 10.000).



Hình 2-6. Thành phần riêng và thành phần tạp chất của điện dẫn suất của điện môi chứa các tạp chất khác nhau,  $n$  - nồng độ tạp chất.

Khi đưa vào thành phần của thủy tinh các axit kim loại nặng (bari hoặc chì) làm trung hoà axit kiềm và còn làm giảm đáng kể điện dẫn suất của thủy tinh. Nếu xem sứ cách điện như một hệ có chứa thủy tinh thì rõ ràng thấy điện dẫn suất của điện môi này giảm khi đưa axit bari vào thành phần của nó.

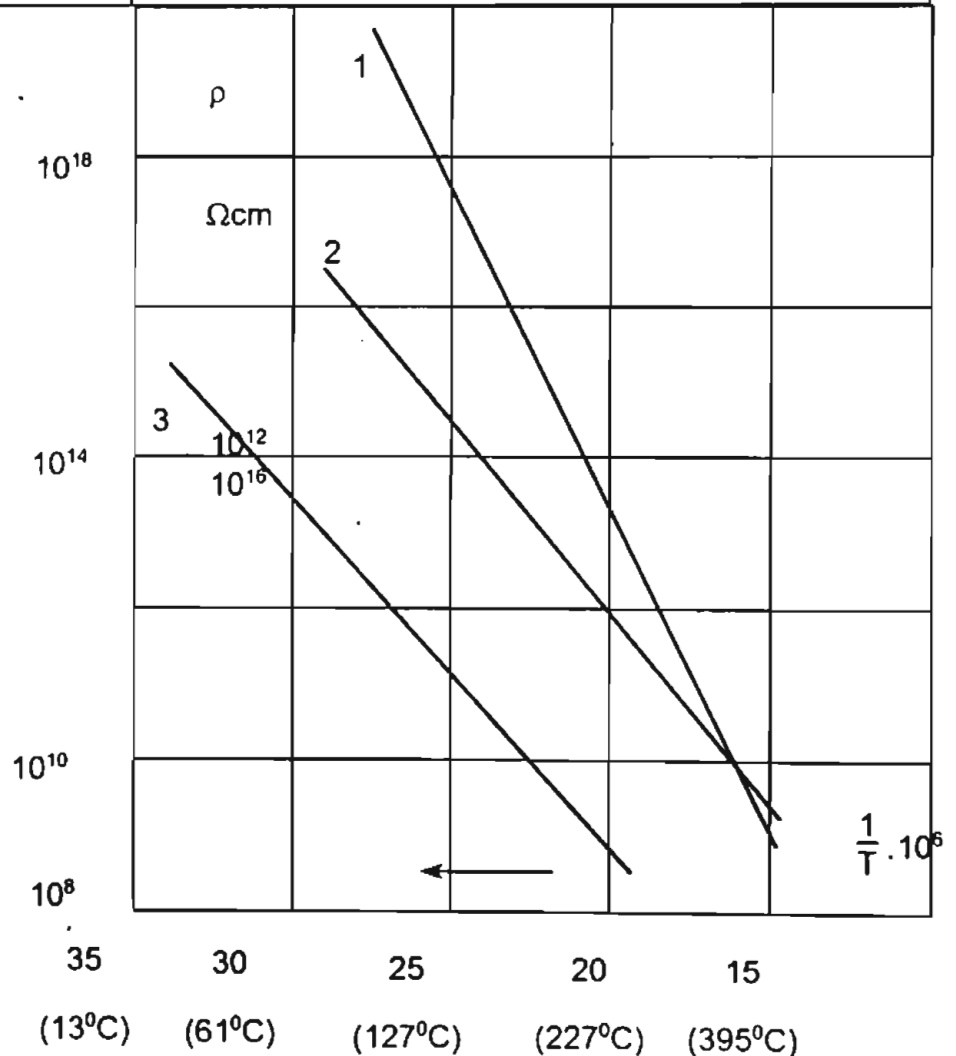
Trong bảng 2-2 đưa ra trị số điện trở suất khối của một số thủy tinh điển hình.

**Bảng 2-2: Giá trị  $\rho$  của một số loại thủy tinh**

Tên gọi thủy tinh	Điện trở suất khối $\rho_V$ đo ở ( $t = 200^\circ\text{C}$ ), $\Omega\cdot\text{cm}$
- Pirêch natri (thủy tinh chịu nhiệt)	$2 \cdot 10^8$
- Pirêch kali	$8 \cdot 10^{11}$
- Thủy tinh chì	$2 \cdot 10^{12}$

**Hình 2-7. Quan hệ  $\rho_r = f(t^d)$  của thạch anh.**

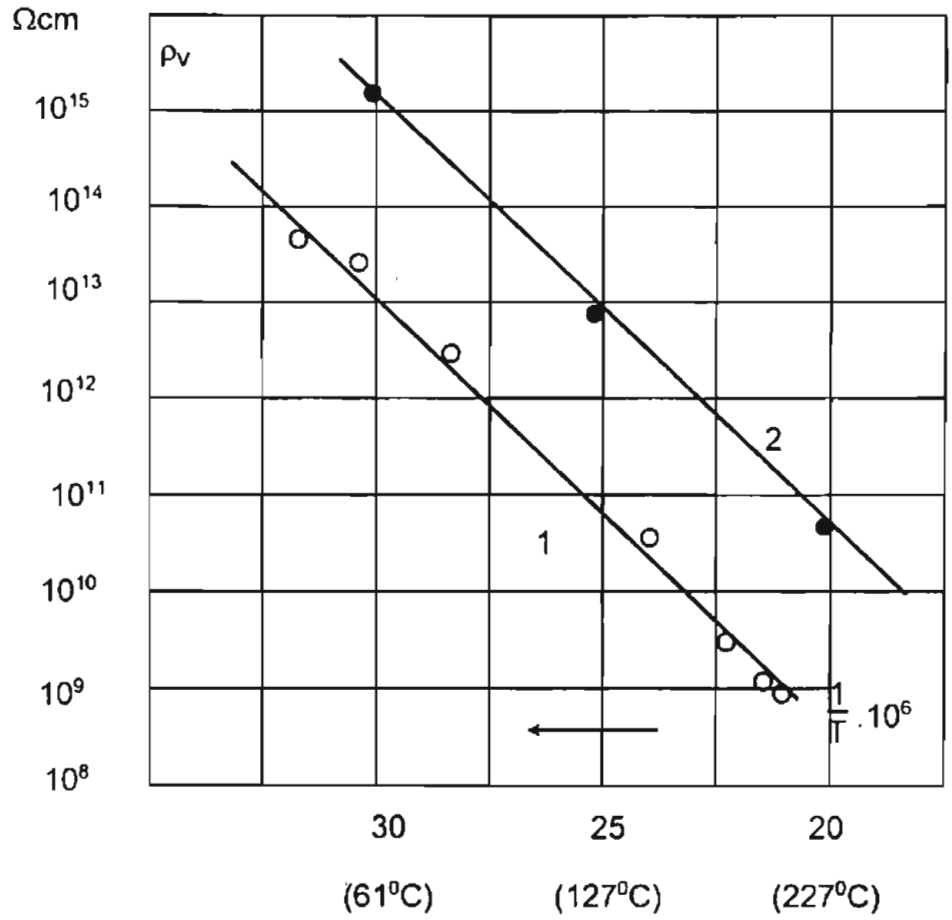
- 1- Thạch anh nóng chảy (ở trạng thái vô định hình).
- 2- Thạch anh kết tinh ( $\rho$  đo theo phương vuông góc với trục chính).
- 3- Thạch anh kết tinh ( $\rho$  đo theo phương song song với trục chính).



Trên hình 2-8 đưa ra quan hệ của điện trở suất khối của sứ cách điện và sứ vô tuyến có chứa ôxít bari theo nhiệt độ.

Điện dẫn suất của các điện môi xốp khi bị hút ẩm, thậm chí với một lượng không đáng kể cũng tăng lên rất mạnh. Sấy khô vật liệu sẽ làm tăng điện trở suất của chúng, nhưng khi đặt ở trong môi trường ẩm điện trở suất lại bị giảm vì chúng bị hút ẩm vào bên trong.

Trong bảng 2-3 đưa ra trị số điện trở suất khối của các vật liệu hút ẩm ở các độ ẩm khác nhau của không khí bao quanh.



**Bảng 2-3: Giá trị  $\rho_v$  của một số điện môi rắn xốp ở trong các độ ẩm không khí khác nhau**

Tên vật liệu	Điện trở suất khối $\rho_v$ , $\Omega \cdot \text{cm}$		
	Ở độ ẩm tương đối 0% và $t = 20^\circ\text{C}$	Ở độ ẩm tương đối 70% và $t = 20^\circ\text{C}$	Ở độ ẩm tương đối 0% và $t = 100^\circ\text{C}$
Đá hoa	$10^{14} - 10^{16}$	$10^8 - 10^{10}$	$10^{12} - 10^{14}$
Gỗ	$10^{13} - 10^{14}$	$10^8 - 10^9$	$10^{12} - 10^{13}$
Phíp	$10^{13} - 10^{14}$	$10^8 - 10^9$	$10^{10} - 10^{11}$

Ở các phần trên chúng ta đã nghiên cứu điện dẫn của điện môi rắn khi cường độ điện trường thấp. Khi cường độ điện trường có trị số lớn cần tính đến khả năng xuất hiện trong tinh thể điện môi dòng điện điện tử. Dòng điện này tăng nhanh khi cường độ điện trường tăng, do đó không tuân theo định luật ôhm. Ta có công thức kinh nghiệm của Pul để tính điện dẫn điện tử theo cường độ điện trường (khi cường độ điện trường lớn hơn  $10 \div 100 \text{ kV/m}$ ).

$$\gamma' = \gamma e^{\beta E} \tag{2-42}$$

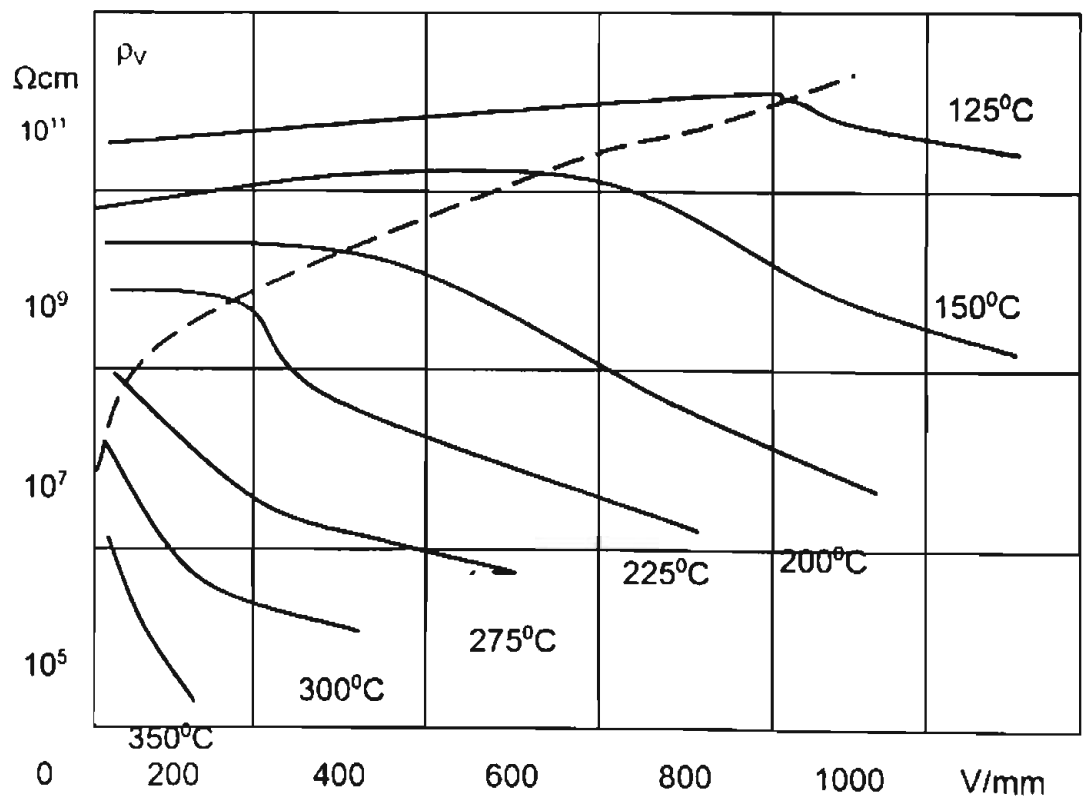
Trong đó:  $E$  - cường độ điện trường;  $\gamma$  - điện dẫn suất trong vùng không phụ thuộc vào  $E$ ;  $\beta$  - hệ số đặc trưng cho vật liệu.

Khi cường độ điện trường gần bằng trị số đánh thủng thì công thức của Frenkel có độ chính xác cao hơn:

$$\gamma' = \gamma e^{\beta_1 \sqrt{E}} \quad (2-43)$$

Khi sử dụng điện môi gồm ở nhiệt độ cao đòi hỏi phải nghiên cứu kỹ tính dẫn điện của nó không chỉ ở trong điện trường yếu mà còn phải nghiên cứu mối quan hệ độ dẫn điện theo cường độ điện trường. Thực tế, cho thấy quan hệ điện trở suất của gốm chứa titan có đặc tính hoàn toàn khác với những quan hệ tương tự của các điện môi khác như muối mỏ, thuỷ tinh. Đối với loại gốm này điện trở suất khối giảm theo thời gian. Sau khi ngắt điện áp hay đổi cực tính điện trở cách điện sẽ phục hồi lại trị số ban đầu. Sự biến đổi thuận nghịch này của điện trở suất được gọi là "sự rã". "Sự rã" không chỉ đặc trưng cho biến đổi điện trở suất theo thời gian mà còn đặc trưng cho cả biến đổi theo cường độ điện trường nữa. Trên hình 2-9 cho ta thấy rõ là ứng với mỗi nhiệt độ có thể xác lập một giá trị xác định của cường độ điện trường khi định luật Ôm bắt đầu mất hiệu nghiệm.

Khi đặt trong điện trường, điện môi gốm bị già hoá do hiện tượng điện hoá làm mất khả năng cách điện của điện môi. Sự rã làm cho các thuộc tính điện của gốm chứa titan càng trở nên xấu không hồi phục được. Điều này ta có thể giải thích bởi oxy tách khỏi mạng lưới.



Hình 2-9. Quan hệ  $\rho_v = f(E)$  ở những nhiệt độ khác nhau của gốm titan.

Oxy có khả năng có khả năng thoát ra nhiều nhất từ bề mặt và gần các chỗ khuyết tật của vật liệu như: cách tối vật liệu ở nhiệt độ cao trong môi trường khí oxy hoá.

Ở nhiệt độ bình thường, khi độ ẩm tương đối của môi trường không cao, các chi tiết làm bằng gốm có điện dẫn khác nhau, điện trở suất  $\rho_v > 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ . Nhưng khi nhiệt độ tăng cao, cần phải sử dụng loại gốm có thành phần đặc biệt.

## 2.6. ĐIỆN DẪN MẶT CỦA ĐIỆN MÔI RẮN

Điện dẫn mặt thường gây nên do bề mặt của vật liệu bị ẩm. Như đã nêu ở trên, nước có điện dẫn suất đáng kể, chỉ cần một lớp ẩm rất mỏng trên bề mặt điện môi cũng đã gây nên độ dẫn điện đáng kể. Độ điện dẫn này xác định chủ yếu bởi bề mặt dày của lớp ẩm, đồng thời còn bị ảnh hưởng bởi trạng thái bề mặt, lượng bụi bẩn, tạp chất chứa trên bề mặt ... Điện trở của lớp ẩm hấp thụ phụ thuộc nhiều vào bản chất của vật liệu nên điện dẫn mặt thường được xem như một thuộc tính của bản thân điện môi.

Sự hấp thụ hơi ẩm trên bề mặt điện môi có quan hệ chặt chẽ với độ ẩm tương đối của môi trường xung quanh. Vì thế, trị số độ ẩm tương đối là yếu tố quyết định đối với điện dẫn suất mặt của điện môi. Điện trở suất mặt thường thấy giảm rõ rệt khi độ ẩm tương đối cao hơn 60-80%.

Điện dẫn suất mặt càng thấp khi cực tính của vật liệu càng yếu, bề mặt điện môi càng sạch và nhẵn.

Theo điện dẫn mặt có thể phân tích các vật liệu thành một số nhóm:

- 1- Các điện môi không hoà tan trong nước;
- 2- Các điện môi hoà tan một phần trong nước;
- 3- Điện môi có cấu tạo xốp.

### 2.6.1. Điện môi không hoà tan trong nước

- a) Các điện môi trung tính và cực tính yếu không bị thấm nước.
- b) Các điện môi cực tính bị thấm nước.

Phân nhóm thứ nhất bao gồm có các chất: parafin, polistirol, hổ phách, lưu huỳnh; phân nhóm thứ hai bao gồm một số loại gốm.

Tất cả các vật liệu của nhóm này có đặc điểm là điện trở suất bề mặt cao, ít phụ thuộc vào độ ẩm của môi trường xung quanh. Nhưng đối với điện môi cực tính chỉ có thể nhận được điện trở suất bề mặt cao trong môi trường khi nào bề mặt của nó hoàn toàn không bẩn.

## 2.6.2. Các điện môi hoà tan một phần trong nước

Nhóm này bao gồm phần lớn các thuỷ tinh kỹ thuật. Loại vật liệu này có điện trở suất mặt thấp hơn và phụ thuộc nhiều vào độ ẩm.

## 2.6.3. Điện môi rắn có cấu tạo xốp

Loại điện môi này bao gồm các vật liệu sợi (hữu cơ và vô cơ), đá hoa, clorit hoạt thạch và đa số các chất dẻo. Do cấu tạo xốp, trong môi trường ẩm các vật liệu này có điện dẫn suất mặt lớn.

Có thể thấy rõ đặc điểm quan hệ điện trở suất mặt theo độ ẩm tương đối của môi trường xung quanh đối với vật liệu thuộc nhóm 1,2 và 3 trên hình (2-10), (2-11) và (2-12). Ảnh hưởng của độ ẩm bề mặt một số điện môi thuộc nhóm 1 và 2 đến điện trở suất mặt được nêu trên bảng 2-4.

**Bảng 2-4: Giá trị điện trở suất mặt của một số vật liệu ở độ ẩm tương đối 70%**

Tên điện môi	$\rho_S$ khi bề mặt chưa làm sạch, $\Omega$ .	$\rho_S$ sau khi làm sạch bề mặt, $\Omega$ .
- Kính cửa sổ	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{11}$
- Thạch anh nóng chảy	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{13}$
- Micaléc	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{13}$

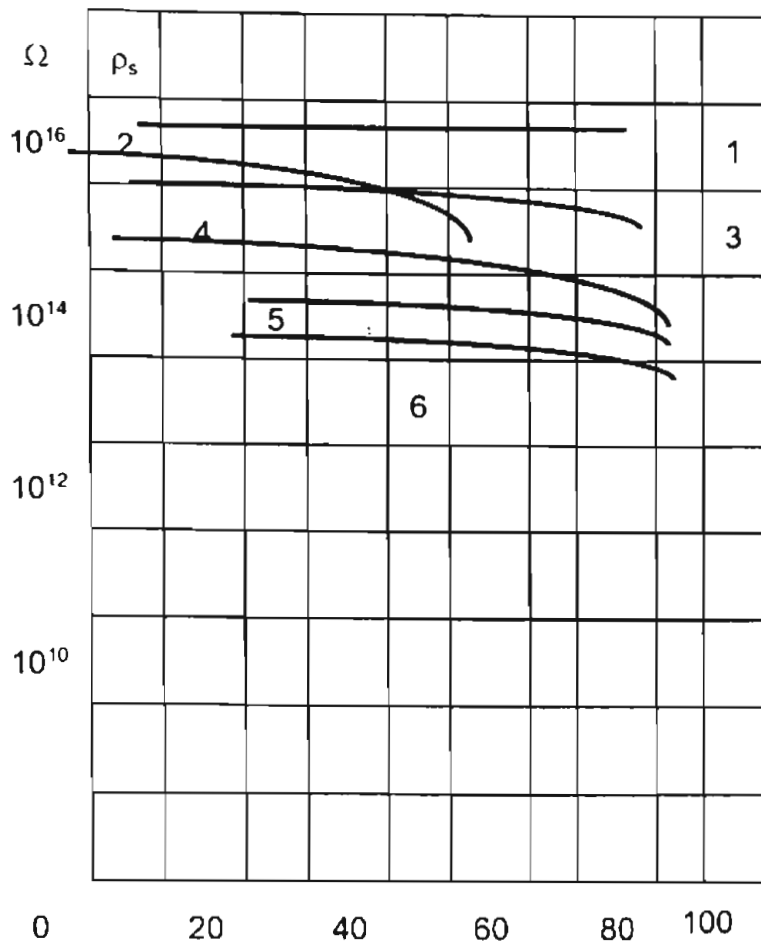
Để nâng cao điện trở suất mặt người ta dùng nhiều phương pháp khác nhau làm sạch bề mặt: rửa bằng nước, bằng các chất hoà tan, đốt nóng ở nhiệt độ 600°-700°C. Hiệu quả nhất là cách làm sạch bề mặt của vật không thấm nước bằng cách đun lâu trong nước cất.

Quét lên bề mặt của chi tiết một lớp parafin hoặc xêrêzin không bảo đảm giữ vững giá trị  $\rho_S$  ở độ ẩm cao vì hơi ẩm có thể xuyên qua lớp bảo vệ để vào các lỗ li ti trên bề mặt vật liệu. Phủ lên gốm và thuỷ tinh lớp sơn silíc hữu cơ làm tăng một cách đáng kể điện trở suất mặt của vật liệu khi đặt trong môi trường ẩm.

Để kết luận đối với hiện tượng dẫn điện bề mặt có thể nêu ra các điểm sau đây: điện dẫn suất mặt phụ thuộc vào độ ẩm là do trên bề mặt điện môi có các chất hút ẩm và phân ly thành ion. Hơi ẩm hấp phụ bởi bề mặt gây nên các chất đó.

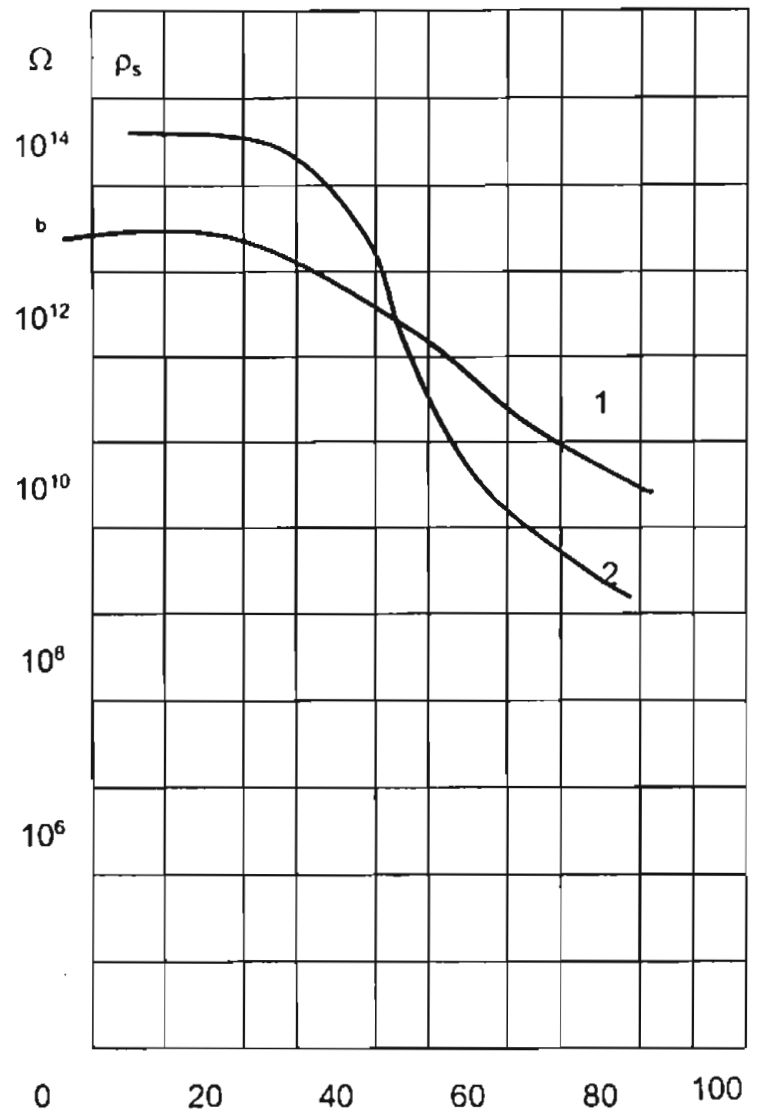
Nếu các chất này ngẫu nhiên rơi trên bề mặt của điện môi thì bằng cách lau sạch ta có thể nhận được điện trở suất mặt cao ở bất kỳ độ ẩm nào của không khí.

Nếu các chất đó thuộc thành phần của vật liệu thì điện trở suất bề mặt sẽ giảm mạnh khi độ ẩm tăng.



Hình 2-10. Quan hệ  $\rho_s = f(\varphi\%)$  của điện môi nhóm 1.

- 1- xêrêzin; 2- ôxít nhôm;  
 3- parafin; 4- micalêch;  
 5- sáp ong; 6- sáp galovac

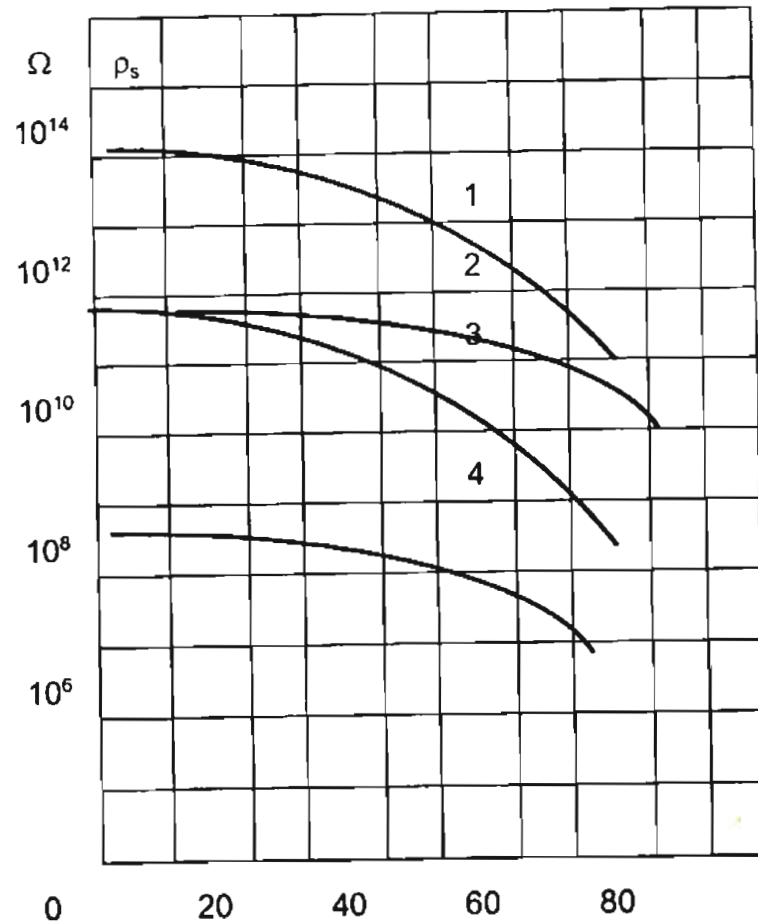


Hình 2-11. Quan hệ  $\rho_s = f(\varphi\%)$  của điện môi nhóm 2.

- 1- thủy tinh kiềm; 2- thủy tinh borát.

Hình 2-12. Quan hệ  $\rho_s = f(\varphi\%)$  đối với các điện môi có cấu tạo xốp.

- 1- chất dẻo phênôlôfôcmandêhyt;  
 2- xen lulô;  
 3- đá hoa;  
 4- đá tấm.



## Chương III

# SỰ PHÂN CỰC CỦA ĐIỆN MÔI

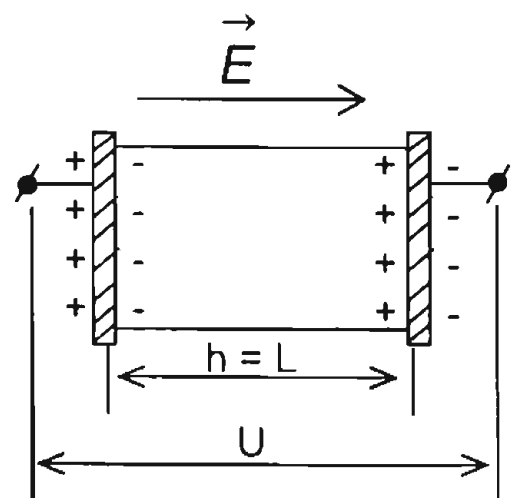
### 3.1. KHÁI NIỆM VỀ HẰNG SỐ ĐIỆN MÔI

Khi đặt điện môi vào trong điện trường  $E$  trong điện môi xảy ra quá trình phân cực: trên bề mặt điện môi phía điện cực dương ta thấy xuất hiện các điện tích âm và ngược lại trên bề mặt điện môi phía điện cực âm – xuất hiện các điện tích dương trái dấu với điện cực bên ngoài. Như vậy cả khối điện môi bị phân thành hai cực tích âm và dương tạo nên sự phân cực trong điện môi. Khi không còn điện trường bên ngoài tác động các điện tích lại quay về trạng thái ban đầu.

Trong thực tế điện môi thường được tạo nên bởi sự liên kết các phân tử và nguyên tử trung tính hay cực tính (lưỡng tính). Dưới tác dụng của điện trường các điện tích ràng buộc trong phân tử, nguyên tử điện môi sẽ bị xoay theo hướng của lực điện trường. Trong điện môi lưỡng cực khi không có điện trường, các lưỡng cực phân bố ngẫu nhiên do chuyển động nhiệt, nhưng khi có điện trường bên ngoài tác động các phân tử lưỡng cực định hướng và sắp xếp lại tương ứng theo chiều của điện trường. Chính vì vậy chúng ta có định nghĩa về sự phân cực như sau:

*Phân cực là sự chuyển dịch có giới hạn của các điện tích liên kết hoặc sự định hướng của các phân tử lưỡng cực dưới tác dụng của lực điện trường.*

Khi xảy ra phân cực thì trên bề mặt điện môi xuất hiện điện tích trái dấu với dấu của điện cực bên ngoài. Như vậy điện môi sẽ tạo thành một tụ điện với điện dung là  $C$ , điện tích của tụ điện là  $Q$  (hình 3-1).



**Hình 3-1. Sự phân bố điện tích trong chất điện môi phân cực.**



Điện tích  $Q$  của tụ điện có trị số tỷ lệ với điện áp đặt lên tụ điện và được tính bởi công thức sau:

$$Q = C.U \quad (3-1)$$

Trong đó:  $C$ : điện dung của tụ điện;  $U$ : điện áp đặt vào tụ điện.

Điện tích  $Q$  bao gồm hai thành phần:  $Q_0$  - là điện tích có ở điện cực nếu như giữa các cực là chân không và  $Q'$  - điện tích tạo nên bởi sự phân cực của điện môi:

$$Q = Q_0 + Q' \quad (3-2)$$

Một trong những đặc tính quan trọng nhất của điện môi và có ý nghĩa đặc biệt đối với kỹ thuật điện là **hằng số điện môi tương đối  $\epsilon$** . Đại lượng này là tỷ số giữa điện tích  $Q$  của tụ điện chế tạo từ loại điện môi ấy khi điện áp đặt vào có một giá trị nào đó với  $Q_0$  là điện tích của tụ điện khi điện môi là chân không.

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0} = 1 + \frac{Q'}{Q_0} \quad (3-3)$$

Từ biểu thức (3-3) ta thấy: **hằng số điện môi tương đối** của bất kỳ chất nào cũng lớn hơn một và chỉ bằng một khi điện môi là chân không.

Cần chú ý rằng giá trị hằng số điện môi của chân không phụ thuộc vào hệ đơn vị. Trong hệ CGSE nó bằng một, còn trong hệ SI bằng  $\frac{1}{36.\pi.10^9}$  F/m.

Giá trị hằng số điện môi tương đối của một chất bất kỳ không phụ thuộc vào việc chọn hệ đơn vị. Trong phần tiếp theo, chính đại lượng hằng số điện môi tương đối này được dùng ngắn gọn là: "**hằng số điện môi**" để đánh giá chất lượng của điện môi.

Từ công thức (3-1) và (3-3), ta có thể viết biểu thức dưới dạng:

$$Q = Q_0 \epsilon = CU = C_0 \epsilon U. \quad (3-4)$$

Trong đó:  $C_0$  - điện dung của tụ điện khi giữa các điện cực là chân không.

Từ công thức (3-4) ta có:

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} \quad (3-5)$$

Như vậy hằng số điện môi của một điện môi bất kỳ có thể xác định bằng tỷ số giữa điện dung tụ điện của điện môi đó với điện dung tụ điện cùng kích thước điện cực khi điện môi là chân không.

### 3.1.1. Khái niệm I: Mômen điện và cường độ phân cực

Do quá trình phân cực trên bề mặt điện môi xuất hiện các điện tích trái dấu “âm” và “dương”. Như vậy cả khối điện môi sẽ tạo nên một mômen điện  $M$ :

$$M = Q.l \quad (3-6)$$

$l$ : chiều dài của khối điện môi.

Ngoài sự phân cực điện môi còn được đặc trưng bởi véc tơ cường độ phân cực  $\vec{P}$ . Véc tơ cường độ phân cực  $\vec{P}$  được tính bằng mômen điện trong một đơn vị thể tích của điện môi và có chiều trùng với chiều của cường độ điện trường bên ngoài  $\vec{E}$

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (3-7)$$

Trong trường hợp điện môi đồng nhất, tại mọi điểm ở trong điện môi có cường độ phân cực  $P$  là như nhau. Vì vậy ta có:

$$\vec{M} = \vec{P}.V \quad (3-8)$$

$V$ : thể tích của điện môi.

### 3.1.2. Khái niệm II: Mật độ điện tích do phân cực gây nên

Trong thực tế kỹ thuật điện, điện môi không phải bao giờ cũng có bề mặt song song với điện cực như hình 3-1 mà nó rất đa dạng về hình dáng, kích thước. Xét mô hình đặc trưng của điện môi đặt trong điện trường với điện tích đáy là  $s$ , chiều cao là  $h$  và  $l$  là chiều dài khối điện môi (hình 3-2) ta có:

$$M = P.V = P.Sh = P.S.l.\cos\theta. \quad (3-9)$$

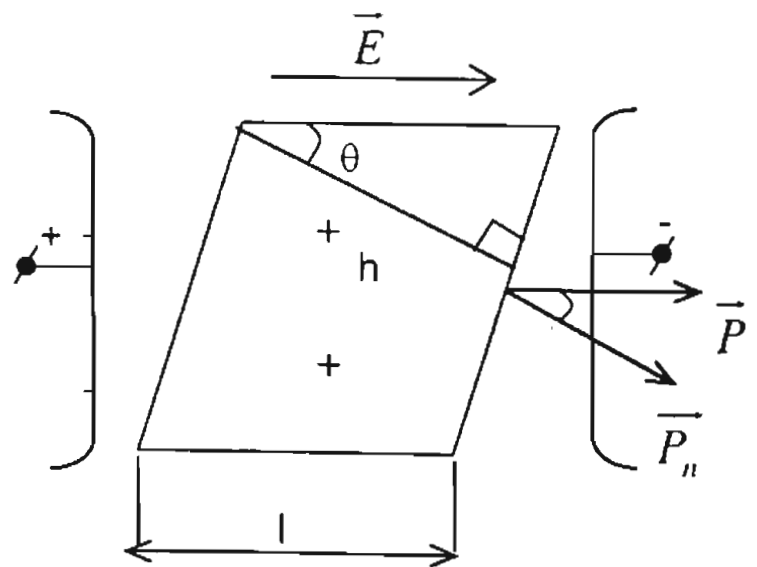
Mặt khác:

$$M = Q.l = \delta.S.l \quad (3-10)$$

Trong đó:  $Q$  - điện tích và  $\delta$  - là mật độ điện tích trên bề mặt điện môi do phân cực gây nên.

Từ công thức (3-9) và (3-10) suy ra:

$$\delta = P.\cos\theta = P_{\parallel} \quad (3-11)$$



Hình 3-2. Sự phân bố điện tích trong điện môi có kích thước bất kỳ.

Như vậy: *Mật độ điện tích trên bề mặt điện môi do phân cực gây nên có trị số bằng thành phần pháp tuyến của véc tơ cường độ phân cực "P"*.

### 3.1.3. Khái niệm III: Sự tương quan giữa hằng số điện môi $\epsilon$ và cường độ phân cực $\vec{P}$

Để xây dựng sự tương quan giữa hằng số điện môi và cường độ phân cực  $\vec{P}$  ta dựa vào phương trình Mắcxoen:

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} \\ \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \end{cases} \quad (3-12)$$

Trong đó:  $\vec{D}$  - véc tơ cảm ứng điện;  $\vec{E}$  - cường độ điện trường bên ngoài do điện áp gây nên giữa hai điện cực. Khi hai cực song song với nhau và cách nhau một khoảng  $l$  thì  $E = \frac{U}{l}$  [kV/cm].

Từ (3-12) ta có:

$$\epsilon_0 \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} .$$

Suy ra:

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon - 1) \vec{E} \quad (3-13)$$

Như vậy: *véc tơ cường độ phân cực  $\vec{P}$  có chiều cùng với chiều của điện trường bên ngoài. Về trị số cường độ phân cực P phụ thuộc vào hằng số điện môi  $\epsilon$  và cường độ điện trường bên ngoài E.*

Mặt khác, từ công thức (3-13) ta có mối quan hệ giữa  $\epsilon$  và P như sau:

$$\epsilon = 1 + \frac{\vec{P}}{\epsilon_0 \vec{E}} \quad (3-14)$$

Công thức (3-14) được dùng để xác định hằng số điện môi và là công thức chung để nghiên cứu lý thuyết về sự phân cực.

### 3.1.4. Khái niệm IV: Hệ số phân cực

Mỗi một phân tử của điện môi cực tính được đặc trưng bởi mômen lưỡng cực  $\vec{m}_i$  ( $m_i = qa$ ). Khi không có điện trường bên ngoài tác động, các mômen điện của các phân tử sắp xếp ngẫu nhiên nên tổng các mômen  $\vec{m}_i$  có trị số bằng không

( $\sum_{i=1}^n \vec{m}_i = 0$ ). Khi có điện trường bên ngoài " $\vec{E}$ " tác động các mômen này sắp xếp

lại theo chiều tác dụng của điện trường, nên:  $\sum_{i=1}^n \vec{m}_i \neq 0$ . Do vậy bên trong điện

môi sẽ có một điện trường  $\vec{E}_{dm}$  khác với điện trường bên ngoài  $\vec{E}$ .

**Mômen điện trung bình** của mỗi phân tử tỷ lệ với điện trường tác động lên nó và được xác định bởi công thức sau:

$$\vec{m}_{tb} = \alpha \cdot \vec{E}_{dm} \quad (3-15)$$

Trong đó:  $\alpha$  - được gọi là **hệ số phân cực điện môi**, nó đặc trưng cho khả năng phân cực của các phân tử có mômen điện và có đơn vị là  $[F.m^2]$ .

Vì véc tơ cường độ phân cực  $\vec{P}$  là tổng các mômen điện của tất cả các phân tử trong một đơn vị thể tích nên ta có:

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^N \vec{m}_i = N \cdot \alpha \cdot \vec{E}_{dm} \quad (3-16)$$

$N$  - mật độ phân tử của điện môi.

Công thức (3-14) được viết ở dạng cụ thể như sau:

$$\epsilon = 1 + \frac{N\alpha \vec{E}_{dm}}{\epsilon_0 \vec{E}} \quad (3-17)$$

Như vậy, để xác định hằng số điện môi của vật liệu ta cần tính mômen điện trung bình của các phân tử hay tìm hệ số phân cực  $\alpha$  và điện trường bên trong điện môi khi có điện trường  $E$  bên ngoài tác động.

### 3.2. CÁC DẠNG VÀ LOẠI PHÂN CỰC XẢY RA TRONG ĐIỆN MÔI

Khi nghiên cứu hiện tượng phân cực trong điện môi ta cần chú ý tới đặc điểm và thành phần cấu tạo của điện môi đó.

Dựa vào thời gian xác lập phân cực mà người ta chia phân cực ra thành hai dạng chính, đó là **phân cực nhanh** và **phân cực chậm**.

+ Đặc điểm của **phân cực nhanh** là xảy ra trong một thời gian rất ngắn khi điện môi bị tác dụng của điện trường bên ngoài (khoảng  $10^{-12} \div 10^{-15}$  giây); đàn hồi hoàn toàn và không sinh ra tổn hao điện môi (không phát sinh ra nhiệt). Trong kỹ thuật điện các điện môi có phân cực nhanh được biểu diễn bằng một tụ điện điện

dung là C. Phân cực nhanh có hai loại, đó là phân cực điện tử nhanh và phân cực ion nhanh.

+ **Phân cực chậm** xảy ra một cách chậm chạp, thời gian phân cực lớn hơn  $10^{-10}$  giây, có thể đến hàng phút, hàng giờ và nhiều giờ. Dạng phân cực chậm có phát sinh ra tổn hao điện môi, do vậy, sơ đồ thay thế điện môi biểu diễn bằng một tụ điện "C" mắc nối tiếp với một điện trở "R". Trong dạng phân cực chậm có 5 loại phân cực chính sau đây: phân cực lưỡng cực, phân cực điện tử chậm, phân cực ion chậm, phân cực kết cấu và phân cực tự phát. Như vậy, dựa theo các loại phân tử tích điện tham gia vào quá trình phân cực mà ta phân thành 7 loại phân cực khác nhau.

### 3.2.1. Phân cực điện tử nhanh

Phân cực điện tử nhanh do sự chuyển dịch đàn hồi và sự biến dạng các lớp vỏ điện tử của phân tử dưới tác dụng của điện trường bên ngoài. Ở trạng thái bình thường trọng tâm của các điện tích âm và dương trùng nhau, nhưng khi có điện trường bên ngoài tác động các điện tử sẽ dịch chuyển trong một giới hạn nào đó (tùy theo trị số của cường độ điện trường) làm cho trọng tâm điện tích âm của các điện tử ở vị trí khác. Khi không có điện trường bên ngoài tác động chúng lại trở về vị trí ban đầu. Thời gian xác lập phân cực điện tử bé không đáng kể, khoảng  $10^{-14} \div 10^{-15}$  giây. Do vậy phân cực điện tử nhanh được gọi là phân cực tức thời và không sinh ra tổn hao điện môi.

Phân cực điện tử nhanh tồn tại ở tất cả các loại điện môi và không liên quan tới tổn hao năng lượng. Sơ đồ thay thế điện môi được biểu diễn bằng một điện dung ký hiệu là  $C_{\text{cnh}}$ .

Hệ số phân cực điện tử nhanh  $\alpha_{\text{cnh}}$  phụ thuộc vào bán kính phân tử  $R_0$ , được đặc tính bằng công thức sau:

$$\alpha_{\text{cnh}} = 4\pi\epsilon_0 R_0^3 \quad (3-18)$$

Như vậy, bán kính phân tử càng tăng thì hệ số phân cực  $\alpha_{\text{cnh}}$  càng lớn.

**Cần chú ý rằng:** đại lượng hằng số điện môi của các chất điện môi phân cực điện tử nhanh có trị số bằng bình phương hệ số khúc xạ ánh sáng ( $\epsilon \approx v^2$ ).

### 3.2.2. Phân cực ion nhanh

Phân cực ion nhanh đặc trưng cho những điện môi có cấu tạo ion và được xác định bởi sự dịch chuyển đàn hồi giữa các ion liên kết dưới tác dụng của điện trường bên ngoài. Khi điện môi nằm trong điện trường các ion dương sẽ dịch chuyển theo chiều của điện trường, còn các ion âm dịch chuyển theo chiều ngược lại, khoảng

cách giữa các ion thay đổi so với khi không có điện trường và làm cho mômen điện của phân tử thay đổi. Hệ số phân cực ion nhanh được xác định bằng công thức sau:

$$\alpha_{inh} = 4\pi\epsilon_0 \left(\frac{a}{2}\right)^3 \quad (3-19)$$

Trong đó:  $a$  là khoảng cách giữa các ion dương và âm khi cường độ điện trường  $E = 0$ .

Khi nhiệt độ tăng điện môi có sự giãn nở nhiệt, khoảng cách giữa các ion tăng lên và lực liên kết giữa các ion sẽ giảm, do vậy phân cực ion sẽ tăng lên. Trong phần lớn các trường hợp, hệ số nhiệt của hằng số điện môi ( $TK_\epsilon$ ) là dương. Thời gian xác lập phân cực của phân cực ion nhanh khoảng  $10^{-13} - 10^{-14}$  giây tùy theo kích thước của liên kết phân tử ion. Loại phân cực này cũng không sinh ra tổn hao điện môi, nên sơ đồ thay thế điện môi bằng một tụ điện với điện dung là  $C_{inh}$ .

### 3.2.3. Phân cực lưỡng cực chậm

Phân cực lưỡng cực chậm xảy ra trong các điện môi cực tính, phân tử của các điện môi này là các phân tử cực tính với mômen điện  $\vec{m}_i$ . Các phân tử cực tính luôn ở trạng thái chuyển động nhiệt. Khi chưa có điện trường bên ngoài tác động những phân tử cực tính sắp xếp hỗn loạn không theo một thứ tự nào, do đó tổng các mômen điện của khối điện môi tính cho một hướng nào đó có trị số bằng "0":

$$\vec{M} = \sum_{i=1}^N \vec{m}_i = 0$$

Nếu đặt điện môi vào trong điện trường  $E$ , các phân tử lưỡng cực sẽ định hướng lại theo chiều tác dụng của điện trường. Khi đó tổng các mômen điện của khối điện môi có trị số khác "0":

$$\vec{M} = \sum_{i=1}^N \vec{m}_i \neq 0$$

Sự xoay hướng của các phân tử lưỡng cực theo hướng điện trường đòi hỏi phải khắc phục một số trở lực, do đó cần phải có thời gian và tổn hao năng lượng. Sơ đồ thay thế điện môi biểu diễn bằng một tụ điện ( $C_{lc}$ ) mắc nối tiếp với một điện trở  $R_{lc}$ .

Thời gian xác lập phân cực lưỡng cực trong điện môi phụ thuộc vào nhiều yếu tố, đó là: kích thước phân tử, kết cấu phân tử, nhiệt độ, tần số điện trường, trị số cường độ điện trường, trạng thái của điện môi (khí, lỏng, rắn) v.v... Thường thì phân cực lưỡng cực xảy ra lớn hơn  $10^{-12}$  giây và có thể đến hàng phút. Do vậy, khi

xác định điện trở cách điện hay các tham số khác của điện môi người ta thường đo sau một phút khi phân cực đã ổn định.

Trong điện môi nói chung và điện môi cực tính nói riêng, khi bị phân cực có sự sắp xếp lại điện tích làm cho cường độ điện trường bên trong điện môi có trị số khác với cường độ điện trường bên ngoài. Hệ số phân cực lưỡng cực  $\alpha_{lc}$  phụ thuộc vào mômen lưỡng cực các phân tử cực tính ( $m_0$ ) và phụ thuộc vào nhiệt độ:

$$\alpha_{lc} = \frac{m_0^2}{3KT}$$

Trong đó:  $m_0$  - là mômen lưỡng cực trung bình; K- là hằng số Bônzomal; T- nhiệt độ tuyệt đối °K.

### 3.2.4. Phân cực điện tử chậm

Phân cực điện tử chậm xuất hiện do các điện tử “khuyết tật” thừa hoặc lỗ trống được kích thích bởi nhiệt năng trong điện môi có chứa các khuyết tật.

Phân cực điện tử chậm đặc trưng chủ yếu cho các điện môi có hệ số khúc xạ cao, trường bên trong lớn hơn và có tính dẫn điện điện tử: bioxyt titan có lẫn tạp chất  $Nb^{+5}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Ba^{+2}$ , biôxyt than có khuyết tật anion và tạp chất  $Ti^{+3}$ , một số hợp chất trên cơ sở oxyt kim loại có hoá trị biến đổi như titan, miobi, bítsmút.

Một điều đáng chú ý là hằng số điện môi của các điện môi phân cực điện tử chậm phụ thuộc vào nhiệt độ và có một vài điểm cực đại thậm chí cả khi nhiệt độ âm.

Phân cực điện tử chậm có sinh ra tổn hao điện môi, nên sơ đồ thay thế được biểu diễn bằng điện dung  $C_{cch}$  và điện trở  $R_{cch}$  mắc nối tiếp với nhau.

### 3.2.5. Phân cực ion chậm

Phân cực ion chậm xảy ra trong thủy tinh vô cơ và một số chất vô cơ có liên kết ion không bền vững. Trong trường hợp này các ion liên kết yếu ở chuyển động nhiệt còn nhận thêm các chuyển dịch thừa theo hướng tác dụng của điện trường bên ngoài. Sau khi loại bỏ điện trường, sự định hướng của các ion yếu dần theo quy luật hàm số mũ.

Hằng số thời gian phân cực phụ thuộc vào năng lượng kích thích W và tần số dao động nhiệt f theo công thức sau:

$$T_0 = \frac{1}{2f} e^{\frac{W}{kT}} \text{ (s)}$$

Sự phân cực ion chậm tăng lên khi nhiệt độ tăng. Loại phân cực ion chậm có sinh ra tổn hao điện môi nên sơ đồ thay thế điện môi biểu diễn bằng một tụ điện  $C_{ich}$  mắc nối tiếp với điện trở  $R_{ich}$ .

### 3.2.6. Phân cực kết cấu

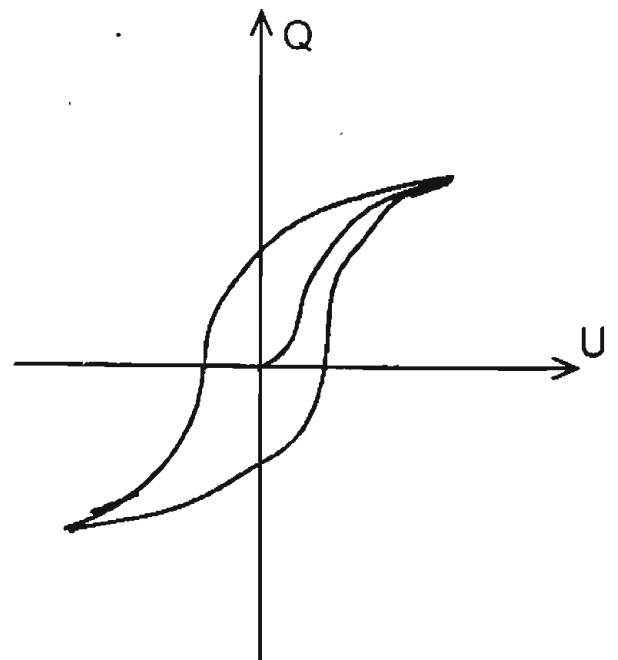
Phân cực kết cấu xảy ra trong các chất rắn có cấu tạo không đồng nhất khi độ không đồng nhất có tính chất vĩ mô hay khi có tạp chất. Loại phân cực này thấy rõ nhất ở biên giới giữa các chất khác nhau. Bản chất của phân cực kết cấu là sự dịch chuyển của những ion liên kết yếu dưới tác dụng của điện trường bên ngoài, tạo thành lớp điện tích không gian trên ranh giới tiếp xúc giữa các miền khác nhau. Nguyên nhân của sự phân cực này là do các chất dẫn điện và bán dẫn lẫn trong điện môi kỹ thuật hay sự tồn tại các lớp có độ điện dẫn khác nhau.v.v...

Loại phân cực kết cấu này biểu hiện ở tần số thấp và kèm theo sự phát tán năng lượng điện đáng kể. Do vậy, sơ đồ thay thế điện môi cũng được biểu diễn bằng một tụ điện  $C_{KC}$  mắc nối tiếp với điện trở  $R_{KC}$ .

Khi đặt vật liệu không đồng nhất dưới điện trường, các điện tử tự do và ion của các tạp chất dẫn và bán dẫn dịch chuyển trong phạm vi của từng chất, tạo thành vùng phân cực rộng lớn. Ở ranh giới giữa các lớp của vật liệu nhiều lớp và trong lớp tiếp xúc với các điện cực có thể tích lũy điện tích của các ion chuyển động chậm tạo nên hiện tượng gọi là hiệu ứng giữa các lớp hoặc phân cực kết cấu cao áp. Loại phân cực kết cấu xảy ra trong thời gian dài có thể đến hàng giờ và nhiều giờ.

### 3.2.7. Phân cực tự phát

Phân cực tự phát là dạng phân cực đặc biệt tồn tại trong các điện môi xét-nhét, các điện môi có từ tính mà quan hệ giữa điện tích  $Q$  và điện áp  $U$  có đường cong từ trễ (hình 3-3). Bản thân các điện môi này đã có sẵn những vùng phân cực tự nhiên (giống như các vĩa đá trên núi). Khi không có điện trường bên ngoài tác động, tổng trở các mômen điện của các vùng ( $\vec{M}_i$ ) có trị số bằng không ( $\sum_{i=1}^N \vec{M}_i = 0$ ). Nhưng



Hình 3-3. Chu trình từ trễ đối với bari metatitanat.

khi có điện trường bên ngoài tác động những mômen điện của các vùng riêng biệt sẽ sắp xếp lại theo chiều tác dụng của điện trường nên ta

có:  $\sum_{i=1}^N \vec{M}_i \neq 0$ .



Do phân cực lại cả vùng (đômen) theo chiều của điện trường nên loại phân cực tự phát cần phải có thời gian và năng lượng lớn. Chính vì vậy phân cực tự phát sinh ra tổn hao điện môi lớn. Sơ đồ thay thế điện môi cũng được biểu diễn bằng một tụ điện  $C_p$  mắc nối tiếp với điện trở  $R_p$ .

Trong các điện môi có phân cực tự phát, điện trường bên ngoài tạo nên sự ưu tiên định hướng các mômen điện của các đômen theo chiều của trường, do đó gây ra hiệu ứng phân cực mạnh. Khác với các dạng phân cực khác, ở một giá trị nào đó của cường độ điện trường ngoài sẽ xuất hiện hiện tượng bão hoà, nhưng sau đó tiếp tục tăng mạnh điện trường thì cường độ phân cực vẫn không tăng nữa.

Trong thực tế kỹ thuật điện, trị số điện dung tụ điện của điện môi và điện tích của nó chịu ảnh hưởng chung của các loại phân cực khác nhau. Một số loại phân cực có thể thấy ở nhiều điện môi khác nhau, một số loại phân cực cũng có thể có đồng thời ở cùng một loại vật liệu. Như vậy, một loại vật liệu có thể có cùng một số loại phân cực trong tổ hợp của 7 loại phân cực nói trên.

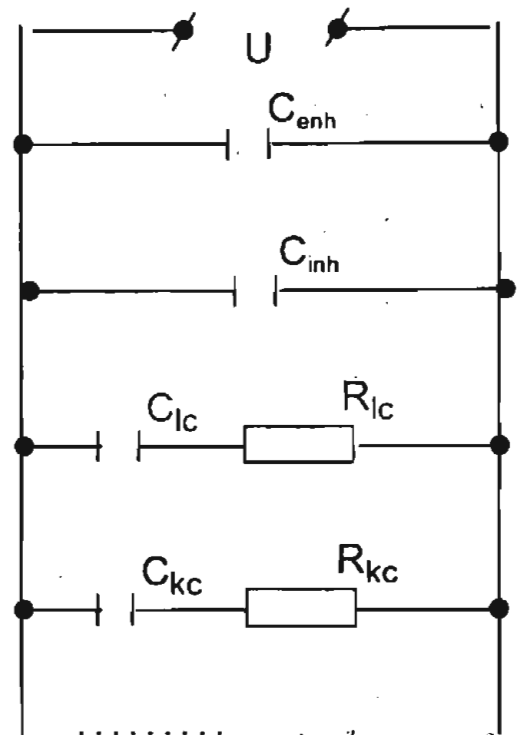
Sơ đồ đẳng trị của điện môi mà trong đó có các loại phân cực khác nhau là một loạt tụ điện và điện trở mắc song song với nguồn điện áp  $U$  được biểu diễn trên hình 3-4.

### 3.3. PHÂN LOẠI ĐIỆN MÔI THEO DẠNG PHÂN CỰC

Các đặc tính phân cực cho phép chia điện môi ra thành một số nhóm đặc trưng sau đây:

\* **Nhóm thứ nhất:** Bao gồm các điện môi chủ yếu chỉ có loại phân cực điện tử nhanh. Trong nhóm này có các chất trung tính ở trạng thái khí, lỏng và rắn. Ngoài ra còn có một số chất cực tính yếu có cấu trúc tinh thể, cấu trúc không định hình hay các dạng khác. Ví dụ: paraffin, lưu huỳnh, polystirol, benzen, hydro, dầu máy biến áp, dầu tụ điện v.v...

\* **Nhóm thứ hai:** Gồm các điện môi có phân cực điện tử nhanh và phân cực lưỡng cực chậm. Loại này gồm các chất hữu cơ cực tính ở trạng thái lỏng, nửa lỏng và rắn. Ví dụ như hỗn hợp dầu côlôfan, êpôcxi, xenlulô, hydro cacbon bị clohoá, v.v...



**Hình 3-4.** Sơ đồ đẳng trị của điện môi có thành phần phức tạp với các cơ chế phân cực khác nhau.

\* **Nhóm thứ ba:** Gồm các điện môi rắn vô cơ có phân cực điện tử và ion nhanh, phân cực điện tử và ion chậm. Trong nhóm này nên tách ra làm hai phân nhóm vật liệu do đặc tính điện của chúng khác nhau:

Điện môi có phân cực điện tử và ion nhanh.

Điện môi có phân cực điện tử và ion cả nhanh lẫn chậm.

**Nhóm a:** Gồm chủ yếu các chất tinh thể có các ion ràng buộc chặt chẽ, ví dụ như thạch anh, corundum, mica, bột đá mài, muối mỏ, kim cương, rutil v.v...

**Nhóm b:** Gồm có thủy tinh vô cơ, vật liệu sứ, micaléch và các điện môi có cấu tạo tinh thể ràng buộc yếu.

**Nhóm thứ tư:** Gồm điện môi xéc-nhét được đặc trưng bởi phân cực tự phát, phân cực điện tử và ion nhanh, phân cực điện tử chậm, ví dụ: muối xéc-nhét, titanat-bari, các chất có từ tính v.v...

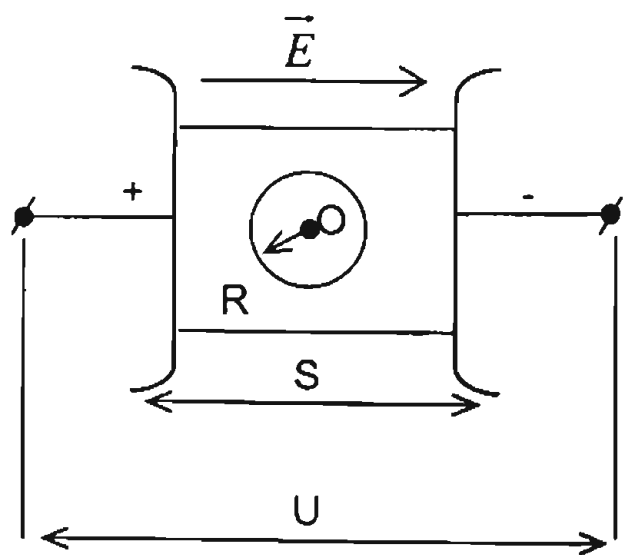
Sự phân loại điện môi nói trên cho phép ở một mức độ nào đó xác định được các thuộc tính cơ bản về điện của vật liệu trong các phần nghiên cứu tiếp theo.

### 3.4. ĐIỆN TRƯỜNG CỤC BỘ BÊN TRONG ĐIỆN MÔI.

#### PHƯƠNG TRÌNH CLAUDIÚT – MÔXỐTCHI

Khi ở trong điện trường  $E$  các phân tử điện môi bị tác động của lực điện trường bên trong điện môi có sự sắp xếp lại điện tích và xảy ra quá trình phân cực. Do có quá trình phân cực mà điện trường bên trong điện môi có trị số khác với trị số điện trường bên ngoài.

**Điện trường cục bộ là điện trường thực tế tác động đến điện môi tại một điểm nào đó bên trong điện môi.** Điện trường này được tính như là tổng điện trường bên ngoài và điện trường được tạo nên bởi các điện tích của các phân tử bên cạnh tác động đến điểm đang xem xét. Nếu khoảng cách giữa các phân tử lớn, lực liên kết giữa các phân tử yếu thì cường độ điện trường cục bộ bên trong điện môi có trị số xấp xỉ bằng với cường độ điện trường bên ngoài (ví dụ như các chất khí). Điện trường cục bộ bên trong các điện môi lỏng và rắn cực tính mạnh có trị số lớn hơn nhiều so với cường độ điện trường bên ngoài.



Hình 3-5. Tính cường độ điện trường cục bộ khi điện môi nằm trong điện trường đồng nhất.

Để chứng minh cho các vấn đề nêu ra ở trên, chúng ta đi tính cường độ điện trường cục bộ trong điện môi ( $E_{dm}$ ) tại điểm “0” khi điện môi nằm trong điện trường đồng nhất (hình 3-5).

Điện trường đồng nhất là điện trường được tạo nên giữa hai cực phẳng đặt song song với nhau và tại mọi điểm cường độ điện trường có trị số bằng nhau. Điện trường này ta gọi là điện trường bên ngoài, nó có trị số bằng tỷ số giữa điện áp  $U$  đặt vào hai cực chia cho khoảng cách giữa hai cực “ $S$ ”:

$$E = \frac{U}{S} [V/mm]$$

Để tính cường độ điện trường tác động lên phân tử điện môi tại điểm “0”, ta hình dung cắt điện môi bằng một mặt cầu tâm  $O$  với bán kính  $R$  lớn hơn hoặc bằng 100 lần bán kính phân tử điện môi  $r$  (hình 3-5). Khi đó cường độ điện trường cục bộ bên trong điện môi tại tâm  $O$  được tính như sau:

$$\vec{E}_{dm} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 \quad (3-20)$$

Trong đó:

$\vec{E}_1$  - Cường độ điện trường bên ngoài do điện áp gây nên có chiều trùng với chiều của điện trường bên ngoài. Về trị số:  $\vec{E}_1 = E = \frac{U}{S} (V/mm)$ .

$\vec{E}_2$  - Là cường độ điện trường do các điện tích bên ngoài mặt cầu gây nên tại tâm  $O$  (lúc này ta coi quả cầu là rỗng).

$\vec{E}_3$  - Là cường độ điện trường được tạo nên tại  $O$  bởi các điện tích bên trong mặt cầu (cầu đặc).

Bài toán đặt ra là phải tính  $E_2$  và  $E_3$  khi cầu rỗng và cầu đặc.

### 3.4.1. Tính cường độ điện trường $E_2$

Cường độ điện trường  $E_2$  được tạo nên bởi các điện tích bên ngoài mặt cầu do phân cực gây nên. Nếu gọi  $\sigma$  là mật độ điện tích do phân cực gây nên ở mặt cầu. Theo công thức (3-11) (ở mục 3-1 chương III) ta có:

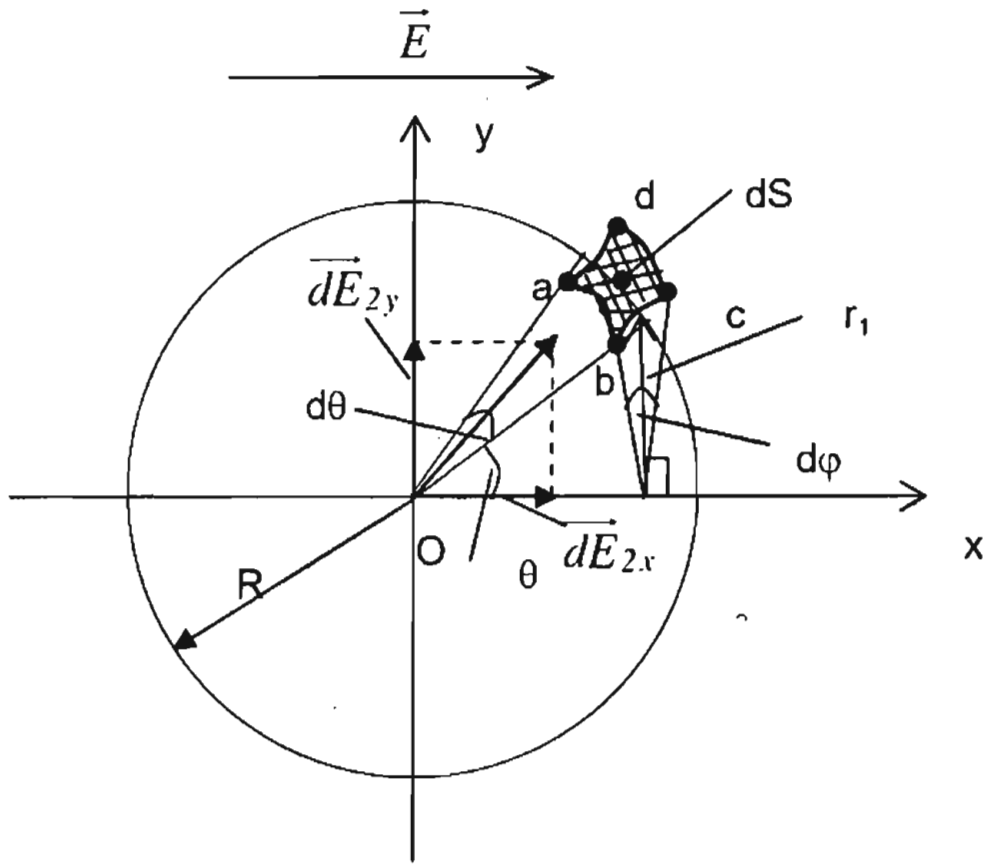
$$\sigma = Pn = P \cdot \cos\theta.$$

Cần chú ý rằng: ở các vị trí khác nhau trên mặt cầu thì góc  $\theta$  có các trị số khác nhau.

Để tính cường độ điện trường  $E_2$ , ta đi tính  $dE_2$  được tạo nên bởi điện tích  $dQ$  trên một đơn vị diện tích  $dS$  (hình 3-6)

Ta có:

$$dQ = \sigma \cdot dS = P \cdot \cos\theta \cdot dS \quad (3-21)$$



Hình 3-6. Tính cường độ điện trường  $E_2$ .

Do vi phân nhỏ nên diện tích  $dS$  có thể coi như là một hình vuông  $abcd$ . Cho nên có thể tính  $dS$  như sau:

$$dS = ab \cdot bc = R d\theta \cdot r_1 d\phi$$

Mặt khác:  $r_1 = R \cdot \sin \theta$ , do đó ta có:

$$dS = R^2 \cdot \sin\theta d\theta \cdot d\phi \quad (3-22)$$

Từ (3-21) và (3-22) suy ra:

$$dQ = R^2 \cdot P \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta d\phi \quad (3-23)$$

Cường độ điện trường  $dE_2$  xác định theo công thức sau:

$$dE_2 = \frac{dQ}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{P}{4\pi\epsilon_0} \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (3-24)$$

Chúng ta phân tích  $\vec{dE}_2$  thành 2 thành phần:  $d\vec{E}_{2x}$  - theo phương của điện trường bên ngoài và  $d\vec{E}_{2y}$  - vuông góc với phương của điện trường bên ngoài (hình 3-6).

$$d\vec{E}_2 = d\vec{E}_{2x} + d\vec{E}_{2y} \quad (3-25)$$

Do góc  $d\theta$  rất nhỏ nên đặt  $\theta + \frac{1}{2}d\theta \approx \theta$ . Theo (hình 3-6) ta có:

$$dE_{2x} = dE_2 \cdot \cos\theta = \frac{P}{4\pi\epsilon_0} \cdot \cos^2\theta \cdot \sin\theta d\theta d\varphi.$$

$$dE_{2y} = dE_2 \cdot \sin\theta = \frac{P}{4\pi\epsilon_0} \cdot \sin^2\theta \cdot \cos\theta d\theta d\varphi.$$

Để tính  $E_2$  ta lấy tích phân  $dE_2$  theo toàn bộ mặt cầu tức là lấy giới hạn của  $d\theta = 0 \div \pi$  và của  $d\varphi = 0 \div 2\pi$ . Như vậy ta có:

$$\begin{aligned} E_2 &= \int_0^\pi \frac{P}{4\pi\epsilon_0} \cos^2\theta \cdot \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi + \int_0^\pi \frac{P}{4\pi\epsilon_0} \sin^2\theta \cdot \cos\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \\ &= \frac{-P}{4\pi\epsilon_0} \frac{\cos^3\theta}{3} \Big|_0^\pi \cdot \varphi \Big|_0^{2\pi} + \frac{P}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sin^3\theta}{3} \Big|_0^\pi \cdot \varphi \Big|_0^{2\pi} = \frac{P}{3\epsilon_0} \end{aligned}$$

Theo công thức (3-13):  $\vec{P} = \epsilon_0(\epsilon - 1)\vec{E}$ . Do vậy:

$$\vec{E}_2 = \frac{\vec{P}}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon - 1}{3} \vec{E} \quad (3-26)$$

Qua công thức (3-26) ta thấy cường độ điện trường  $E_2$  phụ thuộc vào cường độ điện trường bên ngoài và phụ thuộc vào hằng số điện môi của điện môi đó (bản chất của điện môi).

### 3.4.2. Tính cường độ điện trường $E_3$

Khi tính cường độ điện trường  $E_3$  cần lưu ý rằng cường độ điện trường này là do các phân tử lưỡng cực rời rạc ở bên trong hình cầu gây nên tại tâm 0. Việc tính toán điện trường này rất phức tạp. Điện trường này phụ thuộc vào cấu trúc phân tử, loại phân tử và vị trí tâm 0 của điện môi.

Trong trường hợp đơn giản  $E_3 \approx 0$  ứng với các điện môi sau: các điện môi khí, lỏng, rắn, trung tính hay cực tính yếu, các chất có liên kết vanderwaals yếu, các chất có cấu trúc tinh thể đối xứng v.v... Khi đó:

$$\vec{E}_{dm} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 = \vec{E} + \frac{\varepsilon - 1}{3} \vec{E} \neq 0$$

Suy ra: 
$$\vec{E}_{dm} = \frac{\varepsilon + 2}{3} \vec{E} \quad (3-27)$$

Mặt khác từ công thức (3-17) ta có:

$$\varepsilon = 1 + \frac{N\alpha E_{dm}}{3E}$$

Thay giá trị của (3-27) vào công thức (3-17) ở trên, sau khi biến đổi ta được:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{N\alpha}{3\varepsilon_0} \quad (3-28)$$

Công thức (3-28) chính là phương trình Claudiut-Môxôtchi để tính hằng số điện môi của các điện môi trung tính hay cực tính yếu, hoặc điện môi có cấu trúc tinh thể đối xứng (khi  $E_3 = 0$ ).

Nếu ta nhân hai vế của phương trình (3-28) với  $\frac{M}{D}$  ( $M$  là phân tử gam và  $D$  khối lượng riêng của điện môi), ta nhận được trị số cường độ phân cực của điện môi:

$$\frac{M}{D} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{M}{D} \cdot \frac{N\alpha}{3\varepsilon_0} = \frac{N_A \cdot \alpha}{3\varepsilon_0} = P \quad (3-29)$$

Trong đó:  $N_A$ - trị số Avôgadrô.

Công thức (3-29) dùng để xác định cường độ phân cực của điện môi khi biết  $M$ ,  $D$  và hằng số điện môi  $\varepsilon$ .

Đối với những điện môi cực tính mạnh, các phân tử có mômen lưỡng cực  $m_0$ , cường độ điện trường  $E_3 \neq 0$ . Có nhiều tác giả đưa ra các công thức tính  $E_3$  cho một số điện môi cụ thể, ví dụ như Dêbai, Kirvút, Onsajer ... Các công thức mà các tác giả đưa ra đều có tính chất gần đúng. Do vậy, khi tính hằng số điện môi của điện môi cực tính với hệ số phân cực  $\alpha_{lc} = \frac{m_0^2}{3kT}$  phương trình Claudiút-Môxôtchi có thể

viết dưới dạng như sau:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{N}{3\varepsilon_0} \left( \alpha + \frac{m_0^2}{3kT} \right), \quad (3-30)$$

Trong đó:  $\alpha$ - là hệ số phân cực điện tử và ion nhanh.

Tóm lại, khi nghiên cứu hằng số điện môi của một điện môi nào đó ta thường dựa vào công thức (3-28) và (3-30) để xem xét.

### 3.5. HẰNG SỐ ĐIỆN MÔI CỦA CHẤT KHÍ

Các chất khí có mật độ phân tử rất nhỏ so với chất lỏng và rắn. Khoảng cách giữa các phân tử khí lớn hơn nhiều so với bán kính của chúng. Do vậy, lực tương tác giữa các phân tử khí không đáng kể và hằng số điện môi của chất khí có trị số gần đúng bằng một. Ví dụ, hằng số điện môi của không khí khi đo ở nhiệt độ  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , áp suất  $p = 1\text{at}$  có trị số  $\epsilon_{kk} = 1,00058$ .

#### 3.5.1. Hằng số điện môi của điện môi khí trung tính

Trong các điện môi khí trung tính chỉ tồn tại một loại phân cực đó là phân cực điện tử nhanh. Do đó, hệ số phân cực  $\alpha = \alpha_{\text{cnh}}$  và phương trình Claudiút – Môxốtchi có thể viết:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{N\alpha_{\text{cnh}}}{3\epsilon_0}.$$

Vì  $\epsilon \approx 1$  nên phương trình trên có thể rút gọn như sau:

$$\epsilon = 1 + \frac{N\alpha_{\text{cnh}}}{\epsilon_0} \quad (3-31)$$

Hệ số phân cực  $\alpha_{\text{cnh}} = 4\pi\epsilon_0 \cdot R^3 = 10^{-24} [\text{cm}^3]$ .

Do chỉ có phân cực điện tử nhanh nên hằng số điện môi của các điện môi khí trung tính có trị số xấp xỉ bằng bình phương hệ số khúc xạ ánh sáng của chất khí đó  $\epsilon \approx v^2$ .

Từ đó ta có:

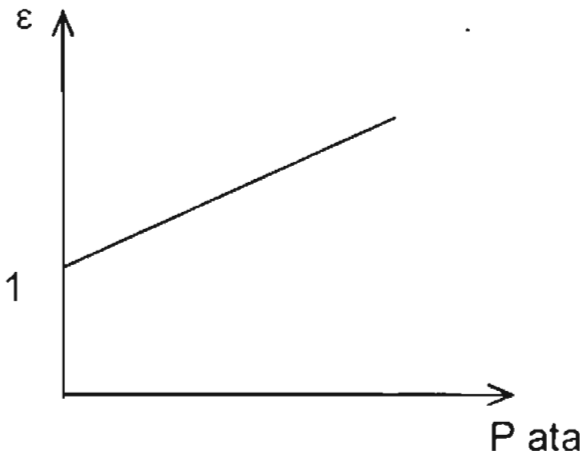
$$\frac{N\alpha_{\text{cnh}}}{\epsilon_0} \approx v^2 - 1 \quad (3-32)$$

Theo công thức (3-32) ta có thể xác định hằng số điện môi bằng cách đo hệ số khúc xạ  $v$  của chất đó.

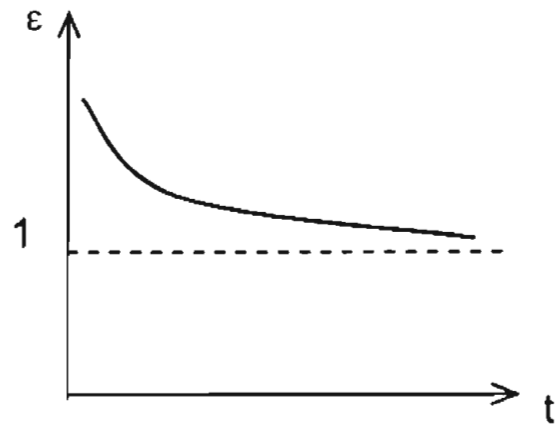
Trong các chất khí mật độ phân tử khí tỷ lệ thuận với áp suất và tỷ lệ nghịch với nhiệt độ:  $N = \frac{p}{kT}$ .

Từ đó suy ra hằng số điện môi của điện môi khí phụ thuộc vào áp suất và nhiệt độ theo tỷ lệ thuận và tỷ lệ nghịch tương ứng (xem hình 3-7 và 3-8). Sự phụ

thuộc của hằng số điện môi của các chất khí vào nhiệt độ và áp suất được giải thích bởi sự thay đổi số phân tử trong một đơn vị thể tích khí. Theo công thức (3-31) ta có công thức (3-33) chứng minh cho các vấn đề nêu ở trên:



Hình 3-7. Quan hệ giữa  $\epsilon$  với áp suất  $p$  khi  $T = \text{const.}$



Hình 3-8. Quan hệ giữa  $\epsilon$  với nhiệt độ  $T$  khi  $p = \text{const.}$

$$\epsilon = 1 + \frac{p \cdot \alpha_{\text{enh}}}{kT\epsilon_0} \quad (3-33)$$

Trong bảng 3-1 trình bày giá trị hằng số điện môi của một số khí, có nêu ra bán kính phân tử và hệ số khúc xạ ánh sáng  $v$ .

**Bảng 3.1: Hằng số điện môi của các chất khí**

Tên gọi chất khí	Bán kính phân tử $A^{\circ}$	Hệ số khúc xạ ánh sáng $v$	$v^2$	$\epsilon$ khi $t = 20^{\circ}\text{C}$ và $P = 760\text{mm}$ cột thủy ngân
Hêli	1,12	1,000035	1,000070	1,000072
Hyđrô	1,35	1,00014	1,00028	1,00027
Ôxy	1,82	1,00027	1,00054	1,00055
Argon	1,83	1,000275	1,00055	1,00056
Nitơ	1,91	1,00030	1,00060	1,00060
Axít cacbonic	2,30	1,00050	1,00100	1,00096
Êtilen	2,78	1,00065	1,00130	1,00138



Từ số liệu của bảng 3-1 ta thấy rõ ràng hằng số điện môi của các chất khí tăng khi bán kính phân tử càng lớn.

Trong bảng 3-2 đưa ra sự phụ thuộc của hằng số điện môi của không khí, axit cacbonic và khí nitơ vào áp suất (ở nhiệt độ bình thường 20°C).

**Bảng 3.2. Quan hệ giữa  $\epsilon$  với áp suất của một số khí**

Không khí		Axit cacbonic		Nitơ	
áp suất, at	$\epsilon$	áp suất, at	$\epsilon$	áp suất, at	$\epsilon$
1	1,00058	1	1,00098	1	1,0006
20	1,0108	20	1,020	20	1,0109
40	1,0218	40	1,050	100	1,055

Trong bảng 3-3 là quan hệ của hằng số điện môi không khí với nhiệt độ khi áp suất không đổi và bằng 1at.

**Bảng 3.3. Quan hệ giữa  $\epsilon$  của không khí với nhiệt độ**

Nhiệt độ :°C	$\epsilon_{KK}$
+60	1,00052
+20	1,00058
-60	1,00081

**Bảng 3.4: Quan hệ giữa  $\epsilon$  của không khí với độ ẩm**

Độ ẩm không khí, $\varphi\%$	$\epsilon$
0	1,00058
50	1,00060
100	1,00064

Trong bảng 3-2 và 3-3 nêu ra các số liệu đối với chất khí khô. Ảnh hưởng của độ ẩm không khí đối với hằng số điện môi (ở nhiệt độ và áp suất bình thường) được chỉ ra ở bảng 3-4. Ảnh hưởng này không đáng kể khi ở nhiệt độ bình thường, nhưng nó tăng lên rõ rệt khi ở nhiệt độ cao.

Để khảo sát quan hệ giữa hằng số điện môi với nhiệt độ, người ta thường tính hệ số nhiệt của hằng số điện môi, ký hiệu là  $TK_{\epsilon}$ :

$$TK_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} \left[ \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right] \quad (3-34)$$

**Hệ số nhiệt của hằng số điện môi nói lên sự thay đổi tương đối của hằng số điện môi khi nhiệt độ tăng lên  $1^{\circ}\text{C}$ .** Nếu  $TK_{\epsilon} > 0$  thì hằng số điện môi sẽ tăng khi nhiệt độ tăng, ngược lại  $TK_{\epsilon} < 0$  thì hằng số điện môi sẽ giảm khi nhiệt độ tăng và  $\epsilon$  đạt cực trị khi  $TK_{\epsilon} = 0$ .

Theo phương trình (3-33) ta có:

$$\frac{d\epsilon}{dT} = \frac{d}{dT} \left( 1 + \frac{p\alpha_{\text{enh}}}{\epsilon_0 kT} \right) = \frac{-p\alpha_{\text{enh}}}{\epsilon_0 kT^2} = \frac{-(\epsilon - 1)}{T}$$

Suy ra:

$$TK_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} = \frac{-(\epsilon - 1)}{\epsilon \cdot T} < 0.$$

Như vậy: **hằng số điện môi của điện môi khí giảm khi nhiệt độ tăng** (xem hình 3-8 và số liệu hằng số điện môi của không khí ở bảng 3-3).

### 3.5.2. Hằng số điện môi của các chất khí cực tính

Trong các chất khí cực tính xảy ra hai loại phân cực chính, đó là: phân cực điện tử nhanh và phân cực lưỡng cực. Mặc dù có các phân tử cực tính nhưng phân cực điện tử nhanh vẫn đóng vai trò chủ yếu ( $\alpha_{\text{enh}} > \alpha_{\text{LC}}$ ). Hệ số phân cực được tính là tổng của hệ số phân cực điện tử nhanh và phân cực lưỡng cực:

$$\alpha = \alpha_{\text{enh}} + \alpha_{\text{LC}}$$

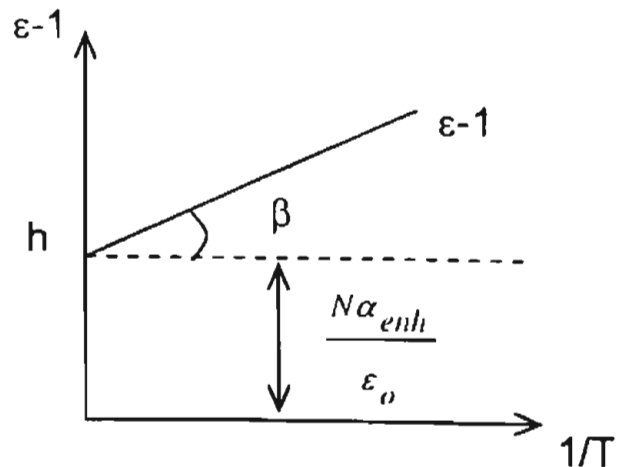
Từ phương trình Claudiút-Môxótchi (3-30) để tính hằng số điện môi cực tính, nhưng đối với các chất khí có mật độ phân tử thấp nên  $\epsilon \approx 1$ , do đó ta có phương trình rút gọn sau đây:

$$\epsilon - 1 = \frac{N}{\epsilon_0} \left( \alpha_{\text{enh}} + \frac{m_0^2}{3kT} \right) = \frac{N\alpha_{\text{enh}}}{\epsilon_0} + \frac{Nm_0^2}{3\epsilon_0 kT} \quad (3-35)$$

Phân cực điện tử nhanh có  $\epsilon \approx v^2$ , nên phương trình (3-35) có thể viết:

$$\epsilon = v^2 + \frac{N \cdot m_0^2}{3\epsilon_0 kT} \quad (3-36)$$

Đối với các chất khí cực tính khi nhiệt độ tăng thì khả năng định hướng của các lưỡng cực giảm, do đó hằng số điện môi giảm cho đến trị số  $v^2$ . Quan hệ giữa



Hình 3-9. Quan hệ giữa  $(\epsilon - 1)$  với  $1/T$ .

$(\epsilon-1)$  với  $1/T$  là quan hệ tuyến tính (hình 3-9). Khi nhiệt độ vô cùng lớn thì  $\epsilon$  có giá trị của phân cực điện tử nhanh vì khi đó chuyển động nhiệt lớn làm cản trở sự định hướng của các phân tử lưỡng cực.

Từ hình vẽ (3-9) ta có:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{N \cdot m_0^2}{3\epsilon_0 k}$$

Từ đó suy ra:

$$m_0 = \sqrt{\frac{3\epsilon_0 k \operatorname{tg}\beta}{N}} \quad (3-37)$$

Như vậy chúng ta có thể xác định mômen lưỡng cực của chất khí cực tính bằng phương pháp đồ thị khi có được quan hệ giữa  $\epsilon-1$  với nhiệt độ ( $1/T$ ). Cũng bằng phương pháp này xác định một cách gần đúng  $m_0$  của phân tử cực tính điện môi lỏng và rắn khi biến đổi chúng về trạng thái khí.

Sau đây ta tính hệ số nhiệt của điện môi khí cực tính:

Từ phương trình (3-35) ta có:

$$\begin{aligned} \frac{d\epsilon}{dT} &= \frac{d}{dT} \left( \frac{N\alpha_{\text{enh}}}{\epsilon_0} + \frac{Nm_0^2}{3\epsilon_0 kT} \right) = \\ &= \frac{\alpha_{\text{enh}}}{\epsilon_0} \frac{dN}{dT} + \frac{m_0^2}{3\epsilon_0 kT} \frac{dN}{dT} + \frac{Nm_0^2}{3\epsilon_0 k} \frac{d}{dT} \left( \frac{1}{T} \right) \\ &= \frac{-N\alpha_{\text{enh}}}{\epsilon_0} \frac{1}{T} - \frac{Nm_0^2}{3\epsilon_0 kT} \frac{1}{T} - \frac{Nm_0^2}{3\epsilon_0 k} \left( \frac{1}{T^2} \right) = \\ &= -\frac{\epsilon-1}{T} - \frac{\epsilon-v^2}{T} \\ \operatorname{TK}_\epsilon &= \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} = -\frac{\epsilon-1}{\epsilon \cdot T} - \frac{\epsilon-v^2}{\epsilon \cdot T} \end{aligned} \quad (3-38)$$

Do  $\epsilon > 1$  và  $\epsilon > v^2$  cho nên:  $\operatorname{TK}_\epsilon < 0$ , vì vậy hằng số điện môi khí cực tính giảm khi nhiệt độ tăng.

### 3.6. HẰNG SỐ ĐIỆN MÔI CỦA ĐIỆN MÔI LỎNG

Do đặc điểm cấu tạo phân tử, điện môi lỏng được phân thành hai nhóm: điện môi lỏng trung tính (dầu máy biến áp, dầu tụ điện, benzen, toluene v.v...) và điện môi lỏng cực tính (ví dụ: dầu thầu dầu, sôvôn, xôvton v.v...)

#### 3.6.1. Hằng số điện môi của điện môi lỏng trung tính

Điện môi lỏng trung tính được đặc trưng bởi loại phân cực đó là phân cực điện tử nhanh ( $\alpha_{\text{enh}}$ ). Do vậy, hằng số điện môi của chất lỏng trung tính không lớn lắm (khoảng từ 2÷2,5) và gần bằng bình phương hệ số khúc xạ ánh sáng:

$$\epsilon \approx n^2.$$

Khi tính hằng số điện môi của điện môi lỏng trung tính chúng ta sử dụng phương trình Claudiút – Môxôtchi:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{N\alpha_{\text{enh}}}{3\epsilon_0} \quad (3-39)$$

Hằng số điện môi lỏng trung tính phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ (không bị ảnh hưởng của áp suất như chất khí). Khi nhiệt độ tăng điện môi lỏng có sự giãn nở nhiệt, khoảng cách giữa các phân tử tăng lên, mật độ phân tử giảm xuống, do vậy, hằng số điện môi cũng giảm. Để xét sự thay đổi của hằng số điện môi, ta tính hệ số nhiệt  $TK_\epsilon$  của điện môi đó:  $TK_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT}$

Trước tiên ta tính đạo hàm vế trái và vế phải của phương trình (3-39) theo nhiệt độ:

$$\frac{d}{dT} \left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) = \frac{d}{d\epsilon} \left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) \frac{d\epsilon}{dT} = \frac{3}{(\epsilon + 2)^2} \frac{d\epsilon}{dT} \quad (3-40)$$

$$\frac{d}{dT} \left( \frac{N\alpha_{\text{enh}}}{3\epsilon_0} \right) = \frac{\alpha_{\text{enh}}}{3\epsilon_0} \frac{dN}{dT} = \frac{N\alpha_{\text{enh}}}{3\epsilon_0} \frac{1}{N} \frac{dN}{dT} = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} TK_N \quad (3-41)$$

Trong đó:  $TK_N = \frac{1}{N} \frac{dN}{dT}$  - đây là hệ số nhiệt của mật độ phân tử. Hệ số này tương đương với hệ số nhiệt của thể tích  $TK_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$ , song có dấu ngược lại. Bởi vì, khi nhiệt độ tăng thể tích điện môi lỏng sẽ tăng lên ( $TK_V > 0$ ), nhưng mật độ phân tử lại giảm đi ( $TK_N < 0$ ). Do vậy ta có:

$$TK_N = -TK_V \quad (TK_V > 0)$$

Từ (3-40) và (3-41) ta có:

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{-(\varepsilon - 1)(\varepsilon + 2)}{3} TK_v$$

Suy ra:

$$TK_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{-(\varepsilon - 1)(\varepsilon + 2)}{3\varepsilon} TK_v \left[ \frac{1}{^\circ\text{C}} \right]; \quad (3-41)$$

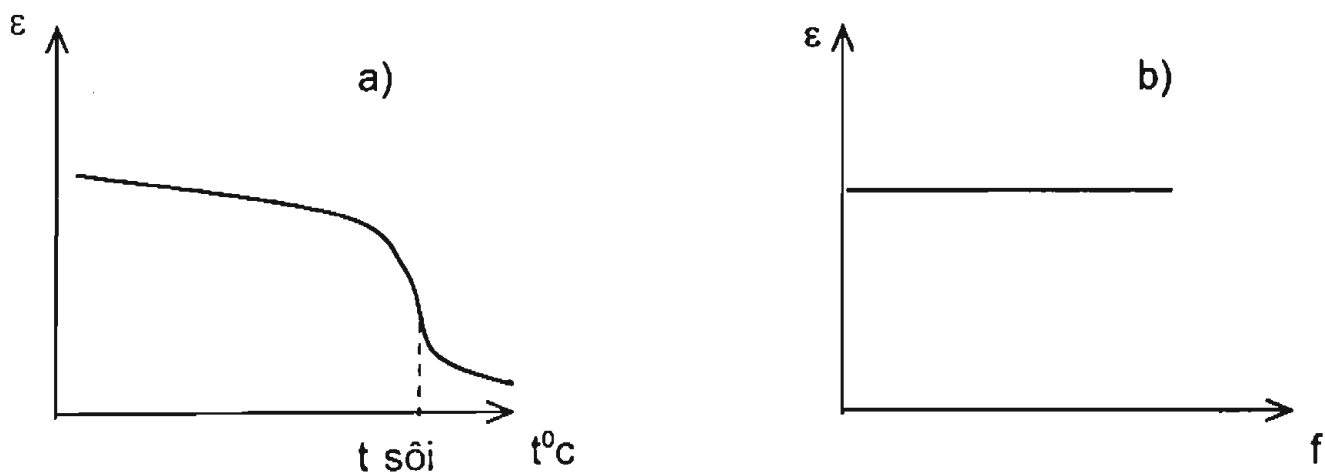
Từ kết quả trên (3-41) ta có  $TK_\varepsilon < 0$  nên hằng số điện môi lỏng trung tính giảm đi khi nhiệt độ tăng.

Trong bảng (3-5) đưa ra số liệu hằng số điện môi  $TK_\varepsilon$  và  $TK_v$  của một số chất lỏng trung tính và cực tính yếu.

**Bảng 3.5. Hằng số điện môi của các chất lỏng trung tính và cực tính yếu**

Tên chất lỏng	$v^2$	$\varepsilon$	$TK_\varepsilon, \text{độ}^{-1}$	$TK_v, \text{độ}^{-1}$
Ben zen	2,25	2,218	$-0,93 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$
Toluen	2,25	2,294	$-1,16 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$
Tetraclorua cacbon	2,135	2,163	$-0,91 \cdot 10^{-3}$	$1,227 \cdot 10^{-3}$

Quan hệ hằng số điện môi của chất lỏng trung tính với nhiệt độ và tần số được biểu diễn trên hình 3-10. Qua hình vẽ ta thấy hằng số điện môi lỏng trung tính không phụ thuộc vào tần số. Do vậy, điện môi lỏng trung tính có thể sử dụng ở bất kỳ tần số nào.



**Hình 3-10. Quan hệ giữa hằng số điện môi của chất lỏng trung tính với nhiệt độ (a) và tần số (b).**

### 3.6.2. Hằng số điện môi của điện môi lỏng cực tính

Chất lỏng cực tính có hai dạng phân cực đó là phân cực điện tử nhanh  $\alpha_{\text{enh}}$  và phân cực lưỡng cực  $\alpha_{\text{cc}}$ . Phân cực lưỡng cực đóng vai trò quan trọng và có trị số lớn khi chất lỏng đó là chất cực tính mạnh. Do đó việc tính hằng số điện môi theo phương trình Claudiút-Môxótchi không còn phù hợp nữa vì  $E_3 \neq 0$ .

Có nhiều thuyết đưa ra để tính hằng số điện môi  $\epsilon$  của các điện môi cực tính, ví dụ Debai, Onsajer, Kirvút v.v...

\* Theo Debai ta có công thức:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{4\pi N}{3} \left[ \alpha_{\text{enh}} + \frac{m_o^2}{3kT} \cdot R(x) \right]; \quad (3-42)$$

Trong đó:  $R(x) = 1 - L^2\left(\frac{MF}{kT}\right)$ . Với  $L\left(\frac{MF}{kT}\right)$  là hàm Lăngieven cho quan hệ tính lực tương tác của các mômen lưỡng cực dưới tác dụng của điện trường E.

\* Onsajer đã tính  $\epsilon$  của chất lỏng theo công thức sau:

$$\frac{(\epsilon - v^2)(2\epsilon + v^2)}{\epsilon(v^2 + 2)^2} = \frac{4}{3} \pi N \cdot \frac{m_o^2}{3kT} \quad (3-43)$$

\* Còn Kirvút đã đưa ra công thức tính  $\epsilon$  ở dạng sau:

$$\frac{(\epsilon - 1)(2\epsilon + 1)}{9\epsilon} = \frac{4}{3} \pi N \cdot \left( \alpha + \frac{m_o^2}{3kT} \cdot G \right) \quad (3-44)$$

Trong đó: G- là hệ số cấu trúc.

Nói chung việc tính  $\epsilon$  của chất lỏng cực tính rất phức tạp. Mỗi công thức của các tác giả nêu ở trên đều đưa ra các lý lẽ và giả thiết, nên hằng số điện môi tính theo các công thức đó có tính chất gần đúng. Vì vậy, khi tính hằng số điện môi của các điện môi cực tính ta vẫn sử dụng phương trình Claudiút-Môxótchi:

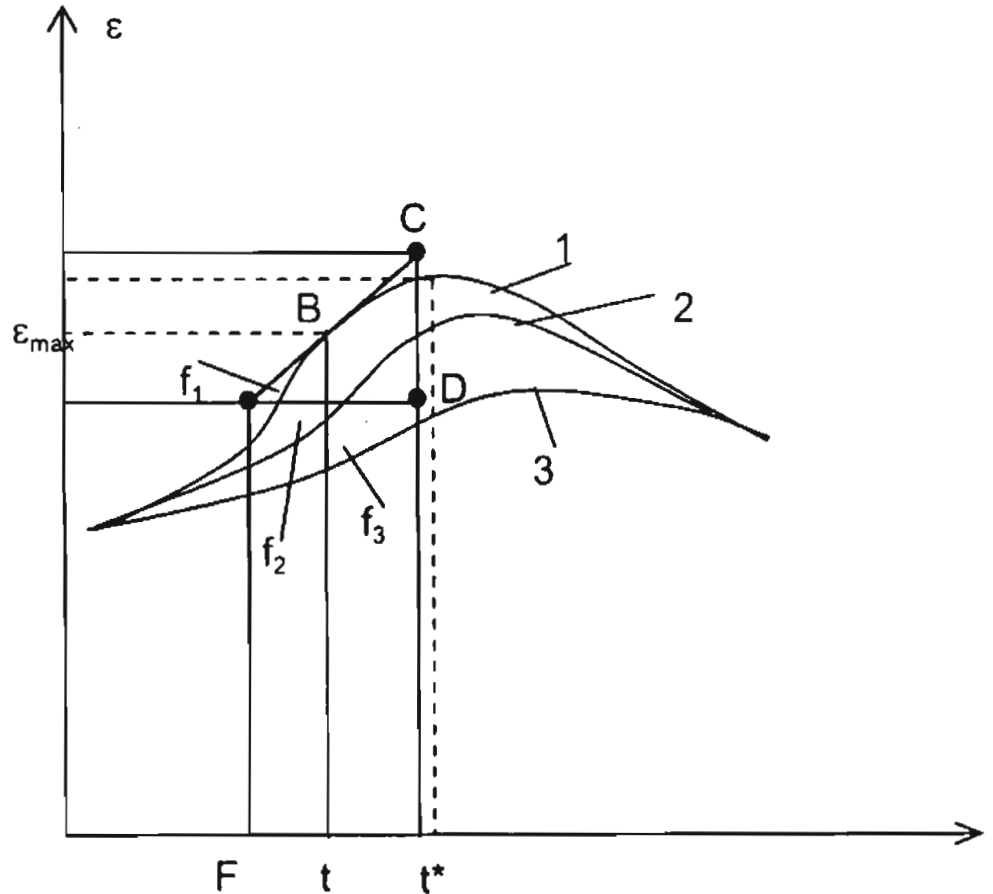
$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{N}{3\epsilon_o} \left( \alpha_{\text{enh}} + \frac{m_o^2}{3kT} \right) \quad (3-45)$$

Các chất lỏng cực tính có hằng số điện môi càng lớn khi trị số mômen lưỡng cực lớn và khi mật độ phân tử cao. Do vậy, các chất lỏng cực tính mạnh có giá trị hằng số điện môi rất cao, ví dụ: nước, rượu êtilíc... nên không thể ứng dụng trong thực tế để làm điện môi do độ dẫn điện của chúng lớn.

Hằng số điện môi của các điện môi cực tính phụ thuộc nhiều vào tần số và nhiệt độ. Trên hình 3-11 cho ta khái niệm về quan hệ của hằng số điện môi theo nhiệt độ đo ở các tần số khác nhau: ( $f_1 < f_2 < f_3$ ).

Theo hình vẽ (đường 1 đo ở tần số  $f_1$ ), ta thấy: khi nhiệt độ tăng, lực liên kết giữa các phân tử chất lỏng giảm (do có sự dãn nở nhiệt) nên sự xoay hướng của các phân tử lưỡng cực dễ dàng hơn. Do vậy, hằng số điện môi sẽ tăng lên. Nhưng khi ở nhiệt độ cao, chuyển động nhiệt của phân tử lớn sẽ làm cản trở sự xoay hướng của các phân tử lưỡng cực, do đó hằng số điện môi sẽ giảm xuống. Đồ thị quan hệ giữa  $\epsilon$  với nhiệt độ đạt trị số cực đại ( $\epsilon_{\max}$ ) ở một nhiệt độ ( $t_*$ ) nào đó. Khi sử dụng điện môi lỏng cực tính cần phải tránh vùng nhiệt độ lân cận ( $t_*$ ), vì ở đó có hằng số điện môi lớn và điện dẫn cao.

Trị số  $TK_\epsilon$  ở các nhiệt độ khác nhau thường được tìm bằng phương pháp vi phân đồ thị của đường cong  $\epsilon = f(t')$  (khi  $f = \text{const}$ ). Để xác định  $TK_\epsilon$  ở nhiệt độ  $t$  và tần số  $f_1$ , ta vẽ tiếp tuyến với đường cong tại điểm B đang xét và lấy đường thẳng này làm cạnh huyền, dựng tam giác vuông có kích thước bất kỳ ACD. Khi tính  $TK_\epsilon$  cần phải tính đến tỷ lệ xích theo trục nhiệt độ ( $M_t$ ). Trị số tìm được sẽ tính bằng công thức sau:

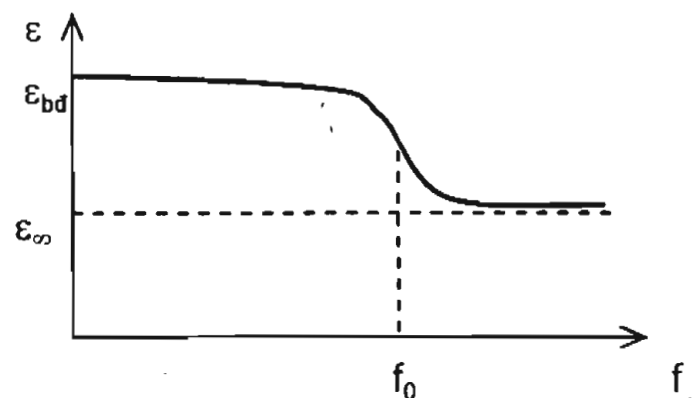


Hình 3-11. Quan hệ giữa  $\epsilon = f(t')$  với  $f_1 < f_2 < f_3$ .

$$TK_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{\Delta\epsilon}{\Delta T} = \frac{1}{BF} \cdot \frac{CD}{AD \cdot M_t} \quad (3-46)$$

Tần số của điện trường sẽ làm thay đổi trị số  $\epsilon$  của chất lỏng lưỡng cực. Trên hình 3-12 biểu thị quan hệ của  $\epsilon$  theo tần số đối với chất lỏng cực tính.

Khi tần số thấp, các lưỡng cực xoay kịp theo hướng của điện trường, các phân cực có thể xảy ra



Hình 3-12. Quan hệ của hằng số điện môi với

trộn vụn nên hằng số điện môi  $\epsilon$  có trị số lớn và gần bằng hằng số điện môi khi đo ở điện áp một chiều ( $\epsilon_{td}$ ). Nhưng khi tần số tăng cao, các phân tử cực tính không kịp định hướng theo sự biến đổi của trường, phân cực xảy ra không trọn vẹn, hằng số điện môi giảm và tiến đến trị số  $\epsilon_{\infty}$  ( $\epsilon_{\infty}$  - hằng số điện môi đo ở tần số cao vô cùng ( $\infty$ )). Khi đó chỉ còn tồn tại phân cực điện tử nhanh ( $\epsilon_{\infty} \approx v^2$ ).

Tần số  $f_0$  khi  $\epsilon$  bắt đầu giảm (hình 3-12) có thể biểu thị bằng công thức:

$$f_0 = \frac{kT}{8\pi^2 \eta r^3} \tag{3-47}$$

trong đó:  $\eta$ - độ nhớt;  $r$ - bán kính phân tử điện môi lỏng.

Thời gian phân cực của phân tử  $\tau_0$  liên quan tới tần số  $f_0$  tính bằng tỷ số sau đây:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau_0} \tag{3-48}$$

Sự phụ thuộc của hằng số điện môi  $\epsilon$  với cả tần số và nhiệt độ biểu diễn trên hình 3-11. Qua hình vẽ ta thấy hằng số điện môi cực đại giảm đi khi tần số tăng và khi ở nhiệt độ cao hơn. Điều đó nói lên muốn có phân cực trọn vẹn cần phải tăng nhiệt độ để giảm lực liên kết giữa các phân tử và khi đó các phân tử cực tính kịp xoay theo tần số của điện trường.

Hằng số điện môi của chất lỏng cực tính cao hơn nhiều so với chất lỏng trung tính. Trong bảng 3-6 nêu ra trị số  $\epsilon$  của một số điện môi lỏng cực tính yếu dùng trong kỹ thuật điện.

**Bảng 3.6: Hằng số điện môi của các điện môi lỏng cực tính**

Tên chất lỏng	$\epsilon$ ở $t = 20^\circ\text{C}$ và $f = 50\text{Hz}$
Thầu dầu	4,5
xô vôn	5,0
xôvtôn	3,2

### 3.7. HẰNG SỐ ĐIỆN MÔI CỦA ĐIỆN MÔI RẮN

Hằng số điện môi của điện môi rắn có trị số khác nhau do đặc điểm cấu tạo đa dạng về cấu trúc và thành phần. Điện môi rắn phân thành một số nhóm cơ bản để xét hằng số điện môi của chúng.



### 3.7.1. Hằng số điện môi các chất rắn trung tính.

Trong các điện môi rắn trung tính (kim cương, băng phiến, lưu huỳnh, paraffin, poliêtilen, polistirol v.v...) chỉ tồn tại phân cực điện tử nhanh ( $\alpha = \alpha_{\text{enh}}$ ). Do vậy, hằng số điện môi rắn trung tính có trị số bằng bình phương hệ số khúc xạ ánh sáng:  $\epsilon = v^2$ . Để tính hằng số điện môi rắn trung tính ta sử dụng phương trình Claudiút-Môxốtchi:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{N\alpha_{\text{enh}}}{3\epsilon_0} \quad (3-49)$$

Theo phương trình (3-49) ta thấy: quan hệ hằng số điện môi của điện môi rắn trung tính theo nhiệt độ được xác định bởi sự biến đổi số phân tử trong đơn vị thể tích (N). Để xét mối quan hệ này ta tính  $TK_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT}$ , bằng cách tính đạo hàm về trái và về phải của phương trình (3-49):

$$\frac{d}{dT} \left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) = \frac{d}{d\epsilon} \left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) \frac{d\epsilon}{dT} = \frac{3}{(\epsilon + 2)^2} \frac{d\epsilon}{dT} \quad (3-50)$$

$$\frac{d}{dT} \left( \frac{N\alpha_{\text{enh}}}{3\epsilon_0} \right) = \frac{\alpha_{\text{enh}}}{3\epsilon_0} \frac{N}{N} \frac{dN}{dT} = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} TK_N = -\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} TK_v \quad (3-51)$$

Từ (3-50) và (3-51) ta có:

$$\frac{d\epsilon}{dT} = \frac{-(\epsilon - 1)(\epsilon + 2)}{3} TK_v \text{ với } TK_v > 0$$

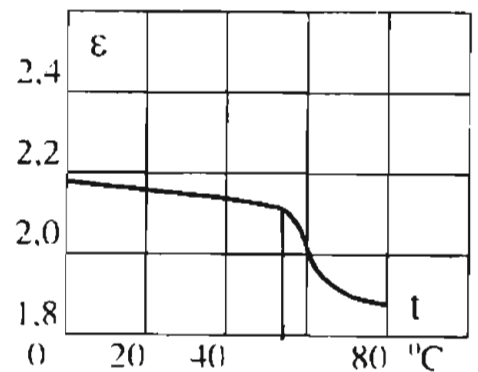
Suy ra:

$$TK_v = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} = \frac{-(\epsilon - 1)(\epsilon + 2)}{3\epsilon} TK_v < 0 \quad (3-52)$$

Hệ số nhiệt của hằng số điện môi có trị số âm ( $TK_\epsilon < 0$ ), vì vậy hằng số điện môi của điện môi rắn trung tính giảm khi nhiệt độ tăng.

Trên hình 3-13 nêu ra quan hệ của  $\epsilon$  theo nhiệt độ của parafin.

Cần chú ý rằng khi parafin chuyển từ trạng thái rắn sang trạng thái lỏng (nhiệt độ nóng chảy gần bằng  $55^\circ\text{C}$ ), hằng số điện môi giảm mạnh do mật độ phân tử điện môi bị giảm.



Hình 3-13. Quan hệ  $\epsilon = f(t)$  của parafin.

Trong bảng 3-7, nêu ra giá trị hằng số điện môi của một số loại điện môi rắn trung tính khi ở nhiệt độ  $t = 20^{\circ}\text{C}$ .

**Bảng 3.7: Hằng số điện môi của một số điện môi rắn trung tính**

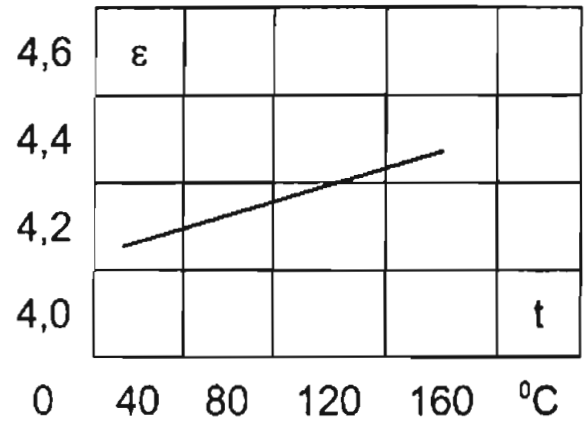
Tên vật liệu	$v$	$v^2$	$\epsilon$ ( $t = 20^{\circ}\text{C}$ , $f = 50\text{Hz}$ )
Parafin	1,43	2,06	1,9 ÷ 2,2
Polistirol	1,55	2,40	2,4 ÷ 2,6
Lưu huỳnh	1,92	3,69	3,6 ÷ 4,0
Kim cương	2,40	5,76	5,6 ÷ 5,8

### 3.7.2. Hằng số điện môi của điện môi rắn có kết cấu tinh thể ion

Trong điện môi rắn kết cấu tinh thể ion là liên kết mạnh (chặt chẽ) có phân cực điện tử nhanh và ion nhanh với hằng số điện môi nằm trong phạm vi rộng. Hệ số nhiệt của hằng số điện môi các chất này trong nhiều trường hợp có giá trị dương với lý do: khi nhiệt độ tăng không phải chỉ có mật độ phân tử giảm mà còn xảy ra hiện tượng tăng khả năng phân cực của các ion, ảnh hưởng tăng này mạnh hơn nhiều so với sự giảm mật độ. Trường hợp ngoại lệ là các tinh thể chứa ion titan như rutin ( $\text{TiO}_2$ ) và một số titanat với hệ số nhiệt của hằng số điện môi âm. Hệ số nhiệt  $\text{TK}_\epsilon$  của các tinh thể này âm vì sự phân cực điện tử nhanh trội hơn, đồng thời nó lại được tăng cường nhờ ảnh hưởng của từ trường phụ bên trong khi có sự chuyển dịch ion.

Trên hình 3-14 nêu ra đặc điểm quan hệ của  $\epsilon$  theo nhiệt độ đối với tinh thể ion KCl trong trường hợp  $\text{TK}_\epsilon > 0$ .

Trong bảng 3-8 đưa ra số liệu hằng số điện môi và hệ số nhiệt của hằng số điện môi của một số chất có kết cấu tinh thể ion khi ở nhiệt độ  $20^{\circ}\text{C}$ .



**Hình 3-14. Quan hệ  $\epsilon = f(t)$  của tinh thể KCl.**

**Bảng 3.8: Trị số  $\epsilon$  và  $TK_\epsilon$  của các tinh thể ion**

Tên gọi tinh thể		$\epsilon$	$TK_\epsilon, \text{độ}^{-1}$
$TK_\epsilon$ dương	Muối mỏ (NaCl)...	6	$+ 150 \cdot 10^{-6}$
	Cơ-ng ngọc ( $Al_2O_3$ )...	10	$+ 100 \cdot 10^{-6}$
$TK_\epsilon$ âm	Rutin ( $TiO_2$ )	110	$- 750 \cdot 10^{-6}$
	Canxi titanat ( $CaO.TiO_2$ )	150	$- 1500 \cdot 10^{-6}$

Đối với những điện môi rắn có kết cấu tinh thể ion không chặt chẽ (liên kết yếu), ngoài phân cực điện tử và ion nhanh còn có phân cực ion chậm. Trong nhiều trường hợp các chất này có hằng số điện môi không cao, nhưng hệ số nhiệt dương và có trị số lớn. Ví dụ, sứ cao áp có quan hệ  $\epsilon$  với nhiệt độ biểu diễn trên hình 3-15.

### 3.7.3. Hằng số điện môi của thủy tinh vô cơ

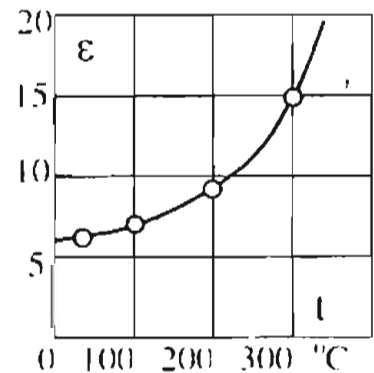
Hằng số điện môi của thủy tinh vô cơ nằm trong phạm vi tương đối hẹp vào khoảng từ 4 đến 20 tùy thuộc vào thành phần và kết cấu do công nghệ gia công tạo nên. Với cùng một thành phần, nhưng công nghệ đóng rắn nhanh hay chậm làm cho kết cấu tinh thể thủy tinh khác nhau nên hằng số điện môi cũng khác nhau.

Trong vật liệu thủy tinh sạch tồn tại hai loại phân cực: điện tử nhanh và ion nhanh. Nếu có chứa các ôxít kiềm ( $Na_2O, K_2O \dots$ ) thì thủy tinh còn có thêm phân cực kết cấu cùng với 2 loại phân cực nói trên. Do vậy, ta có thể viết phương trình Claudiút-Môxốtchi để tính  $\epsilon$  của thủy tinh như sau:

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{N}{3\epsilon_0} (\alpha_e + \alpha_i) \quad (3-53)$$

Một điều cần lưu ý là đối với thủy tinh và một số điện môi có cấu trúc vô định hình khác, hệ số phân cực  $\alpha_i$  phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ  $\alpha = f(t)$ . Khi nhiệt độ tăng, khoảng cách giữa các ion tăng do đó hệ số phân cực  $\alpha_i$  cũng tăng lên. Như vậy, khi tính hệ số nhiệt của hằng số điện môi cần phải biết và tính đến quan hệ của  $\alpha_i$  với nhiệt độ. Cũng như các phần ở trên ta đã có:

$$\frac{d}{dT} \left( \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) = \frac{3}{(\epsilon + 2)^2} \frac{d\epsilon}{dT}$$



**Hình 3-15. Quan hệ  $\epsilon = f(t)$  của sứ cách điện.**

Ta cần tính đạo hàm phía bên phải theo nhiệt độ của (3-51):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dT} \left[ \frac{N}{3\epsilon_0} (\alpha_e + \alpha_i) \right] &= \frac{\alpha_e}{3\epsilon_0} \frac{N}{N} \frac{dN}{dT} + \frac{\alpha_i}{3\epsilon_0} \frac{N}{N} \frac{dN}{dT} + \frac{N}{3\epsilon_0} \frac{d\alpha_i}{dT} = \\ &= \frac{N(\alpha_e + \alpha_i)}{3\epsilon_0} \frac{1}{N} \frac{dN}{dT} + \frac{N}{3\epsilon_0} \frac{d\alpha_i}{dT} = \\ &= \frac{-(\epsilon - 1)}{\epsilon + 2} TK_v + \frac{N}{3\epsilon_0} \frac{d\alpha_i}{dT} \end{aligned}$$

Suy ra:

$$TK_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} = -\frac{(\epsilon - 1)(\epsilon + 2)}{3\epsilon} + \frac{N(\epsilon + 2)}{9\epsilon\epsilon_0} \frac{d\alpha_i}{dT} \quad (3-54)$$

Quan hệ giữa  $\epsilon$  của thuỷ tinh với nhiệt độ được biểu diễn trên hình 3-16. Ở vùng nhiệt độ thấp  $t < t_c$  ( $t_c$  – là nhiệt độ thuỷ tinh hoá hay còn gọi là nhiệt độ nóng chảy), hằng số điện môi tăng lên khi nhiệt độ tăng. Tại gần nhiệt độ  $t_c$  thuỷ tinh bị thay đổi cấu trúc biến đổi thành chất lỏng, nên hằng số điện môi đạt cực đại và có trị số rất lớn tới hàng nghìn.

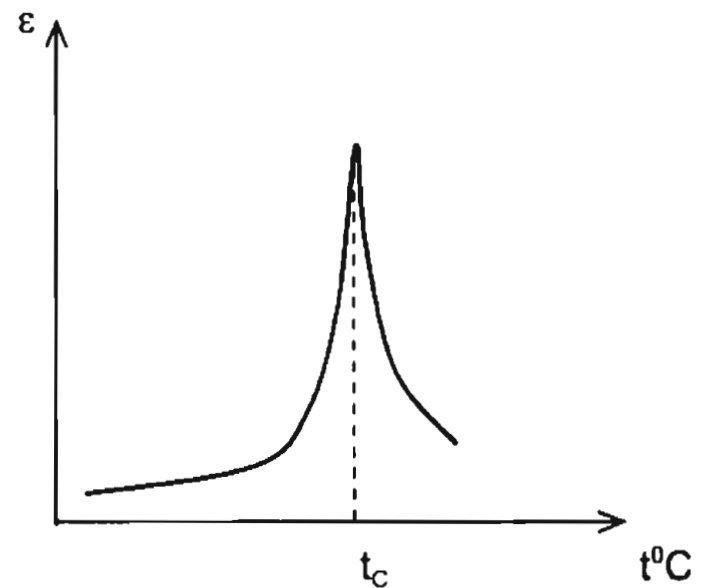
Khi  $t > t_c$  nhiệt độ cao chuyển động nhiệt rất mạnh làm thay đổi cấu trúc phân tử và cản trở sự phân cực nên hằng số điện môi giảm nhanh.

$TK_\epsilon$  của các thuỷ tinh chứa ôxít kiềm tăng nhanh và đạt giá trị lớn:  $(500 \div 1000) \cdot 10^{-6}$  (độ<sup>-1</sup>).

Trị số của hằng số điện môi thuỷ tinh vô cơ cho ở bảng (3-9).

**Bảng 3.9: Hằng số điện môi thuỷ tinh vô cơ**

Tên gọi các thuỷ tinh vô cơ	$\epsilon$
Thạch anh nóng chảy	4,5
Thuỷ tinh kiềm	6,6
Thuỷ tinh barit	10,0

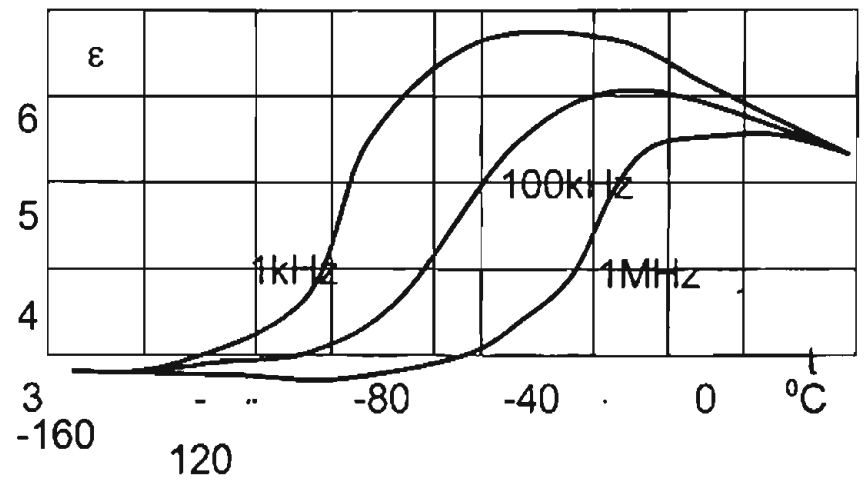


**Hình 3-16. Quan hệ  $\epsilon = f(t)$  của thuỷ tinh.**

### 3.7.4 Hằng số điện môi của điện môi rắn hữu cơ cực tính

Điện môi rắn hữu cơ cực tính bao gồm xenlulô và các sản phẩm của nó như: giấy, bông, vải, sợi, bìa cátton v.v... Ngoài ra còn có các chất nhựa hữu cơ được trùng hợp có các phân tử cực tính như êpôcxì, nhựa phênol fôcmandêhyt, galovac v.v...

Trong các điện môi rắn hữu cơ cực tính, ngoài phân cực điện tử nhanh còn có phân cực lưỡng cực chậm. Hằng số điện môi của các vật liệu này phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ và tần số của điện trường theo quy luật giống như ở các chất lỏng cực tính. Do vậy khi sử dụng các điện môi rắn cực tính trong điều kiện nhiệt độ và tần số thay đổi cần lưu ý tính toán cho phù hợp, nếu không điện môi sẽ bị phá huỷ.



Hình 3-17. Quan hệ  $\epsilon = f(t, f)$  của sáp galovac.

Trên hình 3-17 trình bày quan hệ của  $\epsilon$  theo nhiệt độ và tần số đối với sáp galovac.

Trong bảng 3-10 có đưa ra giá trị hằng số điện môi của một số điện môi cực tính.

**Bảng 3.10: Hằng số điện môi của điện môi cực tính**

Tên điện môi rắn	$\epsilon$
- Nhựa phênolfôcmandêlhyt	4,5
- Sáp galovac	5,0
- Xenlulô	6,5
- Êpôcxì	3 ÷ 4
- Silic hữu cơ	3 ÷ 5

### 3.7.5. Hằng số điện môi của các điện môi xécnhét (có từ tính)

Điện môi xécnhét bao gồm: muối xécnhét  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , titanat bari  $\text{BaTiO}_3$ , phôt phát kali axít  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  và các chất khác. Đặc điểm nổi bật của điện môi xécnhét là hiện tượng điện trễ (cảm ứng điện biến đổi chậm sau cường độ điện

trường). Do có kết cấu tinh thể ion, cho nên trong các chất này có các loại phân cực đặc trưng là phân cực điện tử và ion nhanh, phân cực điện tử và ion chậm, phân cực tự phát.

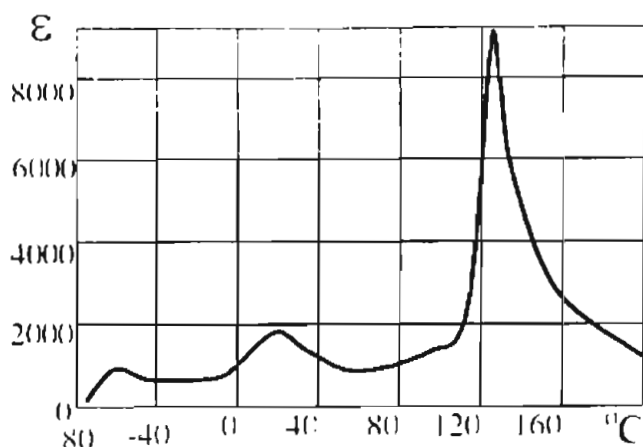
Hằng số điện môi của điện môi xécnhét nằm trong dải rất rộng từ vài đơn vị cho đến hàng trăm, nó phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ và cường độ điện trường.

Trên hình 3-18 nêu ra quan hệ của  $\epsilon$  theo nhiệt độ của gốm titanát bari: Từ hình vẽ ta thấy có một số điểm cực đại ngay cả ở nhiệt độ thấp. Điều đó nói lên cấu trúc tinh thể ion thay đổi khi nhiệt độ thay đổi.

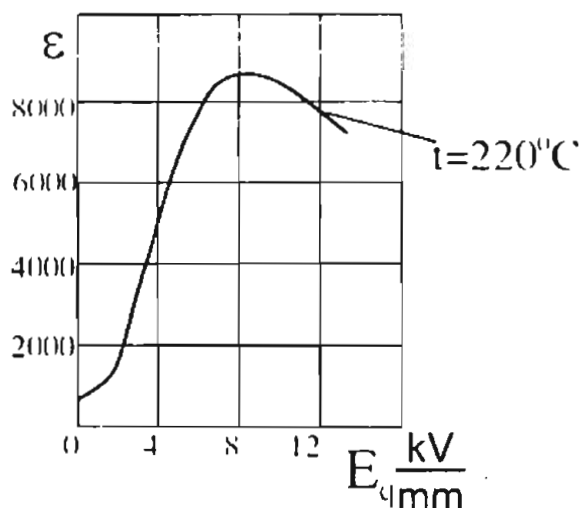
Nhiệt độ mà ở đó  $\epsilon$  đạt trị số cực đại được gọi là điểm Quyri. Trong miền nhiệt độ cao hơn điểm Quyri, thuộc tính xécnhéc của vật liệu không còn, đặc biệt là  $\epsilon$  không phụ thuộc vào cường độ điện trường nữa.

Trên hình 3-19 trình bày quan hệ  $\epsilon$  với cường độ điện trường  $E$  của gốm xécnhét.

Trong bảng 3-11 nêu ra các giá trị hằng số điện môi của các điện môi xécnhét. Trong điện môi xécnhét có hiện tượng già hoá điện, biểu hiện ở hằng số điện môi giảm theo thời gian. Nguyên nhân của hiện tượng này có thể là do sự phân nhóm lại của các đômen. Đặc biệt ở điện môi xécnhét khi nhiệt độ gần điểm Quyri ta thấy hằng số điện môi biến đổi mạnh theo thời gian. Khi điện môi xécnhéc bị đốt nóng tới nhiệt độ cao hơn điểm Quyri, hằng số điện môi trở lại trị số bình thường. Có thể hồi phục hằng số điện môi bằng cách tác động vào điện môi xécnhét một điện trường có cường độ cao.



Hình 3-18. Quan hệ  $\epsilon = f(t)$  của  $BaTiO_3$ .



Hình 3-19. Quan hệ  $\epsilon = f(E)$  xécnhét.

**Bảng 3.11: Trị số  $\epsilon$  của điện môi xécnhét ở  $t = 20^\circ\text{C}$  trong điện trường yếu**

Tên vật liệu	$\epsilon$
- Muối xécnhét	500 ÷ 600
- Titanat Bari $\text{BaTiO}_3$	1000 ÷ 1500
- Titanat Bari có thêm chất phụ	7000 ÷ 9000

### 3.7.6. Hằng số điện môi của tổ hợp các cách điện rắn

Trong thực tế kỹ thuật điện thường gặp tổ hợp cách điện của các chất cách điện khác nhau. Một bài toán đặt ra là cần xác định hằng số điện môi của *tổ hợp các cách điện*, khi biết hằng số điện môi và tỷ lệ tương đối của các điện môi thành phần.

Lixteniker đã đưa ra công thức tính hằng số điện môi  $\epsilon$  của tổ hợp cách điện gồm hai chất với hằng số điện môi là  $\epsilon_1$  và  $\epsilon_2$ , tỷ lệ tương đối của thành phần tương ứng là  $x_1$  và  $x_2$  với điều kiện là  $x_1 + x_2 = 1$ . Trong trường hợp tổng quát, tổ hợp cách điện có  $n$  chất điện môi khác nhau thì ta tiến hành tính toán  $\epsilon$  cho các cặp hai chất một (1,2), rồi lại tính tiếp các cặp (1+2+3) v.v... cho đến  $n$  chất.

Công thức tổng quát để tính  $\epsilon$  của tổ hợp hai cách điện như sau:

$$\epsilon^k = x_1 \cdot \epsilon_1^k + x_2 \cdot \epsilon_2^k \quad (3-55)$$

Trong đó:

$\epsilon_1, \epsilon_2$ - hằng số điện môi của các điện môi thành phần mà ta đã biết.

$x_1, x_2$  - Thể tích tương đối của các thành phần với :  $x_1 + x_2 = 1$ .

$k$ - Là hệ số mũ nói lên đặc điểm sắp xếp của các thành phần.

Thực tế có thể xảy ra các trường hợp sau đây:

a) Nếu điện môi gồm 2 lớp đặt vuông góc với phương của điện trường (mắc song song hai tụ) thì:  $k = -1$ . Ta có:

$$\frac{1}{\epsilon} = \frac{x_1}{\epsilon_1} + \frac{x_2}{\epsilon_2} \quad (3-56)$$

b) Nếu hai điện môi đặt song song với phương của điện trường (mắc nối tiếp 2 tụ), thì  $k = 1$ . Ta có:

$$\epsilon = x_1 \cdot \epsilon_1 + x_2 \cdot \epsilon_2 \quad (3-57)$$

c) Nếu hai chất điện môi trộn đều vào với nhau thì  $k$  tiến dần tới “không” ( $k \rightarrow 0$ ). Do  $k \rightarrow 0$  nên có thể vi phân phương trình (3-55) ở trên, ta được:

$$\epsilon^{k-1} d\epsilon = x_1 \cdot \epsilon_1^{k-1} d\epsilon_1 + x_2 \cdot \epsilon_2^{k-1} d\epsilon_2$$

Vì  $k \rightarrow 0$  nên có thể viết:

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = x_1 \frac{d\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + x_2 \frac{d\varepsilon_2}{\varepsilon_2}$$

Sau khi lấy tích phân ta được:

$$\ln \varepsilon = x_1 \cdot \ln \varepsilon_1 + x_2 \cdot \ln \varepsilon_2 \quad (3-58)$$

Như vậy, ta có thể tính được hằng số điện môi của tổ hợp hai chất điện môi theo các công thức (3-56), (3-57), (3-58) ứng với các trường hợp đã nêu ở trên.

Hệ số nhiệt của hằng số điện môi tổ hợp cách điện được xác định trên cơ sở vi phân phương trình (3-55) theo nhiệt độ:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{x_1}{\varepsilon_1} \frac{d\varepsilon_1}{dT} + \frac{x_2}{\varepsilon_2} \frac{d\varepsilon_2}{dT}$$

Như vậy ta có:

$$TK_{\varepsilon} = X_1 \cdot TK_{\varepsilon_1} + X_2 \cdot TK_{\varepsilon_2} \quad (3-59)$$

Dựa vào công thức (3-59) ta có thể chỉ ra được quan hệ giữa  $\varepsilon$  của tổ hợp cách điện với nhiệt độ.



## Chương IV

# TỔN HAO TRONG ĐIỆN MÔI

### 4.1. KHÁI NIỆM VỀ TỔN HAO ĐIỆN MÔI

Khi điện trường tác động lên điện môi, trong điện môi xảy ra quá trình dịch chuyển các điện tích tự do và điện tích ràng buộc. Như vậy trong điện môi xuất hiện dòng điện dẫn và dòng điện phân cực, chúng tác động đến điện môi làm cho điện môi nóng lên, toả nhiệt và truyền nhiệt vào môi trường. Phần năng lượng nhiệt này không sinh ra công nên người ta thường gọi là *tổn hao điện môi*.

*Tổn hao điện môi là phần năng lượng phát sinh ra trong điện môi, trong một đơn vị thời gian làm cho điện môi nóng lên khi có điện trường bên ngoài tác động.*

Tổn hao năng lượng trong điện môi xảy ra dưới tác động của điện áp xoay chiều cũng như một chiều bởi vì trong vật liệu có dòng điện rò do điện dẫn gây ra. Khi ở điện áp một chiều trong điện môi không có sự phân cực theo chu kỳ, do đó năng lượng tiêu hao chỉ do dòng điện rò gây nên, nghĩa là chất lượng của vật liệu được xác định bằng điện trở suất của vật liệu đó. Nhưng với điện áp xoay chiều, ngoài dòng điện rò trong điện môi còn có dòng điện do phân cực gây nên, do đó ta phải dùng các đặc tính khác để xác định chất lượng vật liệu cách điện.

Có thể xác định trị số tổn hao điện môi trong vật liệu cách điện bằng giá trị công suất tản trong một đơn vị thể tích hoặc suất tổn hao điện môi.

Theo nguyên lý chung, tổn hao công suất trong vật mẫu hay trong bất kỳ khối vật liệu nào (với các điều kiện giống nhau) có trị số tỷ lệ với bình phương điện áp đặt vào vật thể.

Với nguồn điện áp một chiều đặt vào vật thể ta có công thức tính công suất tổn hao điện môi như sau:

$$P = R.I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (4-1)$$

Trong đó: R- đo bằng ôm ( $\Omega$ ); I- ampe (A); U- vôn (V).

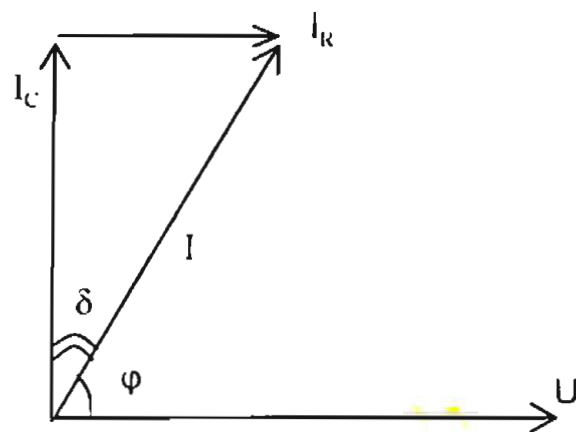
Khi điện áp xoay chiều với tần số  $\omega = 2\pi f$ , giữa dòng điện  $I$  và điện áp  $U$  có một góc lệch pha là  $\varphi$  (hình 4-1). Góc phụ với góc  $\varphi$  là góc  $\delta$  ( $\varphi + \delta = 90^\circ$ ) đồng thời cũng được gọi là góc tổn hao điện môi.

Tổn hao điện môi được tính như sau:

$$P = U.I.\cos \varphi = U.I_R = U.I_C.\text{tg}\delta = U.\frac{U}{X_C}.\text{tg}\delta = U^2.\omega.C.\text{tg}\delta.$$

Như vậy:  $P = U^2.\omega.C.\text{tg}\delta.$  (4-2)

Trong trường hợp điện môi lý tưởng, vectơ dòng điện trong sơ đồ thay thế điện môi sẽ vượt trước vectơ điện áp một góc là  $90^\circ$ . Khi đó góc  $\delta = 0$  và tổn hao điện môi  $p = 0$ , nghĩa là không sinh ra tổn hao điện môi. Công suất tiêu hao năng lượng để phát nhiệt càng lớn khi góc lệch pha giữa dòng điện và điện áp càng bé. Để xác định khả năng phát tán năng lượng của điện môi trong điện trường, người ta thường dùng góc tổn hao điện môi  $\delta$  và tang của góc đó ( $\text{tg}\delta$ ) theo công thức (4-2).



Hình 4-1. Góc tổn hao điện môi  $\delta$ .

Qua công thức ta thấy giá trị **tổn hao công suất tỷ lệ với  $\text{tg}\delta$  khi tần số và điện áp không đổi**. Vì vậy, khi nghiên cứu tổn hao điện môi của điện môi nào đó người ta thường đo **góc  $\delta$  hay  $\text{tg}\delta$**  để xác định tính chất của vật liệu. Giá trị  $\text{tg}\delta$  có thể xác định bằng các công thức sau:

$$\text{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} \tag{4-3}$$

hay:  $\text{tg}\delta = \frac{P}{Q}$  (4-4)

Với:  $Q$ - là công suất phản kháng.

Nếu so sánh hai loại điện môi có cùng kích thước với cùng kích thước điện cực thì chịu tác động cùng một giá trị điện áp, ta nhận được tỷ số công suất tổn hao năng lượng của hai loại điện môi đó như sau:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{U^2 \omega C_1 \text{tg}\delta_1}{U^2 \omega C_2 \text{tg}\delta_2} = \frac{C_0 \epsilon_1 \text{tg}\delta_1}{C_0 \epsilon_2 \text{tg}\delta_2} = \frac{\epsilon_1 \text{tg}\delta_1}{\epsilon_2 \text{tg}\delta_2}$$

Tổn hao điện môi thường có quan hệ với hằng số điện môi  $\epsilon$  và  $\text{tg}\delta$  của chất đó. Trị số của tích số  $\epsilon.\text{tg}\delta$  người ta gọi là **hệ số tổn hao điện môi**:

$$\epsilon' = \epsilon.\text{tg}\delta \tag{4-5}$$

**Hệ số tổn hao điện môi  $\varepsilon'$  cho ta khái niệm chính xác hơn khả năng phát nhiệt của điện môi so với  $tg\delta$ , vì  $\varepsilon'$  cho biết khả năng phân cực của điện môi ( $\varepsilon$ ) và giá trị tổn hao điện môi ( $tg\delta$ ).**

Khi điện môi có tổn hao điện môi lớn thì nhiệt độ phát nóng trong điện môi tăng dần lên, đến một lúc nào đó vượt quá mức cho phép sẽ làm cho điện môi bị phân hủy nhiệt và điện môi bị mất tính chất cách điện, mà ta gọi là **phóng điện do nhiệt gây nên**.

Nếu điện áp đặt lên điện môi không đủ lớn để tạo nên độ nóng quá mức cho phép do tổn hao điện môi gây ra thì trong trường hợp này tổn thất điện môi vẫn đưa đến những tác hại nghiêm trọng, ví dụ làm tăng điện dẫn của điện môi, các tham số của vật liệu thay đổi, sơ đồ mạch điện cũng thay đổi.

Do tổn hao điện môi liên quan trực tiếp tới sự phân cực điện môi, nên có thể xét tổn hao điện môi theo mối quan hệ giữa điện tích  $Q$  trên cực của tụ điện với điện áp tác dụng  $U$  (h.4-2). Khi tổn hao điện môi không phải do hiện tượng phân cực gây nên, điện tích phụ thuộc vào điện áp theo quan hệ đường thẳng (hình 4-2a). Trong trường hợp này thường xảy ra trong các điện môi trung tính có phân cực nhanh và không sinh ra tổn hao điện môi.

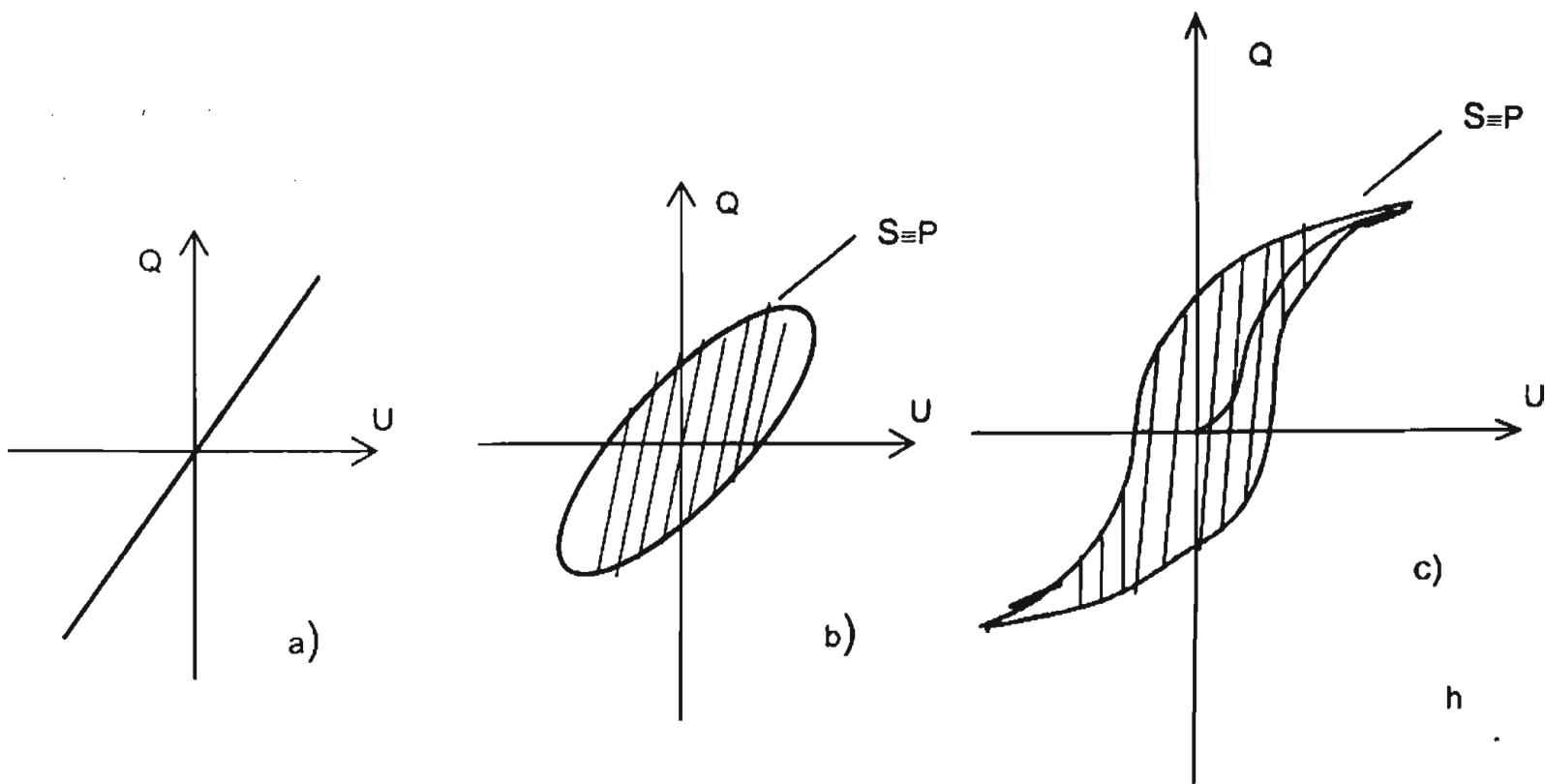
Nếu trong điện môi có hiện tượng phân cực chậm liên quan với tổn thất năng lượng thì đường cong quan hệ điện tích theo điện áp có dạng hình elíp (hình 4-2b). Diện tích của hình elíp ( $S$ ) tỷ lệ với năng lượng tiêu tổn trong điện môi, trong một chu kỳ biến đổi điện áp ( $P$ ):  $S \equiv P$ .

Trong trường hợp điện môi xécnhét, đường cong quan hệ điện tích theo điện áp có dạng đường cong từ trễ ở vật liệu từ (hình 4-2c). Trong trường hợp này, diện tích của chu trình tỷ lệ với tổn thất năng lượng trong một chu kỳ ( $S \equiv P$ ).

Khi xác định tổn hao điện môi của một mẫu vật liệu, trong thực tế thường xác định điện tích  $S$  của quan hệ giữa  $Q$  và  $U$ , sau đó so sánh với tổn hao của một vật mẫu.

Trong các vật liệu cách điện dùng trong thực tế, ngoài tổn thất do dòng điện rò và phân cực chậm còn xuất hiện các tổn hao khác làm ảnh hưởng đến các tính chất cách điện của điện môi. Các tổn hao điện môi này gây nên do sự tồn tại các tạp chất, bán dẫn, các ôxít sắt, cacbon, hơi ẩm v.v... trong điện môi. Chỉ với một hàm lượng nhỏ cũng có thể gây nên tổn hao điện môi lớn. Do vậy, trong quá trình công nghệ sản xuất vật liệu cần phải giữ đúng quy trình hạn chế tới mức thấp nhất sự tồn tại tạp chất trong vật liệu.

Ở điện áp cao khi vật liệu có chứa các bọt khí, tổn hao điện môi còn do sự ion hoá các chất khí. Sự ion hoá này càng mãnh liệt khi ở điện áp cao và tần số cao. Do vậy, khi chế tạo thiết bị điện áp cần phải loại trừ các bọt khí bên trong vật liệu cách điện.



Hình 4-2. Quan hệ  $Q = f(U)$ :

a) Điện môi không có tổn hao; b) Điện môi cực tính; c) Điện môi xét nhét.

## 4.2. CÁC DẠNG TỔN HAO TRONG ĐIỆN MÔI

Theo đặc điểm và bản chất vật lý có thể chia tổn hao điện môi thành bốn dạng chính sau đây;

- 1 - Tổn hao điện môi do dòng điện rò;
- 2 - Tổn hao điện môi do phân cực;
- 3 - Tổn hao điện môi do ion hoá;
- 4 - Tổn hao điện môi do cấu tạo không đồng nhất.

Sau đây ta xem xét đặc điểm của các dạng tổn hao nói trên.

### 4.2.1. Tổn hao điện môi do dòng điện rò

Trong điện môi kỹ thuật bao giờ cũng chứa các điện tích và điện tử tự do. Dưới tác dụng của điện trường các điện tích kể trên sẽ tham gia vào dòng điện dẫn (như chương II đã xét) và tạo nên dòng điện rò. Trong điện môi rắn có dòng điện rò đi trên bề mặt và trong khối điện môi, còn điện môi khí và lỏng chỉ có dòng điện khối. Nếu dòng điện rò lớn thì tổn hao trong điện môi có trị số đáng kể. Trị số tang của góc tổn hao điện môi trong trường hợp này có thể tính theo công thức:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{12}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho} \quad (4-6)$$

Trong đó:  $f$ - tần số của điện trường đo bằng Hz;  $\rho$ - điện trở suất ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ).

Tổn hao điện môi dạng này phụ thuộc vào tần số của điện trường. Tgđ giảm theo quy luật hyperbolic khi tần số tăng (xem công thức 4-6).

Khi nhiệt độ tăng lên, điện dẫn của điện môi sẽ tăng theo quy luật hàm số mũ, do vậy, tổn hao điện môi cũng tăng lên theo quy luật này:

$$p_T = A.e^{-\frac{b}{T}} \quad (4-7)$$

trong đó: A và b là các hằng số của vật liệu. Hoặc ta có:

$$p_t = p_0.e^{\alpha t} \quad (4-8)$$

Trong đó:  $p_t$  - tổn hao công suất ở nhiệt độ  $t^{\circ}\text{C}$ ;  $p_0$  - tổn thất ở nhiệt độ  $20^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  - hằng số mũ của vật liệu,  $t$  - nhiệt độ  $^{\circ}\text{C}$ .

Quan hệ giữa tgđ với tần số và nhiệt độ sẽ rõ hơn ở các phần sau của chương 4 này.

#### 4.2.2. Tổn hao điện môi do phân cực

Dạng tổn hao điện môi này thấy rõ ở các chất có phân cực chậm: trong các điện môi có cấu tạo lưỡng cực và điện môi có cấu tạo ion ràng buộc không chặt chẽ.

Tổn hao điện môi do phân cực chậm được gây nên bởi sự phá huỷ chuyển động nhiệt của các phân tử dưới tác động của cường độ điện trường. Sự phá huỷ này làm phát sinh năng lượng tiêu tán và điện môi bị phát nóng.

Tổn hao điện môi trong các điện môi cực tính tăng theo tần số của điện áp đặt lên điện môi và biểu hiện rõ rệt nhất ở tần số vô tuyến và tần số siêu cao. Khi ở các tần số cao, tổn hao điện môi có trị số lớn tới mức phá huỷ vật liệu. Do vậy, không nên dùng điện môi cực tính mạnh ở tần số cao trong kỹ thuật điện.

Quan hệ của tgđ với nhiệt độ của các điện môi cực tính có giá trị cực đại ở một nhiệt độ nào đó đặc trưng cho mỗi loại vật liệu. Ở nhiệt độ này thời gian phân cực chậm của phân tử điện môi gần trùng với chu kỳ biến đổi của điện trường xoay chiều đặt lên điện môi.

Nếu nhiệt độ có trị số sao cho thời gian phân cực chậm của phân tử lớn hơn thời gian nửa chu kỳ biến đổi điện áp xoay chiều một cách đáng kể, thì chuyển động nhiệt của phân tử sẽ yếu đi và tổn hao điện môi giảm. Nếu nhiệt độ có trị số sao cho thời gian phân cực lưỡng cực nhỏ hơn thời gian nửa chu kỳ biến đổi của điện áp một cách đáng kể thì cường độ chuyển động nhiệt sẽ lớn, mối liên kết giữa các phân tử giảm, do đó tổn hao điện môi cũng giảm.

Tổn hao điện môi trong chất xét-nhét liên quan tới hiện tượng phân cực ngẫu nhiên (phân cực tự phát). Do đó, tổn hao điện môi xét-nhét có trị số đáng kể ở nhiệt

độ thấp hơn điểm Quyri. Tổn hao điện môi dạng này tăng theo tần số của điện áp đặt lên điện môi. Ở nhiệt độ cao hơn điểm Quyri, tổn thất năng lượng trong điện môi xét-nhét giảm xuống. Sự hoá già về điện theo thời gian của điện môi xét-nhét cũng làm giảm tổn hao điện môi.

Trong các loại điện điện môi có tổn hao do phân cực cần phải kể đến hiện tượng gọi là tổn hao cộng hưởng biểu hiện ở tần số ánh sáng. Dạng tổn hao này thấy rõ trong một số chất khí khi ở một tần số xác định có sự hấp thụ năng lượng điện trường. Tổn hao cộng hưởng cũng có thể xảy ra ở chất rắn khi tần số dao động cưỡng bức do điện trường gây nên trùng với tần số dao động riêng của các hạt chất rắn. Sự tồn tại điểm cực đại trong quan hệ tgδ với tần số cũng đặc trưng cho cả cơ chế cộng hưởng, nhưng trong trường hợp này nhiệt độ không ảnh hưởng đến vị trí điểm cực đại.

### 4.2.3. Tổn hao điện môi do ion hoá

Tổn hao điện môi do ion hoá xảy ra trong các điện môi ở trạng thái khí. Dạng tổn hao này xuất hiện trong các điện trường không đồng nhất khi cường độ điện trường cao hơn trị số bắt đầu ion hoá của loại khí đó. Ví dụ: không khí ở xung quanh dây dẫn của đường dây tải điện trên không, điện áp cao, đầu cực của các thiết bị cao áp, bọt khí trong điện môi rắn hoặc lỏng khi chịu điện áp cao ...

Tổn hao do ion hoá có thể tính theo công thức sau:

$$p_i = A \cdot f(U-U_0)^3 \quad (4-9)$$

Trong đó: A- hằng số; f- tần số của điện trường; U- điện áp đặt vào;  $U_0$ - điện áp tương ứng với điểm bắt đầu ion hoá.

Trị số điện áp ion hoá  $U_0$  của các chất khí khác nhau thì cũng khác nhau. Trị số này phụ thuộc vào áp suất chất khí, khi áp suất tăng, trị số điện áp bắt đầu ion hoá tăng (xem chương V).

Quá trình ion hóa các phân tử khí sẽ tiếp thu một năng lượng điện trường làm cho nhiệt độ điện môi khí tăng lên và sinh ra tổn hao ion hoá. Khi bị ion hoá trong chất khí có thêm nhiều điện tích và điện tử tự do làm cho điện dẫn chất khí tăng lên, chúng góp phần tạo nên tổn hao điện môi lớn (như mục 1 của phần này).

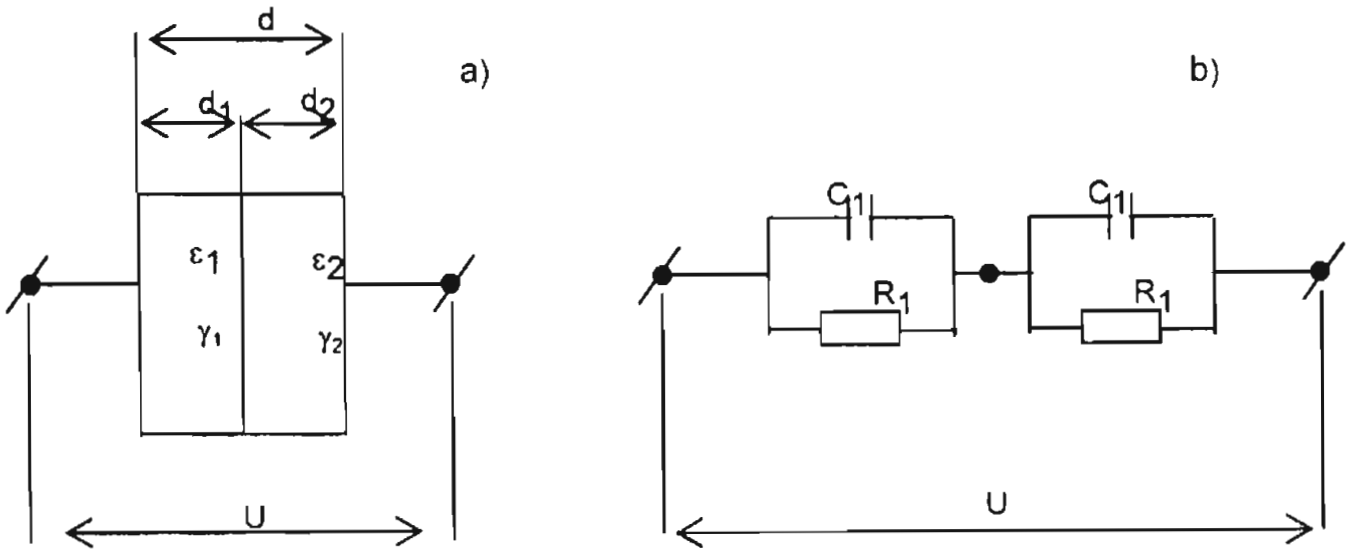
Một điều đáng chú ý và quan tâm đó là trong không khí có chứa ôxy ( $O_2$ ). Khi bị ion hoá  $O_2$  biến thành  $O_3$  (ôzôn), nó kết hợp với nitơ và nước thành axit nitric ( $HNO_3$ ). Nếu quá trình ion hoá liên tục thì nồng độ axit  $HNO_3$  sẽ tăng lên, có thể gây nên sự ăn mòn hoá học của vật liệu và làm cho thời gian phục vụ (tuổi thọ) của vật liệu giảm đi.

#### 4.2.4. Tổn hao điện môi do cấu tạo không đồng nhất

Loại tổn hao này có rất nhiều ý nghĩa trong thực tế, vì vật liệu cách điện của các thiết bị điện thường có cấu trúc không đồng nhất. Do tính chất đa dạng về cấu trúc và thành phần của vật liệu cách điện nên không thể có một công thức chung để tính toán tổn hao điện môi này.

Trong trường hợp đơn giản nhất có thể hình dung điện môi không đồng nhất dưới dạng hai lớp nối tiếp nhau (hình 4-3).

Trị số điện dung tương đương  $C_1$  và  $C_2$  phụ thuộc vào hằng số điện môi của các lớp này và kích thước hình học của chúng. Điện trở  $R_1$  và  $R_2$  được xác định



Hình 4-3. Sơ đồ điện môi mắc nối tiếp "a" và sơ đồ đẳng trị "b" thay thế điện môi.

bởi điện trở suất và kích thước hình học điện môi các lớp.

Phân tích sơ đồ hình 4-3b dễ dàng chỉ ra đại lượng  $\text{tg}\delta$  được xác định bởi công thức:

$$\text{tg}\delta = \frac{\omega^2 n + m}{\omega M + \omega^2 N} \quad (4-10)$$

Trong đó:

$$m = R_1 + R_2;$$

$$n = C_2^2 R_2^2 R_1 + C_1^2 R_1^2 R_2;$$

$$M = C_1 R_1^2 + C_2 R_2^2;$$

$$N = C_2^2 R_2^2 C_1 R_1^2 + C_1^2 R_1^2 C_2 R_2^2$$

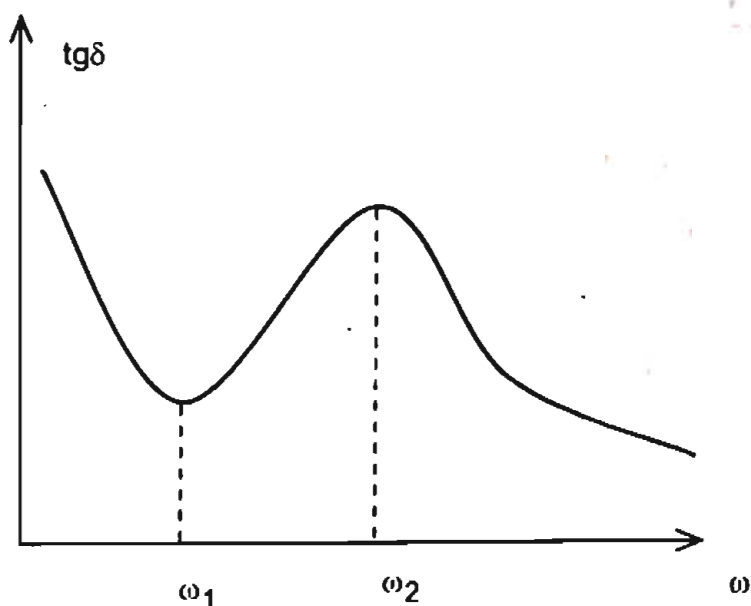
Trong trường hợp nếu  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  và  $C_2$  không phụ thuộc vào tần số, tổn hao chỉ do điện dẫn gây nên thì sau khi lấy đạo hàm theo tần số phương trình (4-10) và cho nó bằng không để giải, ta được biểu thức mà từ đó thấy rõ rằng  $\text{tg}\delta$  có cực tiểu

và cực đại trong quan hệ của  $\text{tg}\delta$  vào tần số. Điều này thấy ở hình (4-4). Giá trị cực đại của  $\text{tg}\delta$  quan sát thấy ở tần số  $\omega_2$ :

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{Mn - 3Nm + \sqrt{\Delta}}{2Nn}} \quad (4-11)$$

Cực tiểu ở tần số  $\omega_1$ :

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{Mn - 3Nm - \sqrt{\Delta}}{2Nn}} \quad (4-12)$$



Hình 4-4. Quan hệ  $\text{tg}\delta = f(\omega)$ .

Trong đó:  $\Delta = (Mn - 3Nm)^2 - 4MNmn$ .

Trị số  $\text{tg}\delta$  của điện môi nhiều lớp khi các lớp mắc nối tiếp có thể tính sơ bộ bằng công thức sau:

$$\text{tg}\delta = \frac{\sum_{i=2}^N C_i \text{tg}\delta_i}{\sum_{i=2}^N C_i} \quad (4-13)$$

trong đó:  $\text{tg}\delta_i$  - tang góc tổn hao điện môi của các lớp tương ứng với tần số đã cho.

### 4.3. TỔN HAO ĐIỆN MÔI TRONG CÁC SƠ ĐỒ THAY THẾ

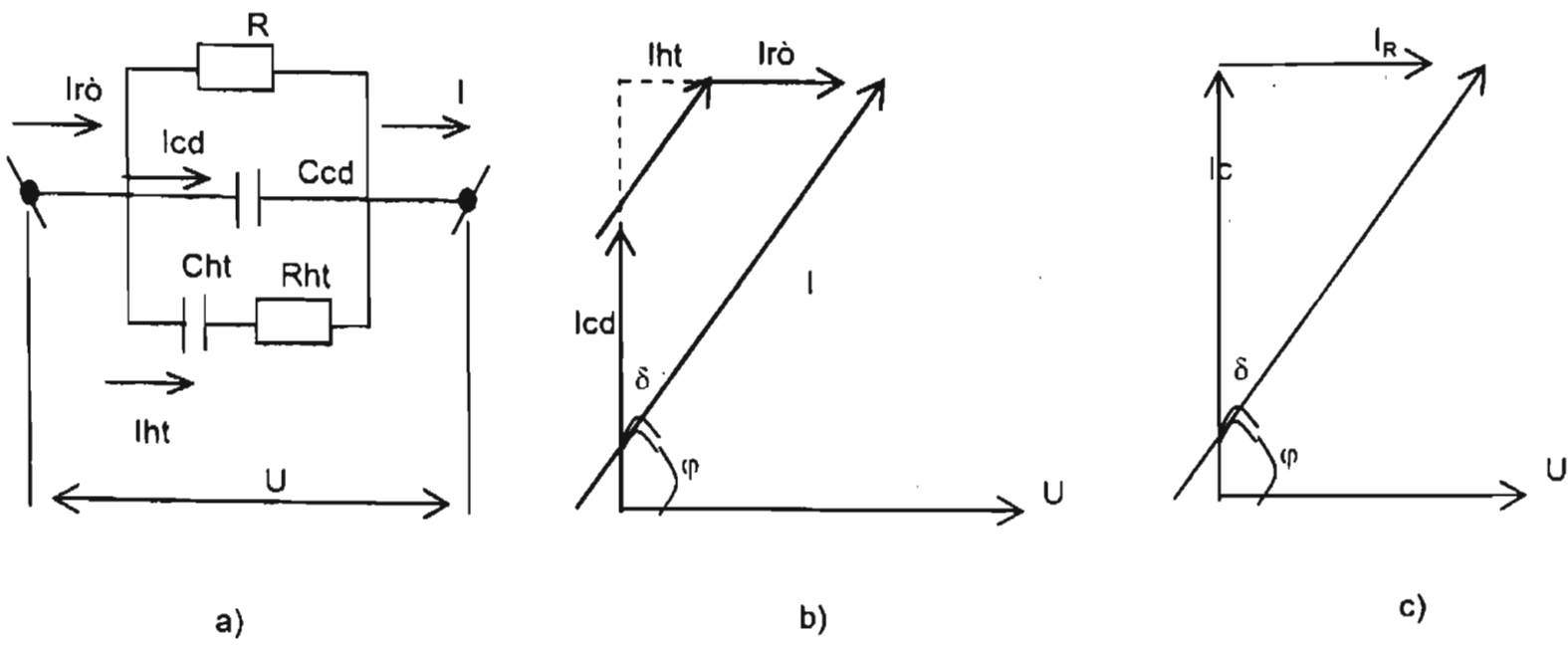
Khi đặt điện áp lên điện môi trong điện môi thường xuất hiện ba loại dòng điện, đó là: dòng điện rò ( $I_{r\grave{o}}$ ), dòng điện chuyển dịch do phân cực nhanh ( $I_{c\grave{d}}$ ) và dòng điện hấp thụ do phân cực chậm ( $I_{h\grave{t}}$ ). Như vậy:

$$I = I_{r\grave{o}} + I_{c\grave{d}} + I_{h\grave{t}} \quad (4-14)$$

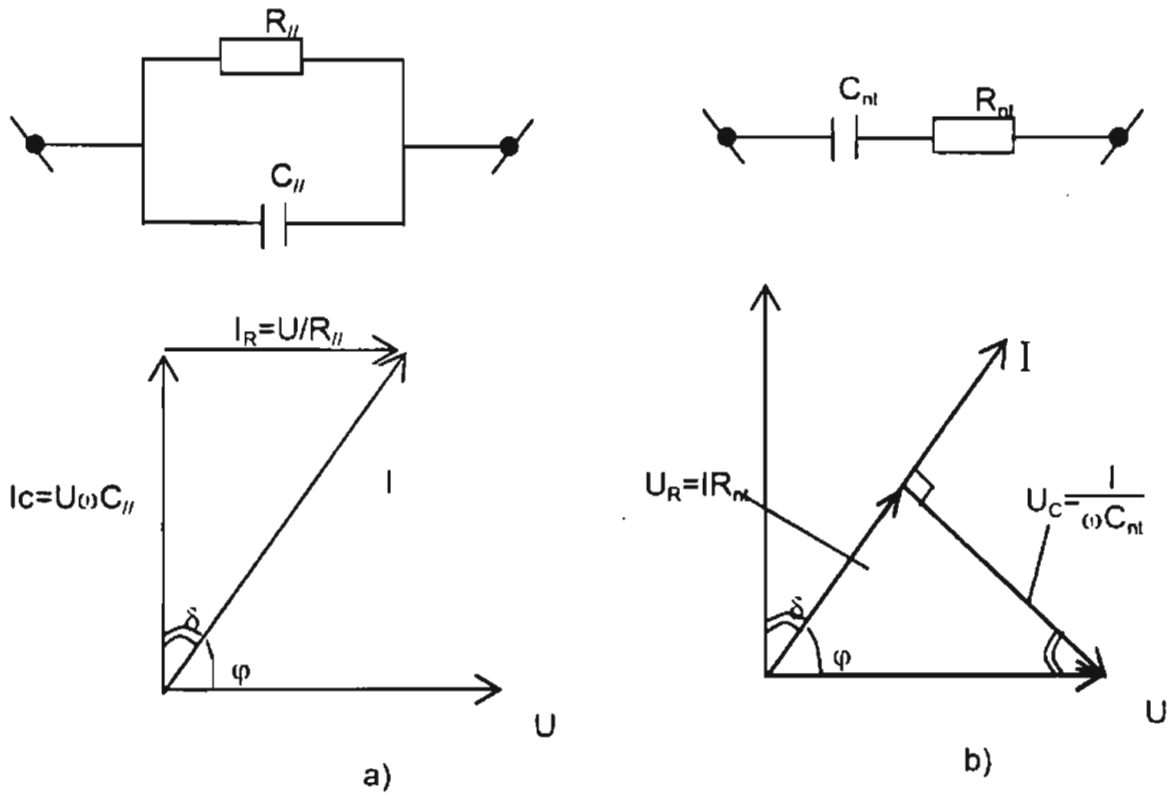
Khi điện môi đặt dưới điện áp một chiều thì dòng điện phân cực chỉ xảy ra khi đóng hay ngắt nguồn điện, cho nên tổn hao điện môi chủ yếu là do dòng điện rò ( $I_{r\grave{o}}$ ) gây nên. Nhưng khi điện áp xoay chiều, dòng điện phân cực và dòng điện rò có suốt trong thời gian đặt điện áp. Khi đó tổn hao điện môi vừa do dòng điện rò và vừa do dòng điện phân cực gây nên.

Dựa vào tính chất trên trong tính toán ta có thể thay thế điện môi bằng sơ đồ mắc song song điện trở và điện dung (hình 4-5a) và biểu đồ véc tơ giữa điện áp và dòng điện (hình 4-5b,c) như sau:





Hình 4-5. Sơ đồ thay thế điện môi a) và biểu đồ véc tơ giữa điện áp và dòng điện b), c).



Hình 4-6. a) Sơ đồ mắc song song  $R_{II}$  với  $C_{II}$ ;

b) Sơ đồ mắc nối tiếp  $R_{nI}$  với  $C_{nI}$ .

Do yêu cầu và mục đích tính toán, điện môi có tổn hao có thể biểu diễn bằng các sơ đồ thay thế hoặc song song, hoặc nối tiếp một tụ điện với một điện trở tương đương. Trong thực tế: khi có điện áp cần phải tính dòng điện  $I_R$  và  $I_C$  ta dùng sơ đồ song song; khi có dòng điện cần phải tính điện áp  $U_R$ ,  $U_C$  ta dùng sơ đồ nối tiếp.

Dùng sơ đồ thay thế sẽ cho phép giải thích các quá trình xảy ra trong điện môi (tổn hao, phân cực, v.v...), đồng thời còn mô hình hoá điện môi trên các sơ đồ điện. Cần lưu ý rằng, việc chọn sơ đồ và các tham số của sơ đồ mang tính chất chủ quan và nói chung phụ thuộc vào bài toán cụ thể cần giải quyết miễn sao các kết

quả thu được phản ánh đúng thực chất của các hiện tượng vật lý xảy ra trong điện môi.

Sơ đồ thay thế điện môi gồm hai thành phần: điện dung C và điện trở R. Các sơ đồ thay thế được chọn cần phải thoả mãn hai điều kiện, đó là:

Công suất tổn hao trong sơ đồ phải bằng công suất tiêu hao trong điện môi.

Góc lệch pha giữa dòng điện và điện áp của sơ đồ phải bằng góc lệch pha trong thực tế điện môi khi có cùng điện áp và tần số. Như vậy:  $\text{tg}\delta_{\text{sơ đồ}} = \text{tg}\delta_{\text{thực tế}}$ .

Tồn tại hai sơ đồ đơn giản là sơ đồ đấu song song hai phần tử  $R_{\parallel}$ ,  $C_{\parallel}$  và sơ đồ nối tiếp hai phần tử  $C_{\text{nt}}$ ,  $R_{\text{nt}}$  (hình 4-6a,b).

\* Trong sơ đồ mắc song song  $R_{\parallel}$  với  $C_{\parallel}$  (hình 4-6a) ta có:

$$\text{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega C_{\parallel} R_{\parallel}} = \frac{g}{b} \quad (4-15)$$

với: 
$$g = \frac{1}{R_{\parallel}}; b = \omega C_{\parallel}.$$

Như vậy ở đây  $\text{tg}\delta$  sẽ giảm đi khi tần số tăng lên. Công suất tổn hao được tính:

$$P_{\parallel} = U \cdot I \cdot \cos\varphi = U^2 \cdot g = U^2 \cdot b \cdot \text{tg}\delta = U^2 \cdot \omega \cdot c \cdot \text{tg}\delta \quad (4-16)$$

• Ở sơ đồ mắc nối tiếp  $C_{\text{nt}}$  với  $R_{\text{nt}}$  (hình 4-6b), ta có:

$$\text{tg}\delta = \frac{U_R}{U_C} = \omega \cdot C_{\text{nt}} \cdot R_{\text{nt}} = \frac{R_{\text{nt}}}{X_{\text{nt}}} \quad (4-17)$$

Với  $X_{\text{nt}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{nt}}}$ . Như vậy  $\text{tg}\delta$  phụ thuộc tuyến tính với tần số  $\omega$  của điện áp.

Công suất tổn hao trong sơ đồ này được tính:

$$P_{\text{nt}} = U^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{nt}} \cdot \text{tg}\delta = I^2 \cdot R_{\text{nt}}. \quad (4-18)$$

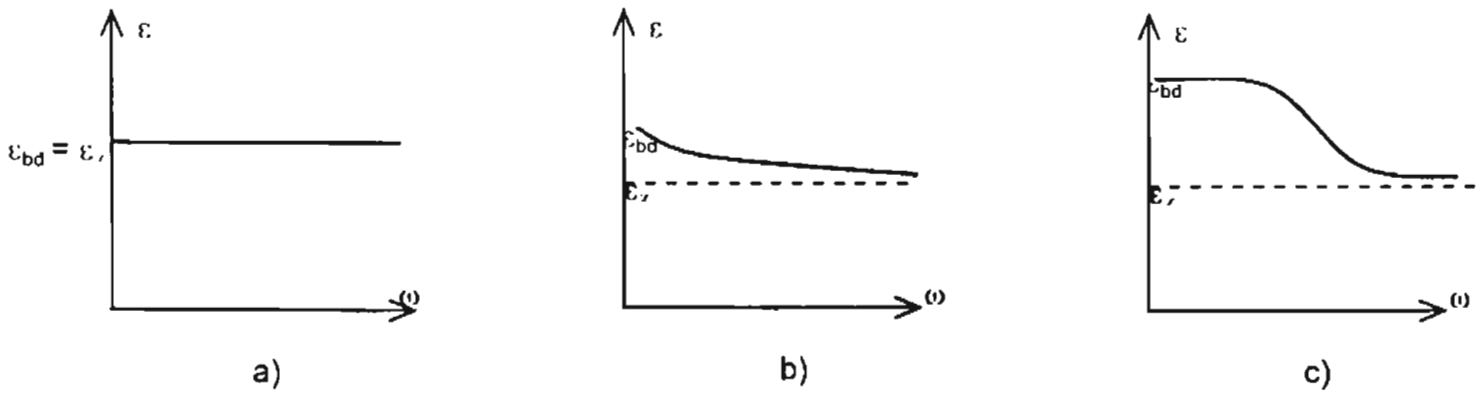
Từ điều kiện tương đương của hai sơ đồ  $P_{\parallel} = P_{\text{nt}} = P$  và  $\text{tg}\delta_{\text{sơ đồ}} = \text{tg}\delta_{\text{thực tế}}$ , khi cần chuyển đổi sơ đồ nối tiếp sang sơ đồ song song hay ngược lại thì các tham số điện dung và điện trở được tính bằng công thức chuyển đổi sau:

$$\begin{cases} C_{\parallel} = \frac{C_{\text{nt}}}{1 + \text{tg}^2\delta} \\ R_{\parallel} = R_{\text{nt}} \left( 1 + \frac{1}{\text{tg}^2\delta} \right) \end{cases} \quad (4-19)$$

#### 4.4. NHỮNG YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG TỚI TỔN HAO ĐIỆN MÔI

Trước khi nghiên cứu tổn hao điện môi của các điện môi ở trạng thái khí, lỏng và rắn, chúng ta xét những yếu tố ảnh hưởng tới tổn hao điện môi tgδ áp dụng cho cả ba trạng thái nói trên.

Trên thực tế có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng tới tổn hao điện môi. Nhưng chúng ta thấy có 4 yếu tố quan trọng nhất đó là:



Hình 4-7. a) Quan hệ  $\varepsilon = f(\omega)$  của điện môi trung tính.  
 b) Quan hệ  $\varepsilon = f(\omega)$  của điện môi cực tính yếu.  
 c) Quan hệ  $\varepsilon = f(\omega)$  của điện môi cực tính mạnh.

- Tần số của điện trường:  $\omega = 2\pi f$ .
- Nhiệt độ làm việc của điện môi.
- Độ ẩm của điện môi và môi trường.
- Trị số điện áp hay cường độ điện trường tác dụng lên điện môi.

Ở trong chương III, khi xét sự phân cực của điện môi ta có quan hệ hằng số điện môi với tần số được biểu diễn ở hình 4-7.

Trong đó:  $\varepsilon_{bd}$  - hằng số điện môi đo ở tần số thấp (một chiều).

$\varepsilon_{\infty}$  - hằng số điện môi đo ở tần số cao vô cùng.

Như các phần trên đã phân tích, tổn hao điện môi của một điện môi nào đó thường là do dòng điện dẫn ( $\gamma$ ) và sự phân cực ( $\varepsilon$ ) gây nên. Do vậy, chúng ta có công thức tính tổn hao điện môi tgδ như sau:

$$\text{tg}\delta = \frac{\frac{\gamma}{\varepsilon_0 \omega} + \frac{\varepsilon_{bd} - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \theta^2} \cdot \omega \theta}{\varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{bd} - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \theta^2}}; \quad (4-20)$$

Trong đó:  $\gamma$  - điện dẫn của điện môi ;

$\varepsilon_0$  - hằng số điện môi tuyệt đối, ( $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ F/m}$ );

$\theta$ - thời gian tích thoát năng lượng.

$$\theta = \tau \cdot \frac{\epsilon_{bd} + 2}{\epsilon_{\infty} + 2}; \quad \tau = \frac{e^{w_0/KT}}{2\nu}; \quad \nu - \text{hệ số khúc xạ ánh sáng.}$$

Từ đây ta có:  $\theta$  tương đương với nhiệt độ ( $\theta \equiv t^0c$ )

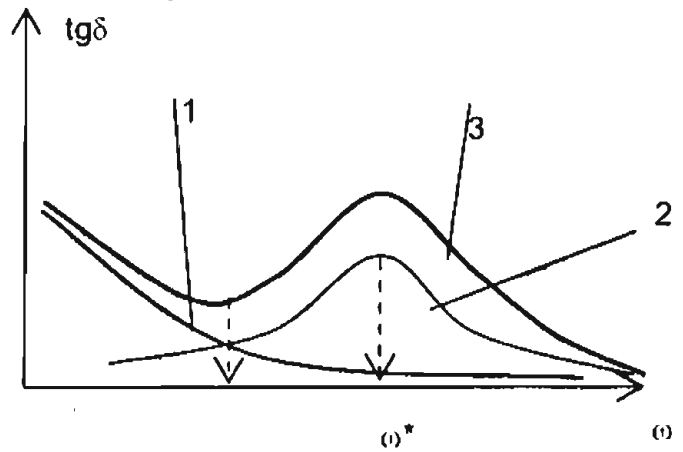
Theo công thức (4-20) chúng ta đi xét quan hệ  $tg\delta$  với tần số và nhiệt độ.

#### 4.4.1. Ảnh hưởng của tần số điện trường tới tổn hao điện môi $tg\delta$

Để xét ảnh hưởng của tần số tới tổn hao điện môi, chúng ta phải đưa ra quan hệ  $tg\delta = f(\omega)$  khi nhiệt độ không đổi ( $T = \text{const}$ ).

##### a) Điện môi trung tính và cực tính yếu

Đối với điện môi trung tính hoặc có cấu trúc đối xứng ta có:  $\epsilon_{bd} = \epsilon_{\infty}$ , còn điện môi cực tính yếu thì  $\epsilon_{bd} \approx \epsilon_{\infty}$  (xem hình 4-7a,b) vì phân cực lưỡng cực không có hay có cũng không đáng kể. Do vậy,  $\epsilon_{bd} - \epsilon_{\infty} \approx 0$ . Khi đó công thức (4-20) có thể viết:



Hình 4-8. Quan hệ  $tg\delta = f(\omega)$ .

$$tg\delta = \frac{\gamma}{\epsilon_{(1)}\epsilon_{\infty}\omega} \quad (4-21)$$

Qua công thức (4-21) ta thấy: tổn hao điện môi  $tg\delta$  là do dòng điện dẫn  $\gamma$  gây nên. Vì nhiệt độ không thay đổi nên điện dẫn cũng không đổi, cho nên quan hệ giữa  $tg\delta$  với tần số có dạng của đường cong hypecbol, tức là  $tg\delta$  sẽ giảm đi khi tần số tăng (đường 1 của hình 4-8).

Trong thực tế có tồn tại điện môi mà tổn hao điện môi các dạng phân cực chậm gây nên nhỏ hơn rất nhiều so với tổn hao điện môi do dòng điện dẫn, mặc dù  $\epsilon_{bd} - \epsilon_{\infty} \neq 0$ . Ta có thể bỏ qua thành phần phân cực trong công thức (4-20) nên:  $tg\delta = \frac{\gamma}{\epsilon_{(1)}\epsilon_{\infty}\omega}$  và có quan hệ  $tg\delta = f(\omega)$  như đường "1" của hình (4-8).

##### b) Điện môi cực tính mạnh khi có dòng điện dẫn nhỏ

Những điện môi cực tính mạnh có đặc điểm là tổn hao điện môi do dòng điện dẫn nhỏ hơn nhiều so với tổn hao do phân cực lưỡng cực gây nên. Do vậy, trong công thức (4-20) ta có thể bỏ qua thành phần chứa dòng điện dẫn  $\gamma$ . Suy ra:

$$tg\delta = \frac{(\epsilon_{bd} - \epsilon_{\infty})\omega\theta}{\epsilon_{bd} + \epsilon_{\infty}\omega^2\theta^2} \quad (4-22)$$

Để vẽ được quan hệ  $\text{tg}\delta = f(\omega)$  của công thức (4-22) ta phải đi khảo sát hàm số này. Song việc khảo sát và vẽ quan hệ  $\text{tg}\delta = f(\omega)$  phức tạp. Cho nên để đơn giản ta có thể suy luận như sau:

Miền xác định của hàm số công thức (4-22) là  $\omega = 0 \div \infty$ . Như vậy, trong quan hệ  $\text{tg}\delta$  với  $\omega$  sẽ là một đường liên tục khi  $\omega$  thay đổi từ "0" đến " $\infty$ ".

Trong miền tần số thấp  $\omega\theta \ll 1$  và tính rằng  $\epsilon_{hd}$  và  $\epsilon_\infty$  có cùng một thứ tự, có thể không tính đến thành phần có chứa  $\omega^2$  ở mẫu số. Khi đó:

$$\text{tg}\delta \approx \frac{\epsilon_{hd} - \epsilon_\infty}{\epsilon_{hd}} \omega\theta.$$

Tức là  $\text{tg}\delta$  sẽ tăng lên khi tần số tăng.

Trong miền tần số cao có thể bỏ qua thành phần  $\epsilon_{hd}$  ở mẫu số vì:  $\epsilon_{hd} \ll \epsilon_\infty \cdot \omega^2\theta^2$ . Khi đó:  $\text{tg}\delta \approx \frac{\epsilon_{hd} - \epsilon_\infty}{\epsilon_\infty \cdot \omega\theta}$  tức là  $\text{tg}\delta$  sẽ giảm khi tần số tăng.

Như vậy, khi tần số tăng  $\text{tg}\delta$  lúc đầu sẽ tăng lên, sau đó lại giảm đi khi tần số tăng cao. Và lại, đồ thị  $\text{tg}\delta = f(\omega)$  là một đường liên tục, cho nên quan hệ của  $\text{tg}\delta$  với tần số của công thức (4-22) sẽ đạt cực đại tại một vị trí  $\omega_*$  nào đó (đường 2 của hình 4-8).

Thực tế trong tính toán điều kiện để  $\text{tg}\delta$  đạt trị số cực đại ( $\text{tg}\delta_{\max}$ ) khi có điều kiện sau:

$$\omega_*\theta = 1 \tag{4-23}$$

Nghĩa là:

$$\omega_* = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{\epsilon_{bd}}{\epsilon_\infty}} \tag{4-24}$$

Khi đó ta có:

$$\text{tg}\delta_{\max} = \frac{\epsilon_{bd} - \epsilon_\infty}{2\sqrt{\epsilon_{bd} \cdot \epsilon_\infty}} \tag{4-25}$$

Khi sử dụng vật liệu cực tính chúng ta tránh sử dụng ở miền tần số gần với  $\omega_*$ , vì ở tần số  $\omega_*$  có sự cộng hưởng làm cho tổn hao điện môi lớn và có thể gây nên sự phá huỷ vật liệu.

**c) Điện môi cực tính mạnh có điện dân cao và phân cực lưỡng cực mạnh**

Đối với điện môi cực tính mạnh mà đặc trưng bởi dòng điện dẫn cao và phân cực lưỡng cực mạnh thì tổn hao điện môi được tạo nên bởi hai thành phần trên. Khi đó, ta có quan hệ giữa tổn hao điện môi  $\text{tg}\delta$  với tần số sẽ là tổng của hai đồ thị 1 và 2 nói trên (đường 3 của hình 4-8).

Theo đường 3 của hình (4-8) ta thấy: khi tần số tăng, lúc đầu  $\text{tg}\delta$  giảm đến cực tiểu, sau đó tăng lên đến điểm cực đại và sau cùng lại giảm đi khi tần số tăng cao. Điều này có thể giải thích như sau:

Khi tần số thấp, mặc dù phân cực có xảy ra trọn vẹn, nhưng số lần xoay hướng của các phân tử lưỡng cực ít, nên tổn hao điện môi do phân cực bé. Tổn hao điện môi ở miền tần số thấp chủ yếu là do dòng điện dẫn cho nên nó giảm khi tần số tăng (xem mục a). Nếu tần số tăng thì số lần xoay hướng của các phân tử lưỡng cực tăng, năng lượng dùng cho phân cực lưỡng cực tăng lên cho nên tổn hao điện môi cũng tăng và đạt cực đại ở tần số cộng hưởng ( $\omega_*$ ). Nhưng khi tần số tăng quá cao, dù số lần xoay hướng có nhiều song do phân cực xảy ra không trọn vẹn, hằng số điện môi bé ( $\epsilon_\infty$ ) nên tổn hao điện  $\text{tg}\delta$  sẽ giảm đi.

Điểm cực đại của quan hệ  $\text{tg}\delta = f(\omega)$  ứng với trạng thái vật lý của điện môi khi có sự cộng hưởng hai dao động là dao động của tần số điện trường và dao động nhiệt.

Quan hệ của  $\text{tg}\delta$  với tần số ứng với các nhiệt độ khác nhau của chất lỏng cực tính được biểu diễn ở hình 4-9.

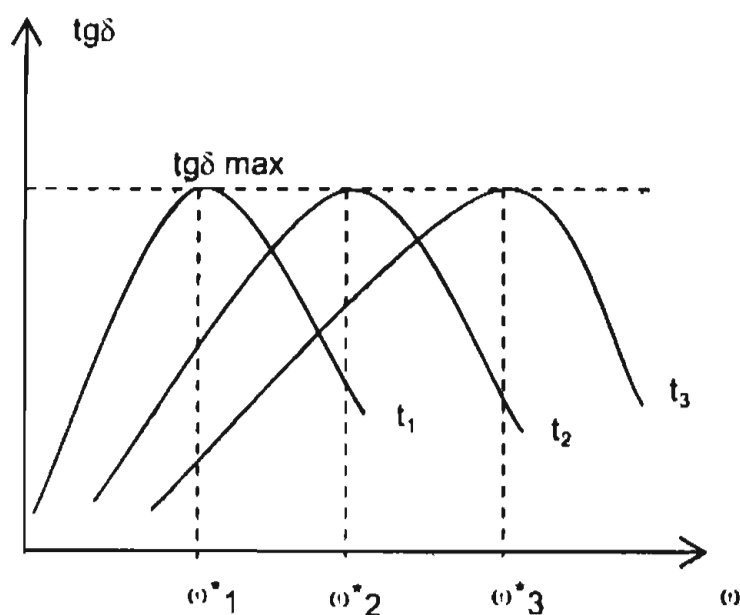
Quan hệ  $\text{tg}\delta$  với tần số ở các nhiệt độ  $t_1, t_2, t_3$  ( $t_1 < t_2 < t_3$ ) có các trị số  $\text{tg}\delta_{\text{max}}$  hầu như không đổi ứng với các tần số  $\omega_{*1}, \omega_{*2}, \omega_{*3}$ , ( $\omega_{*3} > \omega_{*2} > \omega_{*1}$ ). Điều này có thể giải thích bằng công thức tính  $\text{tg}\delta_{\text{max}}$ :

$$\text{tg}\delta_{\text{max}} = \frac{C_{\text{ht}}}{2\sqrt{(C_o + C_{\text{ht}})C_o}} \quad (4-26)$$

Trị số này không phụ thuộc vào tần số  $\omega$ . Mặt khác, vì nhiệt độ của điện môi tăng  $t_3 > t_2 > t_1$ , để có sự cộng hưởng thì tần số của điện trường phải tăng.

#### 4.4.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ tới tổn hao điện môi

Trong thực tế khi nghiên cứu tổn hao điện môi chúng ta thấy yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng tới tổn hao điện môi đó là nhiệt độ môi trường làm việc của điện môi. Khi nhiệt độ điện môi thay đổi sẽ làm cho các tính chất của điện môi thay đổi.



Hình 4-9. Quan hệ  $\text{tg}\delta = f(\omega)$  với  $t_3 > t_2 > t_1$ .

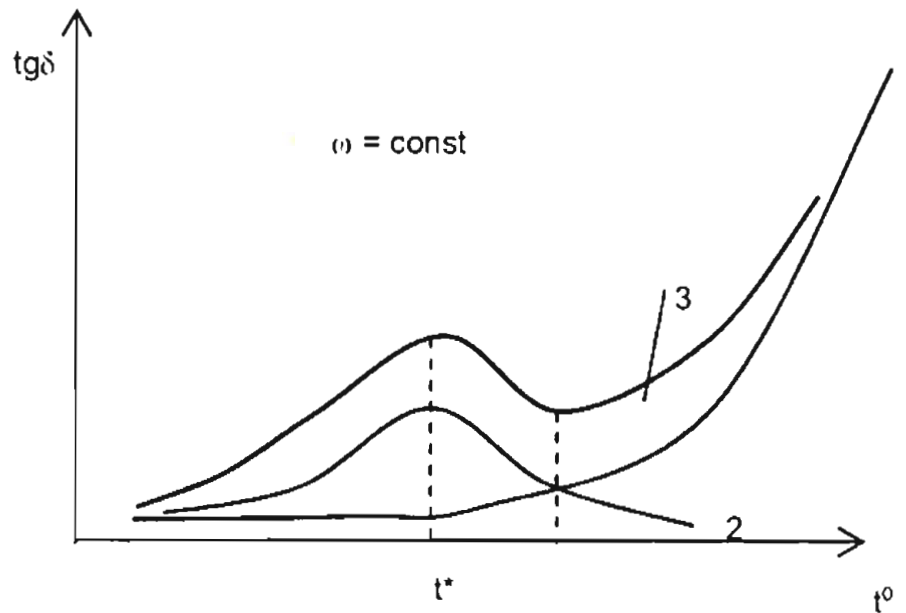
Để xét ảnh hưởng của nhiệt độ tới tổn hao điện môi tgδ, chúng ta sử dụng phương trình (4-20) đã nêu ở trên. Cũng tương tự như đối với tần số, hiện tại ta xét quan hệ giữa tổn hao điện môi tgδ với nhiệt độ khi tần số không thay đổi ( $\omega = \text{const}$ ) trong các điện môi khác nhau.

**a) Điện môi trung tính và cực tính yếu**

Trong các điện môi này có  $\epsilon_{bd} \approx \epsilon_{\infty}$ , tổn hao điện môi chủ yếu là do dòng điện dẫn gây nên. Do vậy, công thức (4-20) có thể viết dưới dạng:

$$\text{tg}\delta = \frac{\gamma}{\epsilon_0 \epsilon_{\infty} \omega} = \frac{\gamma_0 e^{\alpha t}}{\epsilon_0 \epsilon_{\infty} \omega} = A \cdot e^{\alpha t} \quad (4-27)$$

Vì điện dẫn của điện môi phụ thuộc vào nhiệt độ  $\gamma = \gamma_0 e^{\alpha t}$ , (xem chương II - Điện dẫn của điện môi), cho nên tổn hao điện môi sẽ tăng lên theo hàm số mũ khi mà nhiệt độ tăng. Đồ thị quan hệ tgδ với nhiệt độ trong trường hợp này là đường "1" của hình 4-10.



Hình 4-10. Quan hệ  $\text{tg}\delta = f(t^\circ)$  khi  $\omega = \text{const}$ .

**b) Điện môi cực tính mạnh khi có dòng điện dẫn nhỏ**

Do có dòng điện dẫn nhỏ không đáng kể, nên trong trường hợp này tổn hao điện môi chủ yếu là do phân cực lưỡng cực gây nên. Vì vậy, ta có công thức tính tổn hao điện môi cũng chính là công thức (4-22):

$$\text{tg}\delta = \frac{(\epsilon_{bd} - \epsilon_{\infty})\omega\theta}{\epsilon_{bd} + \epsilon_{\infty}\omega^2\theta^2}$$

Như ở trên đã nêu,  $\theta$  tương đương với nhiệt độ  $t^\circ$  ( $\theta \equiv t^\circ$ ), tức là khi nhiệt độ tăng thì  $\theta$  cũng tăng theo tuyến tính và ngược lại. Do đó, quan hệ giữa tgδ với nhiệt độ chính là quan hệ giữa tgδ với  $\theta$ , biểu diễn bằng công thức 4-22.

Theo (4-22), tương tự như đối với tần số, lúc này vai trò của  $\omega$  là  $\theta$  hay cũng là nhiệt độ  $t^\circ$ , ta có quan hệ giữa tổn hao điện môi tgδ với nhiệt độ là đường 2 của hình 4-10.

**c) Điện môi cực tính mạnh có điện dẫn cao và phân cực lưỡng cực mạnh**

Những điện môi mà có tổn hao điện môi do cả dòng điện dẫn và phân cực lưỡng cực gây nên theo công thức (4-20) thì quan hệ giữa tgδ với nhiệt độ được biểu diễn bằng đường “3” là tổng của hai đường “1” và “2” nói trên (hình 4-10).

Theo đường “3” của hình 4-10 ta có thể giải thích như sau:

Trong miền nhiệt độ thấp, năng lượng chuyển động nhiệt của các phân tử sẽ thấp, tgδ tăng chậm khi nhiệt độ tăng.

Khi nhiệt độ tăng thì chuyển động nhiệt của các phân tử tăng lên, điện môi có sự giãn nở nhiệt, khoảng cách giữa các phân tử điện môi tăng lên, do vậy, lực liên kết giữa các phân tử giảm đi và dẫn đến sự xoay hướng của các phân tử lưỡng cực sẽ dễ dàng hơn. Tổn hao điện môi sẽ tăng lên đến cực đại tại nhiệt độ  $t_*$ . Đối với mỗi loại điện môi khác nhau thì nhiệt độ  $t_*$  mà ở đó có tgδ cực đại cũng khác nhau.

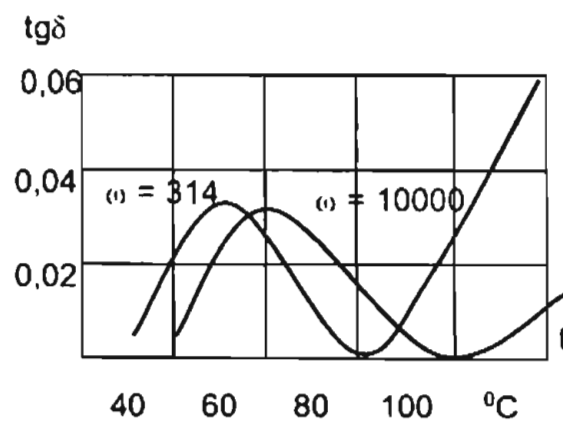
Với sự tăng của nhiệt độ (ở vùng nhiệt độ cao), thời gian tích thoát năng lượng của phân tử điện môi giảm nhanh ( $\theta \approx \frac{w_0}{e^{kT}} \cdot \frac{1}{2v}$ ). Khi đó chuyển động nhiệt khá lớn và nó làm cản trở sự xoay hướng của các phân tử lưỡng cực, do vậy tgδ sẽ giảm đi.

Khi tiếp tục tăng nhiệt độ (ở miền nhiệt độ quá cao), điện môi sẽ bị thay đổi cấu trúc và trạng thái, điện dẫn trong điện môi tăng cao nên tgδ cũng tăng mạnh và có thể dẫn đến phá hủy điện môi.

Ví dụ minh chứng về quan hệ giữa tgδ với nhiệt độ của nhựa thông (colofan) ở các tần số khác nhau được đưa ra ở hình 4-11.

Nếu điện môi là hợp chất của hai hay nhiều thành phần thì quan hệ tgδ với nhiệt có thể có hai hay nhiều điểm cực đại; điều đó là do ảnh hưởng của các thành phần trong hợp chất ở các nhiệt độ khác nhau.

Khi nhiệt độ tăng ta thấy sự dịch chuyển điểm cực đại của tgδ khi tần số tăng cao hơn. Tương tự như khi tăng tần số của điện áp xoay chiều, điểm cực đại tương ứng của quan hệ tgδ với nhiệt độ chuyển dịch về hướng nhiệt độ cao hơn.



**Hình 4-11. Quan hệ tgδ với nhiệt độ ở các tần số khác nhau của nhựa thông.**



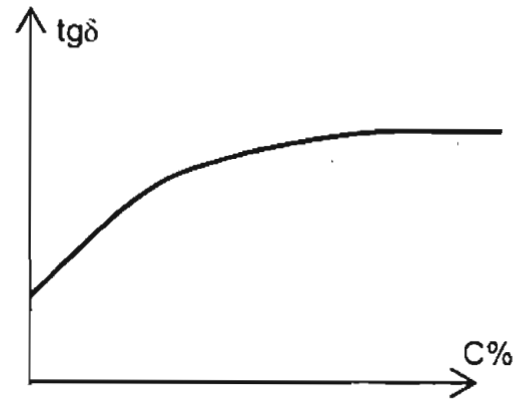
### 4.4.3. Ảnh hưởng của độ ẩm tới tổn hao điện môi

Khi điện môi ở trong môi trường có độ ẩm  $\varphi\%$  nào đó, sau một thời gian điện môi sẽ bị ngấm ẩm; bên trong điện môi hấp thụ một lượng nước nhất định ( $C\%$ ). Nếu độ ẩm môi trường tăng lên thì độ ẩm bên trong điện môi cũng tăng lên. Những điện môi không ngấm nước, tức là không cho hơi nước và nước đi vào bên trong, khi ở trong môi trường có độ ẩm cao sẽ xảy ra hiện tượng ngưng đọng trên bề mặt một lượng nước. Hiện tượng này thường gọi là sự hấp phụ hơi nước của điện môi.

Khi bị hấp thụ và hấp phụ một lượng nước, điện môi sẽ thay đổi các tính chất cách điện so với ban đầu. Điện dẫn khối và điện dẫn mặt của điện môi sẽ tăng lên và làm cho tổn hao điện môi cũng tăng lên. Nguy hiểm nhất là khi độ ẩm cao và nhiệt độ cao, tổn hao điện môi tgđ có trị số rất lớn, có thể gây nên sự phá hủy điện môi.

Quan hệ giữa tổn hao điện môi với độ ẩm  $C\%$  được biểu diễn trên hình 4-12.

Như vậy có thể nói, khi độ ẩm của điện môi hay môi trường tăng lên sẽ làm giảm các tính chất cách điện của điện môi. Để hạn chế sự hấp thụ và hấp phụ nước vào vật liệu cách điện, trong công nghệ chế tạo thiết bị điện người ta thường dùng biện pháp sấy và tẩm bằng các loại vật liệu chống ẩm.



Hình 4-12. Quan hệ tổn hao điện môi với độ ẩm.

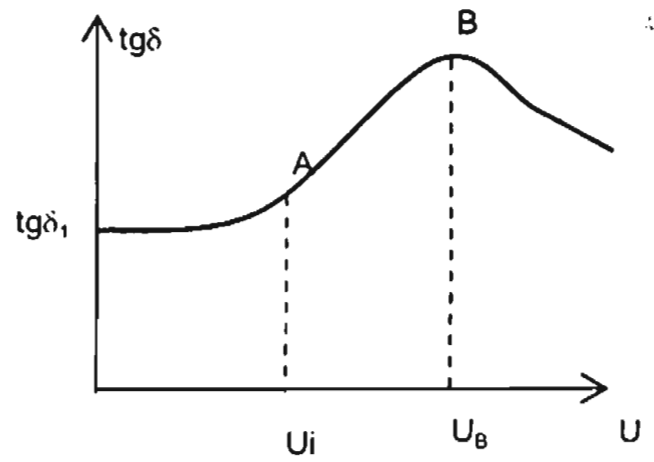
### 4.4.4. Ảnh hưởng của điện áp tới tổn hao điện môi

Để đánh giá chất lượng của vật liệu cách điện, trong nhiều trường hợp cần phải nghiên cứu quan hệ tổn hao điện môi với trị số điện áp đặt lên vật liệu. Việc nghiên cứu này không thể thiếu được đối với những thiết bị làm việc ở điện áp cao. Qua kết quả nghiên cứu quan hệ tổn hao điện môi với điện áp, cho chúng ta phát hiện ra những khuyết tật trong vật liệu (ví dụ như bọt khí v.v...) để từ đó thay đổi công nghệ chế tạo cho phù hợp và chất lượng hơn.

Trong nhiều trường hợp, tổn hao điện môi tgđ không phụ thuộc vào điện áp khi trị số điện áp bé. Nhưng khi điện áp tăng cao, trong các chất khí nói chung và các bọt khí có lẫn trong điện môi lỏng và rắn nói riêng sẽ xảy ra quá trình ion hoá. Quá trình ion hoá các phân tử khí sẽ tiếp thu một năng lượng điện trường làm cho tổn hao điện môi tăng lên. Đồng thời điện dẫn của phân khí cũng tăng lên góp phần tác động đến sự tăng tổn hao điện môi.

Quan hệ giữa tổn hao điện môi tgđ với điện áp được biểu diễn trên hình 4-13.

$U_i$  - là điện áp bắt đầu gây nên sự ion hoá. Khi điện áp  $U_i < U < U_B$  quá trình ion hoá tăng làm cho tổn hao điện môi tăng theo hàm số mũ ( bậc ba). Khi điện áp  $U > U_B$  tổn hao điện môi lại giảm đi vì phần không khí có điện dẫn lớn làm cho điện áp đáng trên nó nhỏ đi.



Hình 4-13. Quan hệ  $tg\delta = f(U)$ .

Sự ion hoá không khí liên quan tới hai thời điểm quan trọng là:

**Sự thu nhận năng lượng điện trường lớn dẫn đến làm tổn hao điện môi tăng đột biến.**

**Khi bị ion hoá, oxy của không khí biến thành ôzôn ( $O_3$ ).** Ôzôn kết hợp với nitơ (N) và nước ( $H_2O$ ) chứa trong phần khí biến thành axit nitric  $HNO_3$ . Nếu quá trình ion hoá liên tục và độ ẩm lớn, nồng độ axit trong vật liệu tăng lên, dẫn đến sự ăn mòn và phá huỷ vật liệu khi có điện áp tác động liên tục.

Quá trình ion hoá không khí còn xảy ra trong điện trường không đồng nhất điện áp cao (ví dụ: điện trường xung quanh dây dẫn điện áp cao, đầu ra hay vào của máy biến áp cao áp v.v...). Ion hoá sẽ gây nên phóng điện vầng quang và tổn hao do vầng quang trong chất khí. Vấn đề này chúng ta sẽ xem xét kỹ ở chương V - phần phóng điện trong điện môi khí.

#### 4.5. TỔN HAO ĐIỆN MÔI TRONG ĐIỆN MÔI KHÍ

Các chất khí ở điều kiện bình thường và trong điện trường thấp có tổn hao rất bé, vì vậy có thể xem chất khí là điện môi lý tưởng. Nguyên nhân gây nên tổn hao điện môi của các chất khí chủ yếu là do dòng điện dẫn gây nên, còn sự định hướng của các phân tử lưỡng cực chất khí trong quá trình phân cực không kèm theo tổn hao.

Điện dẫn của các chất khí có trị số rất bé, do đó tổn hao điện môi sẽ bé không đáng kể, đặc biệt khi ở tần số cao. Ví dụ điện dẫn của không khí vào khoảng  $10^{-18} (\Omega\text{cm})^{-1}$ , hằng số điện môi  $\epsilon \approx 1$  khi ở tần số  $f = 50\text{Hz}$  có  $tg\delta \leq 4.10^{-8}$ .

Ở điện áp cao và điện trường không đồng nhất, khi cường độ điện trường vượt quá trị số tối hạn các phân tử khí sẽ bị ion hoá, trong chất khí xuất hiện tổn hao do ion hoá. Năng lượng tổn hao do ion hoá được tính bằng công thức sau:

$$P_i = A.f.(U-U_i)^3.$$

Trong đó: A- là hằng số; f- tần số;  $U_i$ - điện áp bắt đầu gây nên ion hoá; U- điện áp đặt lên điện môi.

Trên hình 4-13 ta thấy tổn hao điện môi tăng lên khi điện áp tăng. Quan hệ tg $\delta$  với điện áp gọi là **đường cong ion hoá**. Khi điện áp  $U > U_B$  các phân tử chất khí đã được ion hoá, khi đó không cần tiêu tốn năng lượng cho quá trình ion hoá nữa nên tg $\delta$  có trị số giảm.

Ở tần số cao hiện tượng ion hoá và tổn thất năng lượng trong chất khí tăng lên đáng kể, đến mức làm cho các vật liệu cách điện bị cháy và phá huỷ.

Khi ion hoá ôxy của không khí biến thành ôzôn ( $O_3$ ), chúng kết hợp với nitơ ( $N_2$ ) và nước tạo thành axit nitơric ( $HNO_3$ ). Axit  $HNO_3$  sẽ gây nên sự phân huỷ hoá học các chất cách điện hữu cơ khi tiếp xúc với khí.

Các đường dây tải điện trên không điện áp cao và siêu cao gây nên phóng điện vầng quang (ion hoá) chất khí xung quanh dây dẫn và tổn hao năng lượng làm giảm hiệu suất đường dây. Để giảm tổn hao vầng quang trong thực tế cần phải thay đổi điện trường bằng cách tăng thiết diện dây dẫn hay phân dây pha thành các dây nhỏ nối với nhau tạo nên đường kính lớn (phân pha).

#### 4.6. TỔN HAO ĐIỆN MÔI TRONG ĐIỆN MÔI LỎNG

- **Trong các chất lỏng trung tính**, tổn hao điện môi chỉ do dòng điện dẫn gây nên, nếu chất lỏng đó không chứa các tạp chất là các phân tử lưỡng cực. Do điện dẫn của các chất lỏng trung tính tinh khiết rất bé, nên tổn hao điện môi có trị số bé. Công thức tính tổn hao điện môi của dầu tụ đã được lọc sạch là công thức 4-6 đã nêu ở trên:

$$\text{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{12}}{\epsilon \cdot f \cdot \rho}$$

- **Các điện môi lỏng cực tính**, tùy theo điều kiện nhiệt độ và tần số ngoài tổn hao do dòng điện dẫn còn có tổn hao do phân cực lưỡng cực gây nên. Nếu điện môi là chất cực tính mạnh thì có tổn hao lớn, tổn hao này phụ thuộc nhiều vào tần số và nhiệt độ ( đã được trình bày ở trên ).

Các điện môi lỏng dùng trong kỹ thuật thường là hỗn hợp các chất trung tính và cực tính, ví dụ: hỗn hợp dầu nhựa thông hoặc các chất lỏng cực tính như dầu thầu dầu, dầu xônôn.

- **Tổn hao điện môi phụ thuộc vào độ nhớt của chất điện môi đó**. Mặt khác, điện dẫn và độ nhớt chất lỏng lại phụ thuộc vào nhiệt độ. Do vậy tổn hao điện môi cũng phụ thuộc vào nhiệt độ. Một điều cần chú ý đặc biệt là khi điện môi cực tính

làm việc dưới điện áp xoay chiều tần số cao có tổn hao điện môi rất lớn. Tổn hao này do phân cực lưỡng cực gây nên.

- Dựa trên khái niệm về cơ chế phân cực lưỡng cực ta có thể giải thích được bản chất của tổn thất trong chất lỏng nhớt cực tính như sau:

Hướng theo sự biến đổi điện trường, các phân tử lưỡng cực quay trong môi trường nhớt và gây nên tổn hao điện năng do ma sát toả nhiệt.

Nếu độ nhớt của chất lỏng đủ lớn để các phân tử không kịp xoay theo sự biến đổi của điện trường và sự phân cực lưỡng cực bị mất đi, khi đó tổn hao điện môi sẽ nhỏ. Tổn hao do phân cực lưỡng cực cũng bé nếu độ nhớt của chất lỏng rất nhỏ và sự định hướng của các phân tử xảy ra không có ma sát. Khi độ nhớt có trị số trung bình, tổn hao lưỡng cực có thể có trị số đáng kể và đạt cực đại ở một độ nhớt nào đó.

Vị trí điểm cực đại được xác định từ điều kiện:

$$\omega \approx \frac{1}{\tau_0} \quad (4-29)$$

Trong đó:  $\omega$ - tần số góc của điện áp;

$\tau_0$ - thời gian xác lập phân cực.

Thời gian phân cực chậm  $\tau_0$  phụ thuộc vào độ nhớt của chất lỏng và như vậy  $\tau_0$  phụ thuộc vào nhiệt độ.

Hình 4-11 cho ta khái niệm về sự biến thiên tg $\delta$  theo nhiệt độ của hỗn hợp dầu nhựa thông đo ở hai tần số khác nhau. Một điều cần lưu ý là đường cong biểu diễn quan hệ tg $\delta$  theo nhiệt độ đồng thời cũng là đường cong (theo một tỷ lệ xích khác) quan hệ tổn hao năng lượng P theo nhiệt độ, vì  $P \equiv tg\delta$ .

Qua hình vẽ ta thấy khi tăng tần số, điểm cực đại của tg $\delta$  dịch chuyển về phía nhiệt độ cao hơn. Điều này có thể giải thích rằng khi tần số cao hơn thì đòi hỏi hằng số thời gian phân cực để nhận được góc tổn hao cực đại bé hơn, nhưng muốn giảm thời gian phân cực thì cần phải giảm độ nhớt, tức là phải tăng nhiệt độ.

Trị số nhỏ nhất của hàm tg $\delta = f(t'')$  tương ứng với nhiệt độ mà ở đó độ nhớt của chất lỏng trở nên nhỏ đến mức trên thực tế, sự định hướng của các lưỡng cực xảy ra không có ma sát. Trong trường hợp này tổn hao nhỏ.

Sự tiếp tục tăng tg $\delta$  theo độ tăng nhiệt độ được giải thích bởi độ tăng điện dẫn khi nhiệt độ tăng, điện dẫn này gây thêm tổn hao điện môi khi nhiệt độ tăng và tăng theo hàm số mũ.

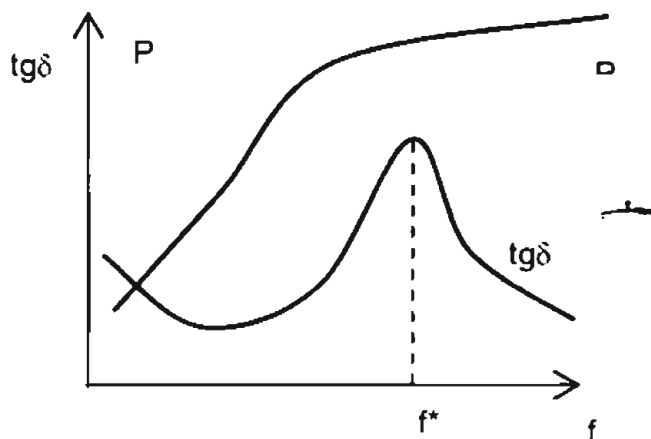
Trên hình 4-14 biểu diễn mối quan hệ giữa tg $\delta$  và P theo tần số của điện môi lỏng cực tính. Tổn hao điện môi tăng theo tần số cho đến lúc sự phân cực theo kịp sự biến đổi của trường. Khi tần số lớn tới mức các phân tử lưỡng cực không còn kịp

định hướng theo chiều của trường thì  $tg\delta$  sẽ giảm, tổn hao năng lượng  $P$  trở nên không đổi. Như vậy đặc điểm biến thiên của tổn hao năng lượng theo tần số không tương ứng với đặc tuyến tần số của  $tg\delta$ .

Tổn hao do phân cực lưỡng cực chậm trong trường hợp chất lỏng có độ nhớt bé và tần số thấp sẽ không đáng kể và có thể nhỏ hơn

tổn hao do dòng điện rò. Ở tần số cao tổn hao do phân cực lưỡng cực chậm sẽ rất lớn so với tổn hao do dòng điện rò ngay cả khi độ nhớt có trị số bé. Do đó chất lỏng cực tính không thể sử dụng trong trường tần số cao.

Trong bảng 4-1 đưa ra trị số  $tg\delta$  của hai điện môi lỏng. Từ số liệu của bảng 4-1 ta thấy chất lỏng trung tính có tổn hao điện môi bé hơn nhiều so với chất lỏng cực tính.



Hình 4-14. Quan hệ giữa  $tg\delta$  và  $P$  với tần số  $f$  của chất lỏng cực tính.

Bảng 4.1: Trị số  $tg\delta$  của một số điện môi lỏng

Tên điện môi	$\epsilon$	$tg\delta$ ở $f = 10^6$ Hz và $t = 20^\circ\text{C}$	Ghi chú
Dầu tụ điện	2,2	< 0,0002	Chất lỏng trung tính
Dầu thầu dầu	4,5	0,01	Chất lỏng cực tính

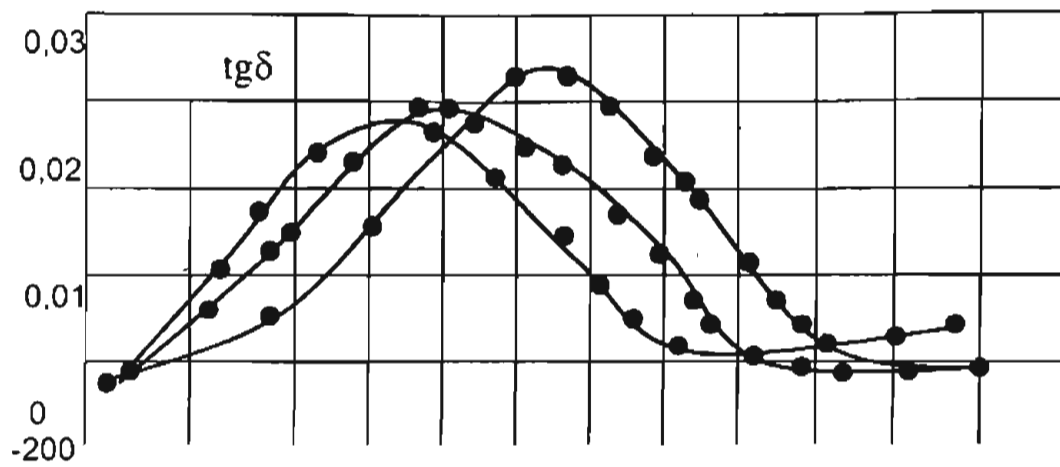
## 4.7. TỠN HAO ĐIỆN MÔI TRONG ĐIỆN MÔI RẮN

Điện môi rắn có rất nhiều loại, đa dạng về cấu trúc và các thành phần, do đó trong điện môi rắn có thể có tất cả các loại tổn hao điện môi. Để thuận tiện cho việc nghiên cứu tổn hao điện môi trong vật rắn, có thể chia chúng ra làm bốn nhóm cơ bản sau: *điện môi có cấu tạo phân tử, cấu tạo ion, điện môi xéc-nhét và điện môi có cấu tạo không đồng nhất.*

### 4.7.1. Tổn hao điện môi trong các điện môi có cấu tạo phân tử

Tổn hao điện môi trong các điện môi có cấu tạo phân tử phụ thuộc vào loại phân tử. Nếu trong điều kiện có các phân tử trung tính và không có tạp chất thì tổn hao điện môi nhỏ không đáng kể. Tổn hao điện môi của các vật liệu này chỉ do dòng điện rò gây nên, chúng được dùng làm cách điện ở cả tần số thấp và tần số cao. Trong loại điện môi này có: lưu huỳnh, parafin, poliêtilen, politetrafloêtilen, teflon-4, polistiroi và các chất khác.

Các điện môi có cấu tạo phân tử cực tính chủ yếu là các chất hữu cơ được sử dụng rộng rãi trong kỹ thuật. Loại này bao gồm các vật liệu dựa trên cơ sở xenlulô như: giấy, bìa cátông và các



Hình 4-15. Quan hệ  $tg\delta = f(t)$  của giấy khô.

chất khác: thủy tinh hữu cơ, poliamit poliurêtan, cao su, êbômít, bakêlít và một loạt các loại vật liệu khác. Tất cả các chất này có tổn hao lớn do phân cực lưỡng cực, nhất là ở tần số vô tuyến. Cho nên chúng không được dùng ở tần số cao.

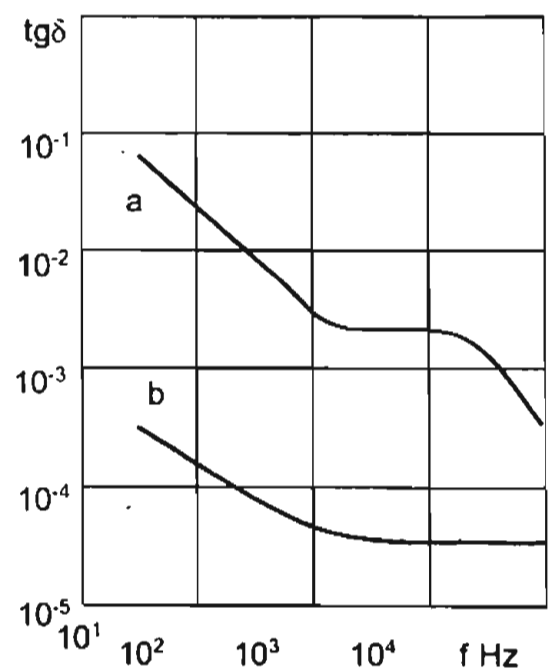
Tổn hao điện môi trong các điện môi phân tử cực tính có liên quan tới tần số và nhiệt độ. Ở một vài trị số nhiệt độ tổn hao điện môi có trị số cực đại và cực tiểu, sau đó tăng lên nhiều khi nhiệt độ cao, như đã trình bày ở phần trên.

Hình 4-15 trình bày quan hệ  $tg\delta$  theo nhiệt độ đối với giấy.

#### 4.7.2. Tổn hao điện môi của chất rắn có cấu tạo ion liên quan tới các đặc điểm sắp xếp ion trong mạng tinh thể

Trong các chất có cấu tạo tinh thể ion chặt chẽ khi không có tạp chất, tổn hao điện môi có trị số rất nhỏ. Ở nhiệt độ tăng cao, trong các chất này xuất hiện tổn thất do điện dẫn. Loại này bao gồm nhiều hợp chất tinh thể vô cơ có ý nghĩa rất lớn trong sản xuất gốm kỹ thuật điện hiện nay, ví dụ: corundum (bột đá mài) nằm trong thành phần sứ cao tần. Các tinh thể muối mỏ tinh khiết có tổn hao không đáng kể. Song chỉ cần một lượng tạp chất nhỏ sẽ làm biến dạng mạng lưới tinh thể và làm cho tổn hao điện môi tăng lên nhiều (xem hình 4-16).

Các điện môi có cấu tạo tinh thể ion rỗng buộc không chặt chẽ bao gồm một loạt chất kết tinh, được đặc trưng bởi các loại phân cực chậm làm tăng tổn thất điện môi. Trong các chất này có mulít là một thành phần của sứ cách điện, ôxít nhôm và khoáng xilicon nằm trong thành phần của gốm chịu lửa và các chất khác như: gốm, sứ, thủy tinh ...



Hình 4-16. Quan hệ  $tg\delta = f(\omega)$  của muối mỏ:

a) tinh khiết; b) có tạp chất.

Đa số các loại gốm điện lượng ion tham gia vào phân cực chậm không ngừng tăng lên theo nhiệt độ. Do đó, tgđ tăng lên không có giá trị cực đại khi nhiệt độ tăng.

Tổn hao điện môi trong các chất không kết tinh có cấu tạo ion như thủy tinh vô cơ liên quan tới hiện tượng phân cực và sự tồn tại dòng điện dẫn.

Khi nghiên cứu cơ chế tổn hao điện môi thủy tinh cần phân biệt:

a) Tổn hao điện môi ít phụ thuộc vào nhiệt độ và tăng tỷ lệ thuận theo độ tăng của tần số (tgđ không phụ thuộc vào tần số).

b) Tổn hao tăng rõ rệt theo nhiệt độ theo quy luật hàm số mũ và ít phụ thuộc vào tần số (tgđ giảm khi tần số tăng).

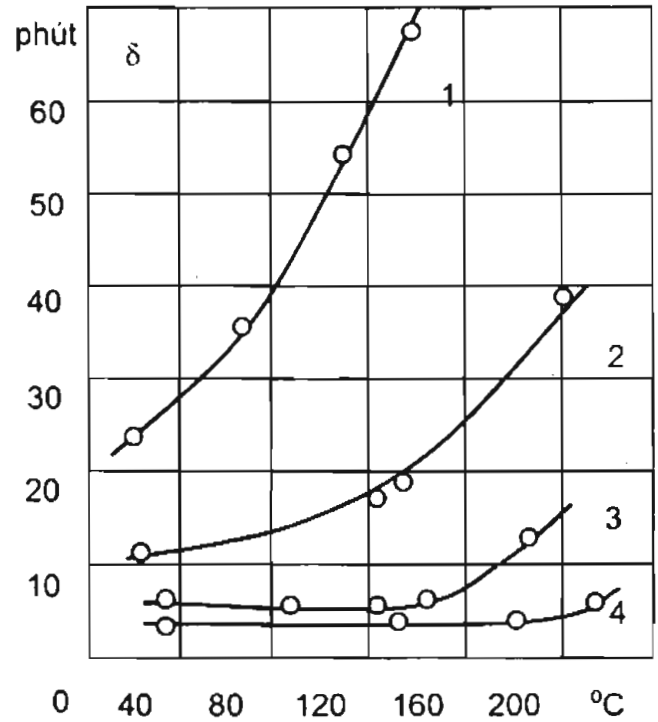
Công nghệ gia công nhiệt - nung hoặc tôi gây ảnh hưởng rõ rệt đến góc tổn hao điện môi của thủy tinh do cấu tạo của nó bị biến đổi.

Nếu thủy tinh có dòng điện rò càng lớn thì độ tăng của góc tổn hao điện môi  $\delta$  sẽ thấy ở nhiệt độ càng thấp. Trên hình 4-17 cho thấy sự biến thiên của góc tổn hao điện môi theo nhiệt độ đối với thủy tinh có thành phần và điện dẫn khác nhau.

Yếu tố chủ yếu xác định tổn hao điện môi trong thủy tinh vô cơ phụ thuộc vào cách kết hợp của các ôxít chứa trong thủy tinh, bởi vì cách kết hợp ảnh hưởng đến cấu tạo thủy tinh. Sự tồn tại ôxít kiềm ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) trong thủy tinh khi không có ôxít của các kim loại nặng ( $\text{BaO}$ ,  $\text{PbO}$ ) làm tăng đáng kể tổn hao điện môi của thủy tinh. Đưa ôxít nặng vào làm giảm tgđ của thủy tinh kiềm.

#### 4.7.3. Tổn hao điện môi trong điện môi xec-nhét

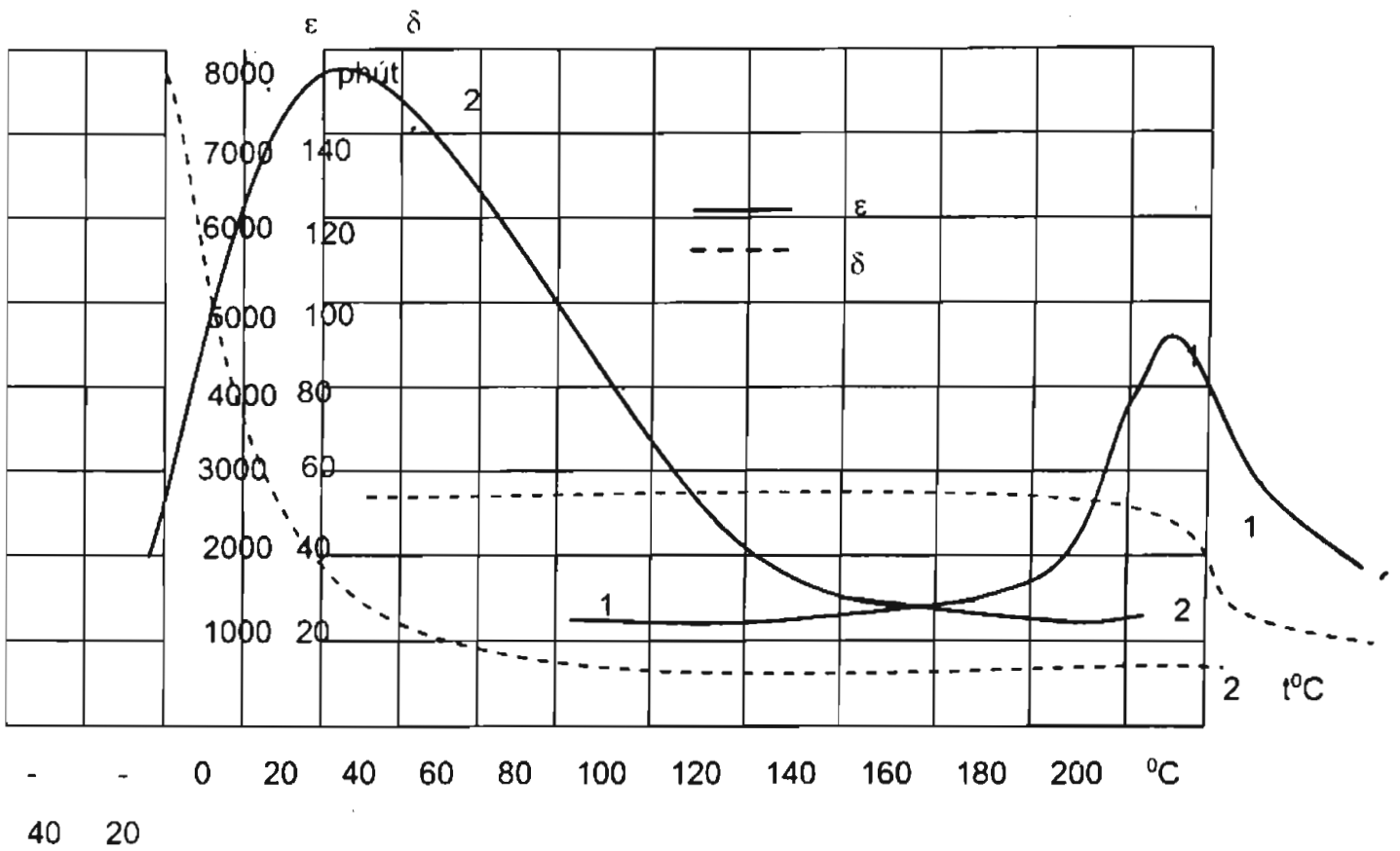
Tổn hao điện môi trong điện môi xec-nhét cao hơn so với các điện môi khác là do có hiện tượng phân cực tự phát. Sự phân cực này có đặc điểm là phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ và có điểm cực đại ở một nhiệt độ xác định (điểm Quyri). Ở nhiệt độ cao hơn điểm Quyri thuộc tính điện môi xec-nhét mất đi và phân cực tự



**Hình 4-17. Quan hệ góc tổn hao điện môi  $\delta$  với nhiệt độ của thủy tinh kiềm khi  $f = 1 \text{ MHz}$ :**

1. Kính cửa sổ  $\rho = 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ .
2. Thủy tinh pirêch natri thường  $\rho = 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ .
3. Thủy tinh pirêch kali  $\rho = 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ .
4. Thủy tinh pirêch kali  $\rho = 5 \cdot 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ .

phát cũng mất. Tổn hao điện môi trong điện môi xéc-nhét ít biến đổi theo nhiệt độ ở vùng phân cực tự phát và giảm đột ngột sau điểm Quyri.



**Hình 4-18.** Quan hệ giữa hằng số điện môi và góc  $\delta$  với nhiệt độ của điện môi xéc-nhét: 1 và 2 -Metatitanat bari  $BaO.TiO_2$ , có các chất phụ thêm khác nhau.

Trên hình 4-18 cho thấy sự biến thiên của góc tổn hao điện môi và hằng số điện môi theo nhiệt độ đối với hai điện môi gốm xéc-nhét có thành phần khác nhau và điểm Quyri khác nhau.

#### 4.7.4. Tổn hao điện môi trong chất rắn có cấu tạo không đồng nhất

Tổn hao điện môi trong chất rắn có cấu tạo không đồng nhất thường cao hơn so với tổn hao điện môi của các thành phần. Điện môi không đồng nhất bao gồm vật liệu mà trong thành phần của nó chứa không ít hơn hai chất. Ví dụ, trong gốm, sứ, thủy tinh hay các tổ hợp cách điện khác nhau có chứa các bọt khí ở bên trong. Ở điện áp cao, các bọt khí sinh ra tổn hao điện môi do ion hoá làm ảnh hưởng tới tổn hao điện môi của điện môi đang xét.

Tổn hao điện môi trong gốm có thể tăng lên nếu trong quá trình chế tạo vật liệu có các tạp chất bán dẫn với tính dẫn điện bằng điện tử. Tổn hao trong gốm cũng tăng lên do hút ẩm khi có các lỗ xốp hở.

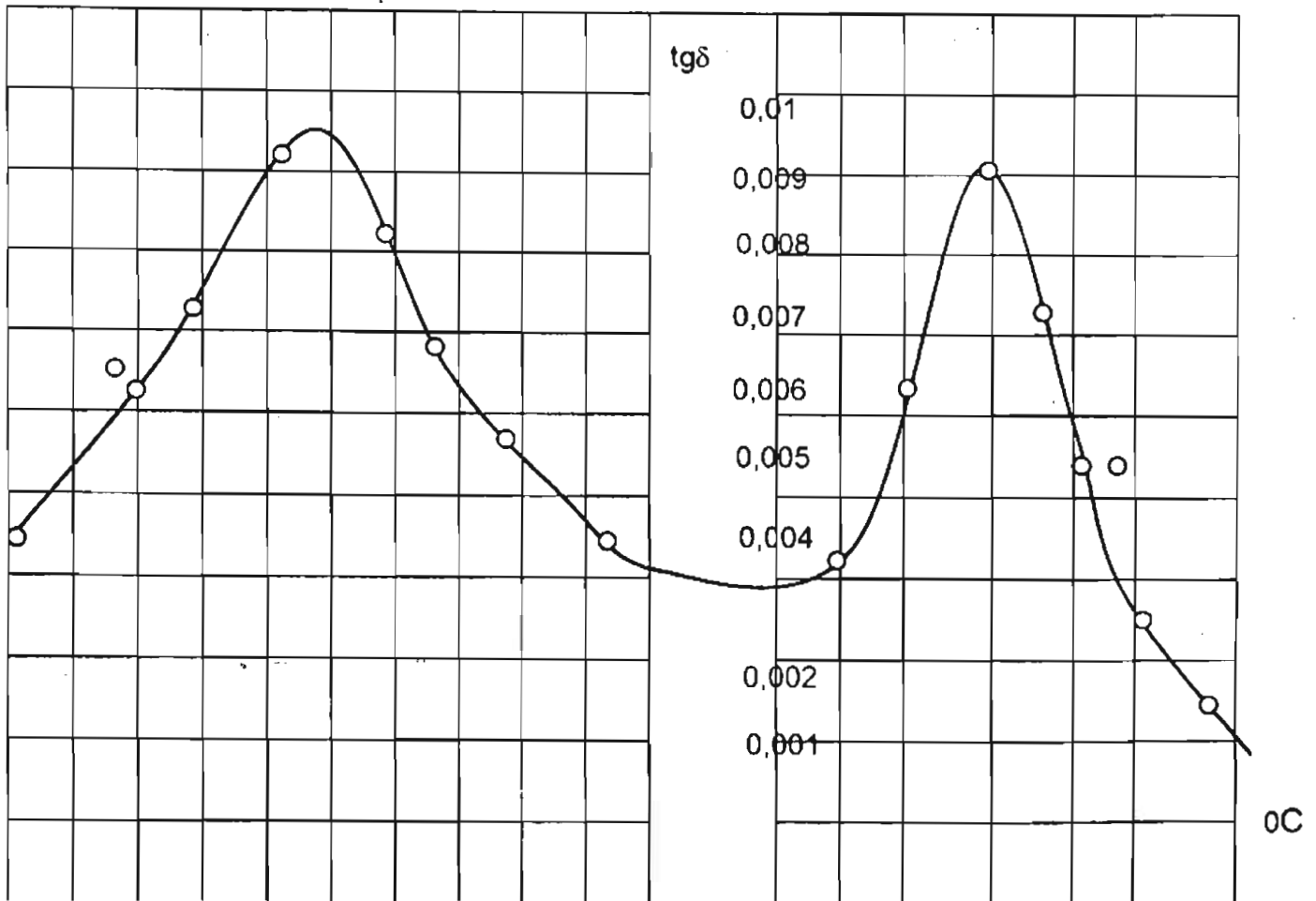
Mica là vật liệu có cấu tạo nhiều lớp. Các lớp bán dẫn trong mica làm tăng tgđ khi ở điện áp xoay chiều tần số thấp.

Giấy tẩm cũng thuộc loại điện môi có cấu tạo không đồng nhất. Loại giấy này ngoài sợi xenlulô còn chứa các chất tẩm với thành phần khác nhau. Tổn hao



điện môi của giấy tẩm được xác định bởi thuộc tính điện của cả hai yếu tố và quan hệ về lượng của chúng.

Hình 4-19 cho thấy sự biến thiên của  $tg\delta$  theo nhiệt độ của giấy tẩm hỗn hợp dầu nhựa thông. Đường cong có hai điểm cực đại: điểm thứ nhất (ở nhiệt độ thấp),



*Hình 4-19. Quan hệ  $tg\delta$  theo nhiệt độ của giấy tụ điện đã được tẩm 80% nhựa thông và 20% dầu biến thế.*

đặc trưng cho tổn hao điện môi của bản thân giấy (xenlulô), điểm thứ hai (ở nhiệt độ cao hơn) do tổn hao phân cực lưỡng cực chậm của hỗn hợp chất tẩm.

Trong kỹ thuật điện người ta còn sử dụng rất nhiều vật liệu không đồng nhất khác: chất dẻo, chất dộn, micamít, các lớp cách điện khác nhau trong cáp điện và thiết bị điện v.v... Tổ hợp các cách điện rất phức tạp và đa dạng, nên khi tính tổn hao điện môi cần phải xem xét từng cách điện cụ thể.

## Chương V

# SỰ PHÓNG ĐIỆN TRONG ĐIỆN MÔI

### 5.1. KHÁI NIỆM

Thực nghiệm cho ta thấy khi cường độ điện trường đặt lên điện môi vượt quá một giới hạn nào đó sẽ xảy ra hiện tượng phóng điện chọc thủng điện môi, khi đó điện môi bị mất hoàn toàn tính chất cách điện. Hiện tượng đó chính là sự phóng điện chọc thủng của điện môi hay là sự phá huỷ độ bền điện môi.

Phóng điện chọc thủng còn gọi là đánh thủng điện môi hay phóng điện xuyên qua điện môi. Trị số điện áp mà ở đó xảy ra đánh thủng điện môi được gọi là điện áp đánh thủng ( $U_{dt}$ ), trị số tương ứng của cường độ điện trường là cường độ đánh thủng hay cường độ điện trường cách điện của điện môi ( $E_{dt}$ ).

$$E_{dt} = \frac{U_{dt}}{h}, [kV/mm] \quad (5-1)$$

Trong đó: h- chiều dày của điện môi, đo bằng mm.

Cường độ điện trường cách điện của điện môi "E" =  $E_{dt}$  đây chính là điện áp đánh thủng điện môi trên một milimét chiều dày điện môi. Khi tính toán để chọn chiều dày điện môi của một thiết bị làm việc ở điện áp định mức nào đó ( $U_{dm}$ ), cần phải nhân với hệ số an toàn hay chính xác hơn là hệ số làm việc an toàn K:

$$h = K \cdot \frac{U_{dm}}{E_{dt}}, [mm] \quad (5-2)$$

Trong thực tế có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng tới cường độ điện trường cách điện của điện môi: dạng điện trường, dạng điện áp, thời gian tác dụng của điện áp, điều kiện môi trường như áp suất, nhiệt độ, độ ẩm, v.v...

Các chất khí, lỏng, rắn có cơ cấu và diễn biến quá trình phóng điện khác nhau, do đó khi nghiên cứu sự phóng điện cần phải xét riêng cho từng trường hợp.

## 5.2. SỰ PHÓNG ĐIỆN TRONG ĐIỆN MÔI KHÍ

Các chất khí chủ yếu là không khí thường được dùng làm chất cách điện của các thiết bị điện làm việc trong không khí và của đường dây tải điện trên không. Không khí hoặc phối hợp với các điện môi khác hoặc đơn độc làm nhiệm vụ cách điện giữa các pha hoặc giữa pha với đất (vỏ máy). Bởi vậy, đặc tính cách điện của chất khí có ý nghĩa rất quan trọng trong kỹ thuật điện cao áp. Khi chúng mất khả năng cách điện sẽ gây nên hiện tượng ngắn mạch và dẫn đến các sự cố trong các thiết bị điện và hệ thống điện. Trong nội bộ các điện môi rắn và lỏng cũng thường tồn tại các bọt khí, đó là các điểm cách điện suy yếu vì cách điện của các điện môi này bị hư hỏng thường bắt nguồn từ các quá trình phóng điện của bọt khí. Vì vậy, nghiên cứu quá trình phóng điện trong điện môi khí với mục đích khắc phục và loại trừ sự cố trong các thiết bị và hệ thống điện.

### 5.2.1. Yêu cầu chung đối với các chất khí cách điện

Các chất khí dùng làm chất cách điện phải đạt được các yêu cầu sau đây:

Phải là loại khí trơ, nghĩa là không gây ra phản ứng hoá học với các chất cách điện khác trong cùng kết cấu cách điện hoặc với các kim loại của thiết bị điện.

Có cường độ cách điện cao. Sử dụng các chất khí có cường độ cách điện cao sẽ giảm được kích thước kết cấu cách điện và của thiết bị.

Nhiệt độ hoá lỏng thấp để có thể sử dụng chúng ở trạng thái áp suất cao.

Phải rẻ tiền, dễ tìm kiếm và chế tạo.

- Tản nhiệt tốt. Ngoài nhiệm vụ cách điện của chất khí còn có nhiệm vụ làm mát (như trong máy điện) thì còn yêu cầu phải dẫn nhiệt tốt.

Không khí là loại khí thường gặp nhất thoả mãn được yêu cầu (4) nhưng lại không đạt yêu cầu (1) và (2), nhất là yêu cầu (1). Quá trình ion hoá trong không khí thường phát sinh các chất ôzôn, ôxít nitơ, biôxít nitơ và kết hợp với nước thành axít nitơric ( $\text{HNO}_3$ ), chúng sẽ ăn mòn kim loại và các bộ phận cách điện khác. Cường độ cách điện của không khí chỉ bằng 1/10 so với dầu biến áp, cho nên để tăng cường độ cách điện của nó lên ngang với các chất cách điện rắn và lỏng cần phải tăng áp suất không khí tới 10÷15 ata, điều đó sẽ làm cho kết cấu và vận hành của thiết bị càng thêm phức tạp. Hiện nay đã và đang sử dụng các chất khí có cường độ cách điện cao như êlêgaz, frêôn v.v...

Đặc tính của một số chất khí cách điện thường dùng cho ở bảng 5-1.

**Bảng 5.1: Đặc tính của một số chất khí cách điện**

Tên chất khí	Thành phần hoá học	Cường độ cách điện tương đối so với không khí	Nhiệt độ hoá lỏng °C
Không khí	-	1	-
Êlêgaz	SF <sub>6</sub>	2,5	-62
Frêôn	C Cl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	2,5	-30
Tetraclorua cacbon	C Cl <sub>4</sub>	6,3	+76

Qua bảng 5-1 ta thấy: êlêgaz và frêôn có cường độ cách điện tương đối cao, nhiệt độ hoá lỏng thấp nên có thể nén ở áp suất cao mà vẫn giữ được trạng thái khí. Song nhược điểm của chúng là đắt tiền. Khí CCl<sub>4</sub> thực chất là chất lỏng khi ở nhiệt độ bình thường, mặc dù có cường độ cách điện cao, song nó không được dùng trong thực tế.

### 5.2.2. Các dạng ion hoá xảy ra trong chất khí

Các chất khí không phải là chất cách điện lý tưởng chỉ chứa các phân tử trung hoà mà bao giờ cũng có một số ion và điện tử tự do. Bình thường các điện tích và điện tử tự do này luôn ở trong trạng thái chuyển động nhiệt. Khi có điện trường bên ngoài tác động chúng sẽ chuyển động theo phương của trường và tạo nên dòng điện dẫn trong điện môi.

Các điện tích của chất khí được tạo nên bởi quá trình ion hoá tự nhiên. Ví dụ: trong không khí dưới tác dụng của các yếu tố bên ngoài (tia cực ngắn của mặt trời, tia vũ trụ, nhiệt độ, tia tử ngoại v.v...) thường xảy ra mấy chục lần ion hoá trong một giây. **Quá trình ion hoá** là quá trình biến một phân tử trung hoà thành ion dương và điện tử tự do. Năng lượng cần thiết để cung cấp cho phân tử trung hoà để phân tử đó bị ion hoá gọi là **năng lượng ion hoá (W<sub>i</sub>)**. Ngược lại với quá trình ion hoá là **quá trình kết hợp** giữa các ion dương với điện tử hay ion âm để trở thành phân tử trung hoà. Năng lượng ion hoá phân tử của chất khí khác nhau thì cũng khác nhau, nó phụ thuộc vào năng lượng liên kết giữa hạt nhân và điện tử của phân tử các chất khí đó. Năng lượng dùng để ion hoá khi trước sẽ được trả lại dưới dạng bức xạ với độ dài sóng xác định theo công thức:

$$h\nu = W_i + \Delta W_k \quad (5-3)$$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s - là hằng số Planck.

$\Delta W_k$  - sự chênh lệch tổng năng lượng của phân tử trước và sau khi va chạm.

Nếu năng lượng cung cấp cho phân tử trung hoà nhỏ hơn năng lượng ion hoá ( $w < w_i$ ) thì chỉ làm kích thích dao động của điện tử trong phân tử, sau một thời gian rất ngắn chúng trở lại trạng thái ban đầu. Các phân tử bị kích thích khi trở lại trạng thái bình thường cũng trả lại năng lượng dưới dạng bức xạ tương tự như trên. Tùy thuộc vào dạng năng lượng cung cấp cho điện tử trong quá trình ion hoá, có thể có các dạng ion hoá sau đây:

**a) Ion hoá va chạm:** Khi các phân tử đang chuyển động va chạm nhau, động năng của chúng sẽ chuyển cho nhau và do đó có thể xảy ra ion hoá nếu:

$$W = \frac{mv^2}{2} \geq W_i \quad (5-4)$$

$m$  - khối lượng phân tử;  $v$  - tốc độ chuyển động của phân tử.

**b) Ion hoá quang:** Năng lượng cần thiết để ion hoá có thể lấy từ bức xạ của sóng ngắn, với điều kiện:

$$W = h \cdot \nu \geq w_i \quad (5-5)$$

hoặc: 
$$\lambda \leq \frac{ch}{W_i} \quad (5-6)$$

$\lambda$  - độ dài sóng của sóng ngắn ( $\lambda = \frac{c}{\nu}$ );  $\nu$  - tần số bức xạ của sóng ngắn;  $c$  - tốc độ ánh sáng.

**c) Ion hoá nhiệt:** Ở nhiệt độ cao có thể phát sinh các quá trình sau:

Ion hoá va chạm giữa các phân tử do các phân tử chuyển động với tốc độ lớn.

Ion hoá do bức xạ nhiệt của khí bị nung nóng.

Ion hoá va chạm giữa những phân tử và điện tử hình thành do hai quá trình trên.

Theo lý thuyết của khí động học thì ở bất kỳ nhiệt độ nào cũng có các phân tử chuyển động với nhiều tốc độ khác nhau, cho nên ở bất kỳ nhiệt độ nào cũng đều có khả năng ion hoá, chỉ khác nhau là xác suất nhiều hay ít. Nhiệt độ càng cao thì khả năng ion hoá càng lớn. Ở nhiệt độ bình thường xác suất này rất bé.

Xác suất ion hoá do bức xạ nhiệt cũng phụ thuộc vào nhiệt độ vì sự phân ly phân tử theo độ dài sóng cũng tương tự như trên và khi nhiệt độ càng cao thì khả năng ion hoá càng nhiều.

Năng lượng nhiệt và nhiệt độ cần thiết để xảy ra quá trình ion hoá được xác định theo công thức:

$$W = \frac{3}{2} kT \geq W_i \quad (5-7)$$

T - nhiệt độ tuyệt đối của chất khí;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^{\circ}\text{K}$  - là hằng số Boltzman.

d) **Ion hoá bề mặt:** Ba dạng ion hoá trên xảy ra trong thể tích chất khí, còn dạng ion hoá bề mặt xảy ra ngay trên bề mặt điện cực kim loại (katod).

Để giải thoát điện tử ra khỏi bề mặt cực cũng cần một năng lượng nhất định, năng lượng này được gọi là "công thoát" điện tử. Công thoát điện tử từ bề mặt cực phụ thuộc vào vật liệu làm điện cực và trạng thái bề mặt cực. Trong bảng 5.2 cho trị số công thoát của một số kim loại làm điện cực thường gặp.

**Bảng 5.2: Trị số công thoát của kim loại**

Tên kim loại	Công thoát (eV)
Nhôm	1,8
Đồng	3,9
Sắt	3,9

Có thể dùng các biện pháp sau đây để tăng cường ion hoá bề mặt:

- Nung nóng âm cực. Do cực được nung nóng, điện tử sẽ chuyển động mạnh hơn và có năng lượng lớn hơn. Nếu năng lượng này đạt được trị số nhất định vượt qua "**hàng rào thế năng**" thì nó sẽ thoát ra khỏi bề mặt điện cực.

- Bắn phá bề mặt âm cực bằng các phân tử có động năng lớn (ion dương).

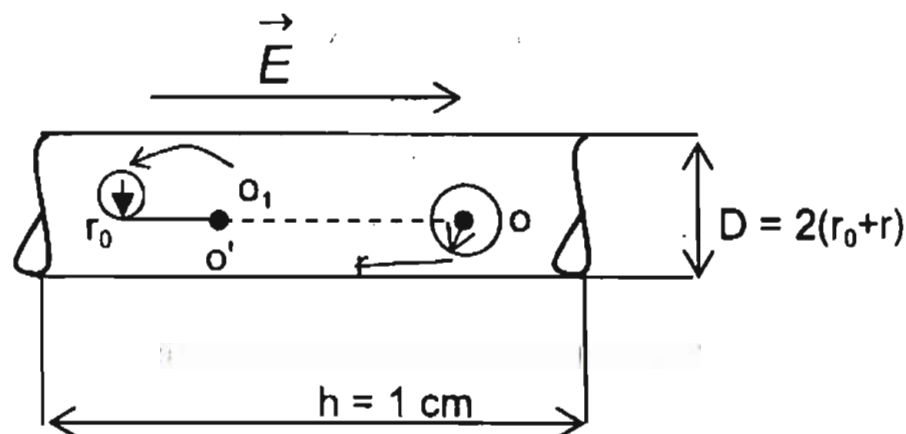
- Dùng sóng ngắn chiếu lên mặt điện cực (tia  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ...).

- Tác dụng bằng điện trường cực mạnh hay còn gọi là bức xạ nguội, thường xảy ra khi cường độ điện trường khoảng 1.000 kV/cm.

### 5.2.3. Quá trình ion hoá và hệ số ion hoá chất khí khi ở trong điện trường

Ở nhiệt độ bình thường năng lượng chuyển động nhiệt của các phân tử khí không đủ để gây nên ion hoá, nhưng nếu có điện trường tác động thì các điện tích tự do có sẵn trong nội bộ chất khí sẽ chuyển động tích lũy năng lượng và tăng tốc độ, khi va chạm với các phân tử khí có thể làm cho các phân tử đó bị ion hoá.

Ion hoá va chạm là yếu tố cơ bản của quá trình phóng điện chất



**Hình 5-1. Điện tích chuyển động trong điện trường đều.**

khí. Giải thích hiện tượng phóng điện của chất khí dựa theo yếu tố này không những đơn giản, dễ hiểu mà còn đạt được mức độ chính xác cần thiết.

Chúng ta đi xem xét quá trình chuyển động và va chạm của các điện tích có bán kính  $r_0$  trong môi trường phân tử khí có bán kính  $r$  với mật độ phân tử khí là  $N$  (phân tử / $\text{cm}^3$ ). Dưới tác dụng của lực điện trường các điện tích sẽ chuyển động, điện tích dương đi về phía cực âm và ngược lại điện tích âm (trong đó có điện tử tự do) đi về phía cực dương. Trên quãng đường chuyển động các điện tích này sẽ va chạm với phân tử trung hoà. Trường hợp đơn giản nhất là các điện tích chuyển động trong điện trường đều có đường sức của từ trường song song với nhau (hình 5-1).

Trên hình vẽ ta có điện môi có dạng hình trụ, chiều cao hình trụ  $h = 1 \text{ cm}$ , đường kính  $D = 2(r_0 + r)$ . Để có va chạm giữa điện tích có bán kính  $r_0$  với phân tử khí có bán kính  $r$  thì khoảng cách giữa hai tâm của chúng nhỏ hơn hay bằng tổng hai bán kính (trong luồng chuyển động):

$$O_1O' \leq (r_0 + r).$$

Nói cách khác mọi phân tử khí có bán kính  $r$  nằm trong hình trụ sẽ va chạm với điện tích có bán kính  $r_0$ . Khi cho điện tích chạy qua đoạn đường  $1 \text{ cm}$  thì số lần va chạm giữa nó với các phân tử sẽ bằng số phân tử nằm ở trong hình trụ có diện tích đáy  $\pi(r_0+r)^2$  (chiều cao hình trụ là  $1 \text{ cm}$ ). Nếu gọi  $S$  là số lần va chạm trong hình trụ thì:

$$S = \pi(r_0+r)^2 \cdot 1 \cdot N \text{ (lần)} \quad (5-8)$$

Nếu lấy đoạn đường chuyển động của điện tích  $r_0$  chia cho số lần va chạm  $S$  sẽ được trị số đoạn đường tự do (khoảng cách giữa hai lần va chạm kế tiếp nhau) trung bình của phân tử  $r_0$  trong môi trường các phân tử  $r$ .

$$\lambda = \frac{1(\text{cm})}{S(\text{lần})} = \frac{1}{\pi(r_0+r)^2 \cdot N} \quad (5-9)$$

Do điện tử có bán kính  $r_0$  nhỏ hơn nhiều so với bán kính phân tử  $r$  ( $r_0 \ll r$ ) nên đoạn đường tự do trung bình của các điện tử tính theo công thức sau:

$$\lambda_e = \frac{1}{\pi r^2 \cdot N} \quad (5-10)$$

Nếu là ion chuyển động trong môi trường phân tử  $r$ , sẽ có:

$$\lambda_i = \frac{1}{4\pi r^2 \cdot N} \quad (5-11)$$

vì  $r_i \approx r$ .

Qua công thức (5.10) và (5.11) ta thấy  $\lambda_e = 4 \lambda_i$ .

Thay trị số  $N = \frac{P}{kT}$  vào công thức (5.10) ta được:

$$\lambda_e = \frac{kT}{\pi r^2 \cdot P} \quad (5-12)$$

Trong đó: P - áp suất khí; T - nhiệt độ "k; k - hằng số Bônzômal. Khi nhiệt độ môi trường không thay đổi T = const sẽ có số lần va chạm của điện tử là:

$$Se = \frac{l}{\lambda_e} = A \cdot P \quad (5-13)$$

với: 
$$A = \frac{\pi r^2}{kT}$$

Như vậy, trong điều kiện nhiệt độ môi trường không đổi, trị số đoạn đường tự do trung bình tỷ lệ nghịch với áp suất. Từ đó có thể suy ra được số lần va chạm của điện tử và ion với các phân tử r. Trong các lần va chạm này không phải lần nào cũng đều gây nên ion hoá phân tử khí vì còn phải đảm bảo yêu cầu về năng lượng theo công thức (5-4), nghĩa là các điện tử, ion trong phạm vi của một đoạn đường tự do phải tích lũy đủ số năng lượng cần thiết.

Ta cần phải xác định quy luật đoạn đường tự do của các điện tích trong quá trình chuyển động theo chiều tác dụng của cường độ điện trường. Để xác định quy luật này có thể dùng ví dụ trên hình 5-2.

Giả sử ở x = 0 có n<sub>0</sub> các điện tích bắt đầu chuyển động về phía x, khi bay càng xa vị trí x = 0 thì số phân tử chưa bị va chạm giảm dần, đến vị trí x còn lại n các điện tích chưa bị va chạm và ở mức x + dx tiếp theo thì chỉ còn n' = n - dn điện tích chưa bị va chạm. Trị số dn là số hao hụt của các điện tích chưa bị va chạm trên đoạn dx, đây cũng là số lần va chạm xảy ra trên đoạn đường dx. Do đó ta có:

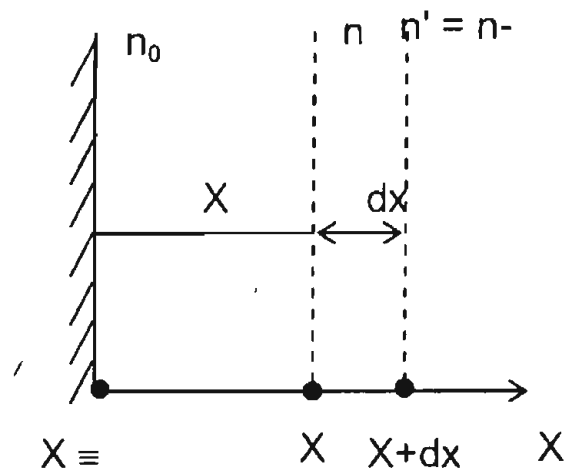
$$-dn = n \frac{1}{\lambda} dx \quad (5-13')$$

Trong đó:  $\frac{1}{\lambda} dx$  - là số lần va chạm của một điện tích trên đoạn dx; dấu âm ở trước dn là do trị số n giảm dần.

Giải phương trình vi phân (5-13) ta được:

$$n = n_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (5-14)$$

Với điều kiện ban đầu x = 0 thì n = n<sub>0</sub>.



**Hình 5-2. Xác định đoạn đường tự do của các điện tích trong điện trường.**

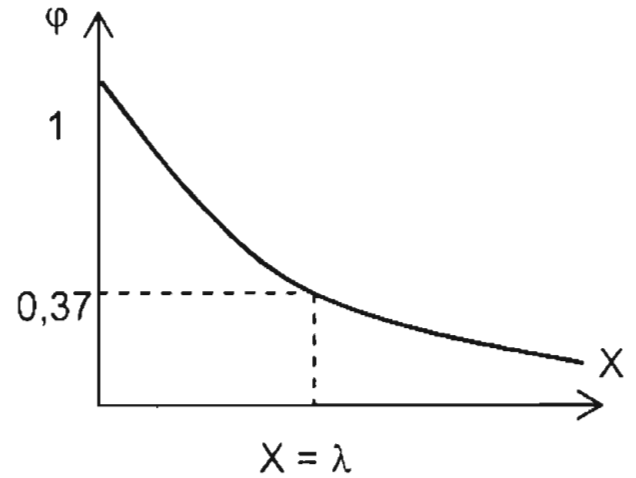


Công thức (5-14) cũng biểu thị sự phân bố các điện tích theo đoạn đường tự do, vì theo định nghĩa trên thì  $n$  là số điện tích chưa bị va chạm ở mức  $x$ , số điện tích này có đoạn đường tự do lớn hơn hoặc bằng  $x$ . Công thức trên có thể viết dưới dạng:

$$\varphi = \frac{n}{n_0} = e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (5-15)$$

Hàm  $\varphi$  biểu thị quy luật phân bố đoạn đường tự do, nói lên xác suất của các đoạn đường tự do có trị số bằng hoặc lớn hơn  $x$ .

Trên hình 5-3 cho ta quan hệ giữa hàm  $\varphi$  với  $x$ ; khi  $x = \lambda$  thì  $\varphi = 0,37$  nghĩa là chỉ có 37% số đoạn đường tự do của các điện tích có trị số bằng hoặc lớn hơn trị số đoạn đường tự do trung bình. Như vậy, điện tích khi chạy qua đoạn đường 1 cm sẽ bị va chạm  $S = 1/\lambda$  lần, các đoạn đường tự do của  $S$  lần va chạm này dĩ nhiên không phải đều có trị số bằng  $\lambda$  mà phân bố theo quy luật của hàm  $\varphi$  (công thức 5-15), sẽ có  $Sx$  lần va chạm với trị số đoạn đường tự do bằng hoặc lớn hơn  $x$ :



Hình 5-3. Quan hệ  $\varphi = f(X)$ .

$$Sx = S \cdot \varphi = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (5-16)$$

Công thức (5-16) cho ta đo khả năng tính toán hệ số ion hoá va chạm của điện tích, tức là số lần ion hoá do va chạm gây ra bởi điện tích này chạy qua đoạn đường 1cm. Nếu gọi hệ số ion hoá do điện tử tự do gây nên là  $\alpha$ ; hệ số ion hoá do ion gây nên là  $\beta$ , thì ta thấy  $\alpha \gg \beta$ ; cho nên trong tính toán thường bỏ qua quá trình ion hoá do va chạm của ion.

Để đơn giản cho việc tính hệ số ion hoá  $\alpha$ , dùng các giả thiết sau đây:

- Không xét khả năng ion hoá từng cấp, nghĩa là ion hoá va chạm do điện tử chỉ xảy ra khi năng lượng mà nó tích lũy được phải lớn hơn hoặc bằng năng lượng ion hoá của phân tử khí đó ( $W \geq W_i$ ).

- Điện tử sau mỗi lần va chạm dù có hay không gây nên ion hoá đều mất toàn bộ năng lượng, nghĩa là năng lượng của nó trong lần va chạm sau chỉ được tích lũy trong quá trình chuyển động ở đoạn đường tự do.

- Quỹ đạo chuyển động của điện tử trùng với phương đường sức của điện trường.

Khi chuyển động trong điện trường có cường độ  $E$ , nếu qua đoạn đường  $x$  mà không bị va chạm thì điện tử sẽ được tích lũy một năng lượng  $w = Eqx$  ( $q$  - là điện tích của điện tử). Như vậy, điều kiện để điện tử có thể gây nên ion hoá phân tử khí là:

$$W = Eqx \geq W_i \quad (5-17)$$

Từ (5.17) suy ra độ dài của đoạn đường tự do cần thiết để có ion hoá là:

$$x_i \geq \frac{W_i}{qE} \quad (5-18)$$

Khi chạy qua đoạn đường  $l$  cm điện tử sẽ có  $S = \frac{l}{\lambda_e}$  lần va chạm với phân tử khí, trong đó số lần va chạm với đoạn đường tự do bằng hoặc lớn hơn  $x_i$  để gây ion hoá, đây cũng chính là hệ số ion hoá  $\alpha$ . Do vậy:

$$Sx_i = \alpha = \frac{l}{\lambda_e} e^{-\frac{Sx_i}{\lambda_e}} \quad (5-19)$$

Từ (5-18) và (5-19) ta có:

$$\alpha = \frac{l}{\lambda_e} e^{-\frac{W_i}{qE\lambda_e}} \quad (5-20)$$

Kết hợp với công thức (5-13) thay thế trị số  $\lambda_e$  theo  $P$ , ta được:

$$\alpha = Ape^{-\frac{Bp}{E}} \quad (5-21)$$

với

$$B = \frac{A w_i}{q}$$

Dạng tổng quát có thể viết như sau:

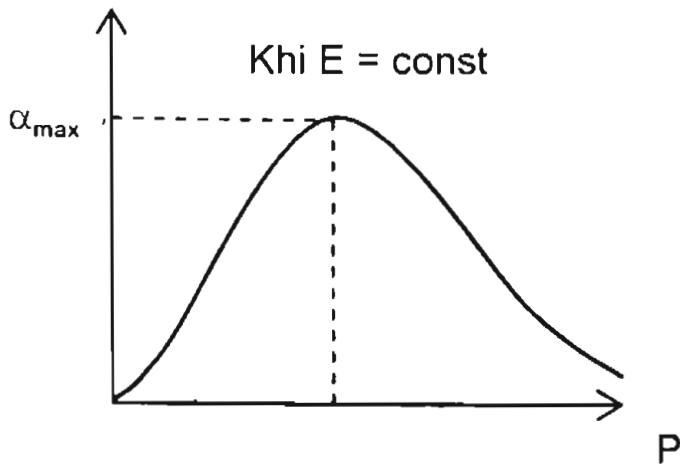
$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (5-22)$$

Như vậy, khi nhiệt độ không thay đổi, hệ số ion hoá chất khí do điện tử gây nên phụ thuộc vào áp suất ( $p$ ) và cường độ điện trường ( $E$ ) đặt lên chất khí. Trên hình 5-4 cho quan hệ  $\alpha = f(p)$  khi  $E = \text{const}$  và trên hình 5-5 cho quan hệ  $\alpha = f(E)$  khi  $p = \text{const}$ .

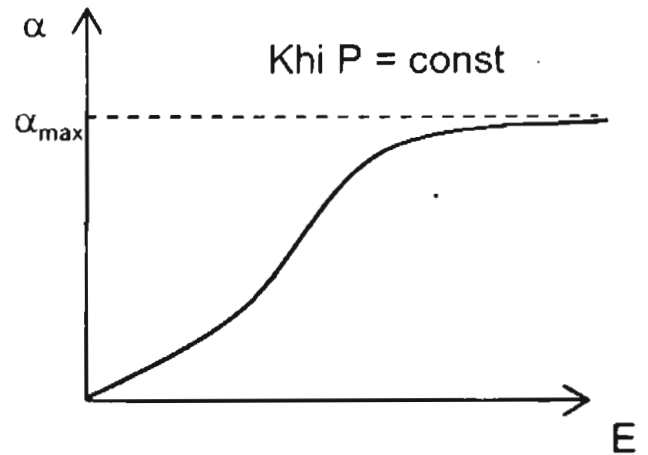
Qua hình 5-4, sự biến thiên của  $\alpha$  theo  $P$  có thể giải thích như sau:

Khi áp suất  $P$  bé, đoạn đường chuyển động tự do của điện tử  $\lambda_e$  lớn, năng lượng tích lũy của điện tử lớn nên có thể gây nên ion hoá lớn, nhưng do mật độ phân tử khí bé, xác suất va chạm rất bé nên  $\alpha$  không thể có trị số lớn. Ngược lại khi áp suất lớn, tuy mật độ phân tử khí tăng, xác suất va chạm cũng tăng nhưng đoạn đường tự do  $\lambda$  lại giảm, năng lượng tích lũy trên đoạn đường  $\lambda$  này sẽ giảm, nên  $\alpha$

cũng không thể có trị số lớn. Vì vậy trong quá trình biến thiên,  $\alpha$  có xuất hiện trị số cực đại tại  $P_*$ . Ở tại vị trí  $P_*$  có hệ số ion hoá đạt cực đại  $\alpha_{max}$ ; dễ dàng tạo nên điện tích và sự phóng điện. Trong thực tế áp dụng trường hợp này làm đèn ống, đèn quảng cáo, đèn trang trí, v.v... (cần cho sự phóng điện sớm). Còn khi hạn chế không để xảy ra phóng điện thường dùng miền áp suất có  $\alpha$  bé, tức là áp suất thấp hoặc áp suất cao. Điều này ta còn xem xét ở các phần sau.



Hình 5-4. Quan hệ  $\alpha = f(P)$  khi  $E = const$ .



Hình 5.5. Quan hệ  $\alpha = f(E)$  khi  $P = const$ .

Hệ số ion hoá  $\alpha$  phụ thuộc vào cường độ điện trường khi  $p = const$  ở trên hình 5-5 cho thấy hệ số  $\alpha$  tăng khi trường tăng là do điện tử tích lũy được càng nhiều năng lượng, đặc biệt khi  $E \rightarrow \infty$  (đạt trị số rất lớn) mọi lần va chạm đều gây nên ion hoá. Song do áp suất không đổi, mật độ phân tử khí cũng không đổi, nên hệ số ion hoá  $\alpha$  tiến tới một giới hạn  $\alpha_{max}$  nào đó ( $\alpha = \frac{1}{\lambda_e} = Ap$ ). Ở mỗi một áp suất khí khác nhau thì có hệ số ion hoá cực đại  $\alpha_{max}$  cũng khác nhau.

Mặc dù bị ràng buộc bởi các giả thiết đã nêu ở trên nhưng kết quả tính toán tương đối phù hợp với thực nghiệm. Các hệ số A và B theo số liệu thực nghiệm cho ở bảng 5.3.

**Bảng 5.3: Hệ số A và B của các loại khí**

Loại khí	A (V/cm.mm Hg)	B (V/cm. mm Hg)	Phạm vi của E/P (V/cm. mm Hg)
Không khí	14,6	365	150 ÷ 600
Không khí	8,5	250	20 ÷ 150
Ar	1,85	52	20 ÷ 510
He	4,8	9	20 ÷ 100

#### 5.2.4. Quá trình hình thành thác điện tử và sự phóng điện trong điện môi khí

Quá trình ion hoá chất khí sẽ đưa đến sự hình thành thác điện tích trong khu vực giữa hai điện cực. Nếu tiếp tục tăng điện áp thác điện tích phát triển mạnh, khi mật độ điện tích đủ lớn sẽ gây nên sự phóng điện trong điện môi khí tạo thành dòng plasma nối liền giữa hai điện cực.

Chúng ta xét quá trình ion hoá chất khí giữa hai điện cực với nguồn điện áp một chiều (hình 5-6). Điện trường bên ngoài  $\vec{E}$  có chiều từ cực dương (+) đến cực âm (-).

Giả thiết rằng ban đầu vì lý do nào đó có tồn tại một điện tử tự do ở phía cực âm. Dưới tác dụng của điện trường  $E$ , điện tử sẽ bay về phía cực dương. Trong quá trình chuyển động điện tử sẽ va chạm với các phân tử khí và gây nên ion hoá với hệ số ion hoá là  $\alpha$ . Sau mỗi lần ion hóa xuất hiện thêm điện tử tự do và ion dương. Các điện tử tự do mới được sinh ra cũng được gia tốc, tích lũy năng lượng và gây nên ion hoá, đồng thời các ion dương mới sinh ra sẽ chuyển động theo chiều ngược lại hay về phía cực âm cũng có thể gây nên ion hóa chất khí với hệ số ion hoá là  $\beta$  (thường có  $\beta \ll \alpha$ )... Do đó số lượng điện tích (ion dương và điện tử tự do) trong khoảng không gian giữa hai điện cực tăng thêm nhiều lần.

Giả sử ở vị trí  $x$  đã có  $n$  điện tử, trên quãng đường  $dx$  tiếp theo sẽ có  $n\alpha dx$  lần ion hoá, nghĩa là có thêm  $n\alpha dx$  điện tử mới sinh ra. Do vậy, ta có thể viết:

$$dn = n\alpha dx \quad (5-23)$$

Giải phương trình vi phân trên sẽ được:

$$n = e^{\int \alpha dx} \quad (5-24)$$

với điều kiện ban đầu: khi  $x = 0$  thì  $n = 1$ .

Nếu ở vị trí  $x = 0$  có  $n_0$  các điện tử bắt đầu chuyển động thì ta có:

$$n = n_0 e^{\int \alpha dx} \quad (5-25)$$

Hệ số ion hoá  $\alpha$  do các điện tử tự do gây nên phụ thuộc vào cường độ điện trường:  $\alpha = f(E)$ . Vì vậy, trong điện trường không đồng nhất chúng ta sử dụng công thức (5-24) và (5-25) để tính toán số lượng điện tử của thác điện tích do quá trình ion hoá gây nên.

Nếu là trường đồng nhất ( $E = \text{const}$ ) thì  $\alpha$  là hằng số, do đó ta có:

$$n = e^{\alpha x} \quad (5-26)$$

Hoặc:

$$n = n_0 \cdot e^{\alpha x} \quad (5-27)$$

Như vậy, số lượng điện tử tự do sẽ tăng lên theo hàm số mũ. Song song với sự phát sinh của điện tử kèm theo là sự phát sinh ra các ion dương với cùng số lượng. Chúng tập hợp thành thác điện tích; thường quen gọi là thác điện tử.

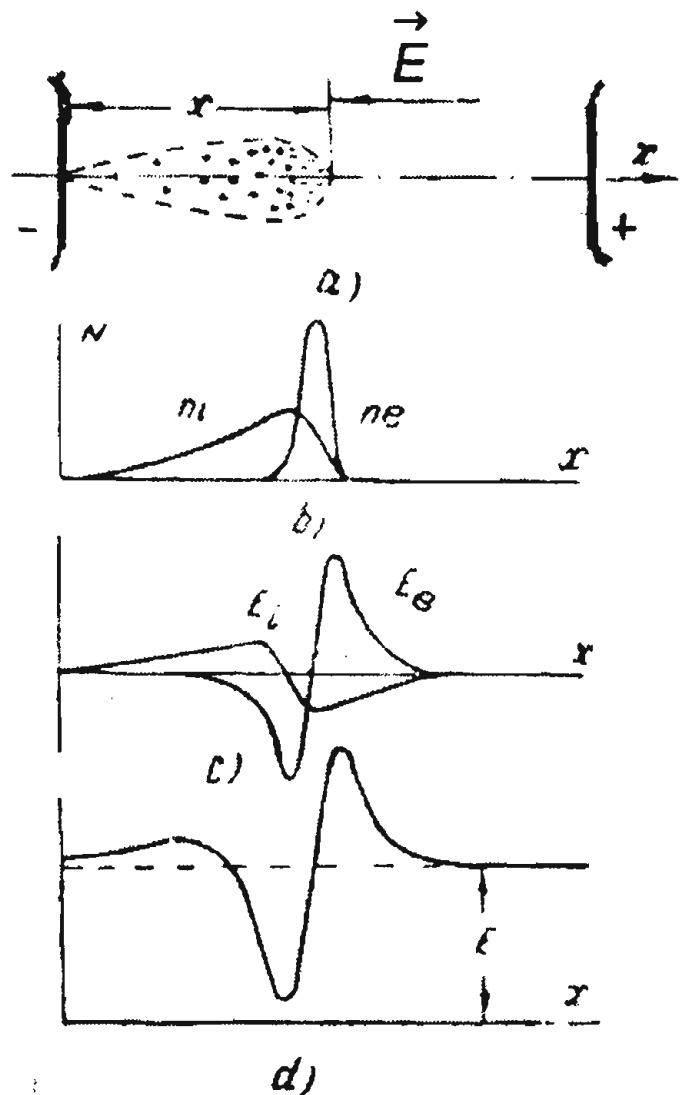
Trên hình 5-6,a cho ta mô hình thác điện tử khi thác phát triển tới độ dài  $x$ .

Do điện tử bé và nhẹ nên có tốc độ lớn và dễ khuếch tán dần về phía đầu thác và rải trên khoảng không gian rộng. Còn các ion dương do có khối lượng lớn nên di chuyển với tốc độ chậm hơn (bằng khoảng 1/100 tốc độ của điện tử), chúng phân bố ở khu vực thân và đuôi thác. Hình 5-6,b cho sự phân bố điện tử tự do ( $n_e$ ) và ion dương ( $n_i$ ).

Sự tồn tại các điện tích của thác điện tử sẽ tạo nên điện trường phụ làm biến dạng điện trường bên ngoài  $E$ . Trên hình 5-6,c biểu diễn điện trường phụ do các điện tử tự do ( $E_e$ ) và các ion dương ( $E_i$ ) gây nên. Tổng điện trường bên ngoài  $E$  và các điện trường phụ  $E_e$  và  $E_i$  là đường biểu diễn trên hình 5-6,d.

Xét về sự biến dạng của trường (hình 5-6,d) ta thấy phía đầu thác trường được tăng cường nhiều, nhưng ngay phía sau đầu thác trường lại giảm đột ngột, cả hai nơi này đều có khả năng bức xạ photon. Ở đầu thác trường được tăng cường cao hơn điện trường  $E$  bên ngoài, do vậy dễ dàng gây nên ion hoá phân khí tiếp theo tạo nên các thác điện tử mới hướng về phía điện cực đối diện. Mặt khác, do trường tăng cao làm cho các phân tử khí ở gần sẽ bị kích thích, khi chúng trở lại trạng thái bình thường sẽ trả lại năng lượng dưới dạng photon. Còn ở phía sau đầu thác do trường giảm đột ngột nên xảy ra hiện tượng kết hợp và cũng trả lại năng lượng dưới dạng photon. Các photon này có khả năng gây nên ion hoá quang các phân tử khí hoặc giải thoát điện tử từ bề mặt điện cực góp phần tăng thêm số lượng điện tích và để kế tiếp thác điện tử đầu kể trên.

Dưới tác dụng của điện trường, thác điện tích càng được phát triển đồng thời được kéo dài ra và khi tiếp cận với các điện cực các điện tích của thác sẽ trung hoà trên điện cực, kết thúc quá trình hình thành và phát triển thác điện tử. Quá trình đó



Hình 5-6. Quá trình ion hóa chất khí với nguồn một chiều.

chưa thể gọi là phóng điện vì chưa tạo nên một dòng điện lưu thông liên tục giữa hai điện cực. Như vậy để có phóng điện cần thiết phải có xuất hiện các điện tử mới để hình thành các thác mới, các điện tử này phải được tạo nên ngay từ các quá trình xảy ra trong khe hở mà không phải là do các nhân tố ion hoá bên ngoài và phải xuất hiện trước khi thác thứ nhất kết thúc. Các điện tử mới này còn gọi là điện tử thứ cấp, chúng đều phát sinh theo các khả năng sau đây:

- Sự bắn phá của ion dương vào cực âm để giải thoát điện tử (ion hoá bề mặt).
- Ion hoá quang trong nội bộ chất khí (do bức xạ của thác thứ nhất).
- Hiệu ứng quang giải thoát điện tử từ bề mặt cực âm (cũng do bức xạ của thác thứ nhất).

Quá trình được phát triển theo khả năng nào còn tùy thuộc vào áp suất của chất khí giữa hai điện cực.

Khả năng thứ nhất và thứ ba thường xảy ra khi áp suất thấp, vì lúc này các ion dương có thể đạt được tốc độ lớn và phôi tòn trong quá trình bay tới mặt điện cực không bị các phân tử khí hấp thụ hay khuếch tán ra môi trường xung quanh. Ở áp suất cao hai khả năng này bị hạn chế và chỉ có thể phát triển theo khả năng thứ hai và cần năng lượng lớn. Như vậy các thác điện tử thứ cấp được phát sinh do ion hoá bề mặt, ion hoá quang, bức xạ quang. Các thác điện tử liên kết với nhau để thành "dòng" hướng từ cực âm đến cực dương.

Đồng thời với sự phát triển của dòng hướng từ cực âm đến cực dương bắt đầu hình thành dòng của các điện tích dương ngược lại hướng từ cực dương đến cực âm - gọi là "dòng dương". Thực tế cho ta thấy khi thác điện tích có mật độ điện tích lớn (khoảng  $10^{12}$  ion/cm<sup>3</sup>) và gần tiếp cận tới điện cực dương, toàn bộ điện áp giữa hai điện cực dồn đặt lên một khe hở hẹp tại đó cường độ điện trường rất lớn làm bứt các ion dương từ cực dương chuyển động theo chiều ngược lại của thác điện tử. Khi chúng hoà nhập làm một sẽ gây nên phóng điện chọc thủng điện môi khí tạo thành dòng plazma, kết thúc bằng quá trình phóng điện.

Thường thường phóng điện trong chất khí xảy ra rất nhanh gần như tức thời, nếu khe hở khí là 1cm thì thời gian phát triển phóng điện chọc thủng khoảng  $10^{-7} \div 10^{-8}$  giây.

Nếu điện áp tác dụng càng cao thì sự phóng điện chọc thủng càng chóng phát triển. Nếu thời gian tác dụng của điện áp càng bé thì điện áp chọc thủng càng cao. Ngoài ra còn có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến cường độ điện trường cách điện của chất khí, chúng ta sẽ xem xét kỹ trong các phần sau.

### 5.2.5. Đặc tính von - ampe (V-A) và các dạng phóng điện trong chất khí

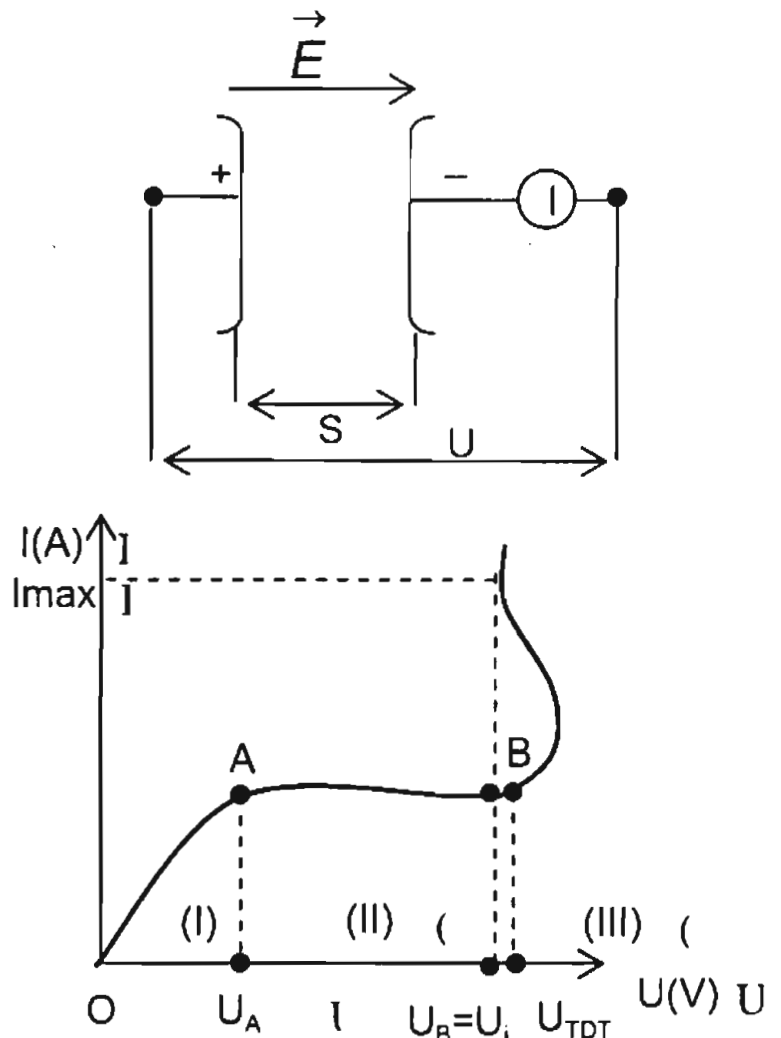
Khi có điện áp một chiều tác dụng lên hai điện cực, cho trị số điện áp thay đổi từ thấp đến cao và đo trị số dòng điện ứng với các điện áp, vẽ quan hệ giữa dòng điện với điện áp ta được đặc tính von - ampe của chất khí (hình 5-7).

Qua hình vẽ chúng ta thấy trong giai đoạn từ "0" đến "A" ( $u = 0 \div u_A$ ) các ion và điện tử tự do có sẵn trong chất khí (do yếu tố ion hoá bên ngoài) dưới tác dụng của điện trường sẽ chuyển động về các điện cực và tạo nên dòng điện. Khi điện áp tăng thì cường độ điện trường giữa hai điện cực sẽ tăng ( $E = \frac{U}{S}$ ); lực tác dụng lên các điện tích sẽ tăng lên ( $F = q.E$ ), do vậy tốc độ chuyển động của các điện tích tăng và dòng điện sẽ **tăng tuyến tính theo định luật**

**Ôm** (vùng I). Ở trong vùng I các điện tích âm và dương có thể kết hợp với nhau thành phân tử trung hoà. Ở điểm A có điện áp cao, tốc độ chuyển động của các điện tích lớn, quá trình tăng của dòng điện chấm dứt vì toàn bộ các điện tích đều tới được điện cực.

\* **Giai đoạn từ "A" đến "B"** là giai đoạn bão hoà: ( $U = U_A \div U_B$ ). Trong vùng II này dòng điện vẫn được duy trì nhưng không tăng là do số lượng điện tích sinh ra bởi nhân tố ion hoá bên ngoài có hạn. Tốc độ chuyển động của các điện tích khá cao, có bao nhiêu điện tích sinh ra thì có bấy nhiêu điện tích đi về các điện cực hết (không còn sự kết hợp) và dòng điện đạt trị số bão hoà.

\* **Giai đoạn sau điểm B** ( $U > U_B = U_i$ ): Nếu cho điện áp tiếp tục tăng, cường độ điện trường tăng cao và tốc độ chuyển động của các điện tích khá lớn, khi va chạm với phân tử trung hoà sẽ gây nên ion hoá mãnh liệt. Số lượng điện tích tăng lên theo hàm số mũ, do đó dòng điện tăng vọt lên và gây nên phóng điện giữa hai điện cực.



Hình 5-7. Đặc tính von-ampe của chất khí.

Sau điểm B nếu nguồn vẫn được duy trì thì dòng điện càng tăng và điện áp giữa hai điện cực giảm đi tới mức cần thiết để duy trì hồ quang ( $U_{TDT}$ ). Quá trình ion hoá trong giai đoạn này là *quá trình tự duy trì* vì nó không phụ thuộc vào nhân tố ion hoá bên ngoài. Lúc này chất khí bị mất hoàn toàn tính chất cách điện, trở thành vật dẫn ở *trạng thái plazma*. Trong plazma, phần lớn các phân tử khí được ion hoá và số điện tích âm (chủ yếu là điện tử) đã tạo nên điện dẫn chất khí. Tuy nhiên điện dẫn điện tử của plazma có khác với điện dẫn điện tử của kim loại vì các điện tích khác dấu của nó không ngừng kết hợp với nhau, do đó để có dẫn điện trong plazma phải luôn luôn có quá trình ion hoá để giữ cho mật độ điện tích ổn định.

Trên thực tế dòng điện phóng điện không thể tăng lên vô cùng lớn được bởi vì công suất nguồn có hạn ( $P_{max} = U \cdot I_{max}$ ). Do vậy để bảo vệ nguồn điện áp cao người ta phải khống chế không cho dòng điện phóng điện vượt quá  $I_{max}$  (tương ứng với  $P_{max}$ ), bằng cách lắp rơle dòng điện bên sơ cấp. Khi quá dòng rơle sẽ tác động cắt nguồn điện bên sơ cấp, điện áp bên phía thứ cấp (cao áp) sẽ bị cắt, dòng điện phóng điện bị triệt tiêu.

Tóm lại, quá trình phóng điện trong chất khí là quá trình hình thành dòng plazma trong toàn bộ hay một phần khoảng không gian giữa hai điện cực. Tùy thuộc vào công suất nguồn, áp suất khí và dạng của điện trường, quá trình hình thành dòng plazma có khác nhau và đưa đến các dạng phóng điện khác nhau như sau:

*a) Phóng điện toả sáng:* xảy ra khi áp suất thấp, plazma không thể có điện dẫn lớn vì số lượng phân tử khí quá ít. Phóng điện toả sáng thường chiếm toàn bộ khoảng không gian giữa các cực và được ứng dụng làm đèn nêông, đèn quảng cáo, trang trí, ống phát sáng v.v...

*b) Phóng điện tia lửa:* xảy ra khi áp suất lớn, plazma không chiếm hết toàn bộ khoảng không gian mà chỉ là một tia dòng nhỏ nối giữa các điện cực. Mật độ điện tích trong dòng plazma rất lớn nên có thể dẫn được dòng điện lớn nhưng không lớn quá vì bị giới hạn bởi công suất nguồn. Trong thực tế phóng điện tia lửa áp dụng làm thiết bị đốt lò gaz và dầu, đánh lửa budi xe máy, ô tô, thử nghiệm cường độ trường cách điện của các điện môi v.v...

*c) Phóng điện hồ quang:* tương tự như phóng điện tia lửa nhưng ở đây công suất nguồn lớn và tác dụng trong thời gian dài. Phóng điện này xảy ra trong áp suất cao. Dòng điện hồ quang lớn, đốt nóng dòng plazma làm cho điện dẫn của nó tăng thêm do đó dòng hồ quang càng tăng. Dòng điện hồ quang sẽ tăng tới mức ổn định khi có sự cân bằng giữa phát nóng và toả nhiệt của khe hồ quang.

Phóng điện hồ quang là một quá trình đòi hỏi phải có đủ thời gian cần thiết. Bởi vậy, khi thời gian tác dụng của điện áp ngắn dù công suất nguồn lớn cũng chỉ



gây nên phóng điện tia lửa mà thôi (ví dụ như phóng điện của sét, phóng điện trên các đường dây tải điện...). Dòng điện phóng hồ quang có nhiệt độ cao, nên trong thực tế áp dụng là điện cực hồ quang, hàn hồ quang, hàn điểm, đầu dây dẫn ...

**d) Phóng điện vầng quang:** là một dạng phóng điện đặc biệt chỉ tồn tại trong trường không đồng nhất và xuất hiện trong khu vực chung quanh điện cực. Dạng phóng điện này là dạng phóng điện không hoàn toàn vì dòng plasma không nối liền giữa hai điện cực, do đó không thể có dòng điện lớn. Phóng điện vầng quang chưa làm mất hẳn tính chất cách điện của chất khí nhưng cũng không nên để phát sinh vầng quang vì nó gây nhiều tác hại. Có thể nói phóng điện vầng quang chính là sự ion hoá chất khí và quá trình kết hợp các ion trái dấu để trở lại trạng thái bình thường, cả hai quá trình này đều trả lại năng lượng dưới dạng quang năng. Khi thời tiết xấu có thể thấy phóng điện vầng quang trên các đường dây tải điện áp cao. Phóng điện này gây nên một tổn thất năng lượng lớn trên đường dây truyền tải điện, chúng ta phải làm giảm phóng điện này bằng cách: tăng thiết diện dây dẫn, dùng dây dẫn có bề mặt nhẵn bóng, phân dây pha thành các dây nhỏ nối liền với nhau để có đường kính lớn. Trong công nghiệp phóng điện vầng quang được sử dụng để sơn tĩnh điện, lọc bụi tĩnh điện bảo vệ môi trường...

#### 5.2.6. Phóng điện của chất khí trong điện trường đồng nhất Định luật Pasen

Điện trường đồng nhất là trường hợp tỷ tương, trị số điện trường tại mọi điểm đều bằng nhau ( $E = \text{const}$ ) và có đường sức của từ trường song song với nhau. Đặc điểm của phóng điện trong điện trường đồng nhất là:

Do trị số trường không đổi ( $E = \text{const}$ ) và khi áp suất khí cũng không thay đổi thì hệ số ion hoá  $\alpha$  là hằng số.

Quá trình hình thành và phát triển của phóng điện không phụ thuộc vào cực tính.

Ta xét hai trường hợp sau:

##### ***Phóng điện trong trường đồng nhất có áp suất thấp***

Như đã trình bày ở trên để có thể duy trì phóng điện ở áp suất thấp, việc sinh ra các điện tử thứ cấp (điện tử mới) dựa vào sự giải thoát điện tử từ bề mặt cực âm của các ion dương và của phổ tổng bức xạ từ thác điện tử thứ nhất.

Các điện tử thứ cấp có được là do tác dụng bắn phá của các ion dương vào bề mặt cực âm. Ở áp suất thấp các ion dương dưới tác dụng của trường có thể chuyển động với tốc độ lớn, khi đập vào bề mặt âm cực gây nên ion hoá bề mặt với hệ số ion hoá là  $\gamma$ .

Khi thác điện tử thứ nhất phát triển trên toàn bộ khoảng cách giữa hai cực thì số lượng điện tử trong thác là  $e^{\alpha s}$  điện tử ( $s$  - là khoảng cách giữa hai điện cực). Như vậy số ion dương mới phát sinh ra do quá trình ion hoá và cũng là số lượng điện tử

của thác là:  $e^{\alpha s} - 1$ . Số ion dương này khi bay về phía cực âm sẽ giải thoát được  $\gamma(e^{\alpha s} - 1)$  điện tử từ bề mặt âm cực. Để có thể duy trì phóng điện, phải có ít nhất một điện tử mới kế tiếp cho điện tử đầu. Do vậy ta có điều kiện phóng điện tự duy trì chỉ do các ion dương gây nên sẽ là:

$$\gamma(e^{\alpha s} - 1) \geq 1 \quad (5-28)$$

Nếu ta gọi  $f$  là hệ số phô tôn do một điện tử phát ra,  $\eta$  - là hệ số chỉ khả năng ion hoá bề mặt do phô tôn, thì số điện tử gây ra do phô tông sẽ là:  $f \cdot \eta \cdot e^{\alpha s}$ .

Như vậy điều kiện phóng điện tự duy trì do tác dụng của cả ion dương và phô tôn phối hợp được viết:

$$\gamma(e^{\alpha s} - 1) + f \cdot \eta \cdot e^{\alpha s} \geq 1 \quad (5-29)$$

Do  $e^{\alpha s} \gg 1$  nên công thức (5-29) có thể viết đơn giản hơn là:

$$e^{\alpha s} (\gamma + f \cdot \eta) \geq 1$$

hay

$$e^{\alpha s} \gamma_{\text{dir}} \geq 1 \quad (5-30)$$

Ở đây  $\gamma_{\text{dir}} = \gamma + f \cdot \eta$  - là hệ số ion hoá bề mặt đẳng trị.

Để có phóng điện thì số lượng điện tích trong khe hở giữa hai điện cực phải đạt tới một giá trị nhất định. Do vậy, từ công thức (5-30) ta có:

$$\alpha s \geq \ln \frac{1}{\gamma_{\text{dir}}} = \text{const} \quad (5-31)$$

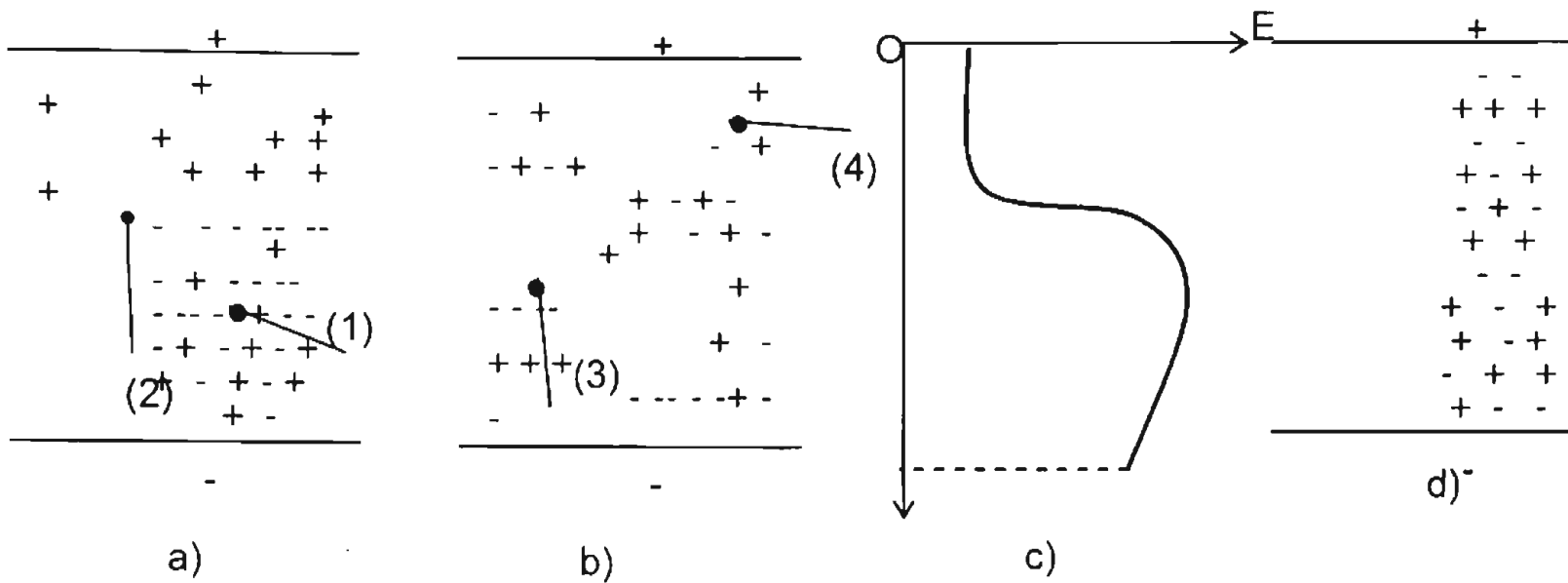
Ở áp suất thấp bằng kết quả thực nghiệm hằng số này có trị số khoảng từ  $3,7 \div 4$ .

Do áp suất thấp nên dòng plazma không thể có điện dẫn cao, mặt khác plazma phân bố đều trong toàn bộ không gian giữa hai điện cực là phóng điện toả sáng, ví dụ: đèn ống, đèn phát sáng, đèn trang trí v.v...

### ***b) Phóng điện trong trường đồng nhất áp suất cao***

Ở áp suất cao các ion dương không thể chuyển động với tốc độ lớn vì chúng bị va chạm liên tục với các phân tử khí. Do vậy ở áp suất cao việc sản sinh các điện tử mới dựa vào sự ion hoá quang trong khối khí. Khi thác điện tử phát triển tới mức có số lượng các điện tích khối đủ lớn để tăng trường phía đầu thác cũng giảm như trường sau đầu thác một cách đáng kể thì mới phóng xạ nhiều phô tông có năng lượng lớn gây ion hoá các phân tử khí. Xét trường hợp điện áp tác dụng lên hai điện cực là điện áp phóng điện bé nhất (hình 5-8). Để có thể sản sinh điện tử mới, thác điện tử thứ nhất phải phát triển hết toàn bộ khoảng cực, chúng tạo nên các thác mới ở phía sau đầu thác thứ nhất (hình 5-8a).

Điện tử của các thác mới sẽ bị điện tích khối dương ở thác thứ nhất kéo về và vì trường trong không gian chứa điện tích khối không lớn nên các điện tử dễ bị hút vào các phân tử trung hoà để trở thành ion âm. Các ion âm cùng với các ion dương có sẵn sẽ tạo nên dòng plazma (hình 5-8b).



**Hình 5-8. Quá trình phóng điện trong trường đồng nhất.**

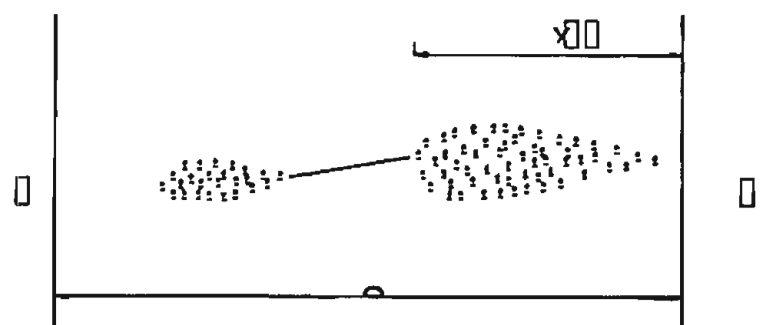
1 - thác đầu tiên; 2 - thác thứ 2; 3 - thác thứ 3; 4 - dòng bắt đầu được hình thành

Vì dòng plazma có điện dẫn cao lại được đặt trong điện trường nên điện tích của nó sẽ phân bố không đều. Đầu dòng do có điện tích dư nên cường độ điện trường tăng, ngược lại trường nội bộ giảm thấp (hình 5-8c). Sự tăng cường trường phía đầu dòng làm cho quá trình ion hoá quang trong khối khí vẫn tiếp diễn, hình thành các thác điện tử mới, kết quả làm cho dòng điện kéo dài về phía điện cực đối diện với tốc độ ngày càng nhanh do trường ở đầu dòng tăng liên tục.

Quá trình phóng điện ngược được hoàn thành khi dòng plazma phát triển tới cực đối diện và nối liền khoảng cách giữa các điện cực (hình 5-8d).

Do trường nội bộ bé nên khi dòng phát triển sẽ làm giảm trường xung quanh nó, do đó ngăn cản sự hình thành của các dòng khác. Điều này giải thích tại sao ở áp suất cao phóng điện chỉ tập trung vào một dòng mà không rải trên toàn bộ khoảng không gian giữa các điện cực.

Khi điện áp tác dụng lớn hơn trị số điện áp phóng điện bé nhất, nghĩa là trường bây giờ có cường độ mạnh hơn thì sự xuất hiện điện tử mới không phải chờ đợi cho thác thứ nhất phát triển hết khoảng cách



**Hình 5-9. Phóng điện trong trường đồng nhất khi trị số điện áp lớn hơn trị số điện áp phóng điện bé nhất.**

"s" mà chỉ cần tới mức dài  $x_k < s$  đồng thời chúng có thể xuất hiện không chỉ ở phía sau đầu thác thứ nhất mà còn cả ở phía trước nó (hình 5-9).

Yếu tố này rất quan trọng vì như vậy là dọc theo khoảng cực có nhiều thác phát triển đồng thời, mỗi thác chỉ phải đi qua một phần của khoảng cách "s", do đó quá trình phóng điện được phát triển kiểu nhảy vọt và thời gian phóng điện giảm đi nhiều.

Điều kiện phóng điện tự duy trì trong trường hợp điện áp phóng điện bé nhất là thác điện tử đầu tiên phải phát triển hết toàn bộ khoảng cực mới có đủ số lượng điện tích làm biến dạng trường chính, phóng xạ phổ tông và sản sinh điện tử thứ cấp. Như vậy điều kiện này được viết dưới dạng:

$$e^{\alpha s} = \text{const} \quad (5-32)$$

Thực nghiệm cho thấy ở áp suất cao  $\alpha s = 20$ . Điều này cũng tương tự với điều kiện phóng điện tự duy trì ở áp suất thấp nên có thể viết công thức trên dưới dạng tổng quát:

$$e^{\alpha s} = \frac{1}{\gamma} \text{ hoặc } \alpha s = \ln \frac{1}{\gamma} \quad (5-33)$$

Cần chú ý rằng hệ số  $\gamma$  ở hai công thức (5-31) và (5-33) khác nhau về ý nghĩa vật lý và cả về trị số. Ở áp suất thấp nó là hệ số ion bề mặt còn ở áp suất cao nó biểu thị sự ion hoá quang trong khối khí.

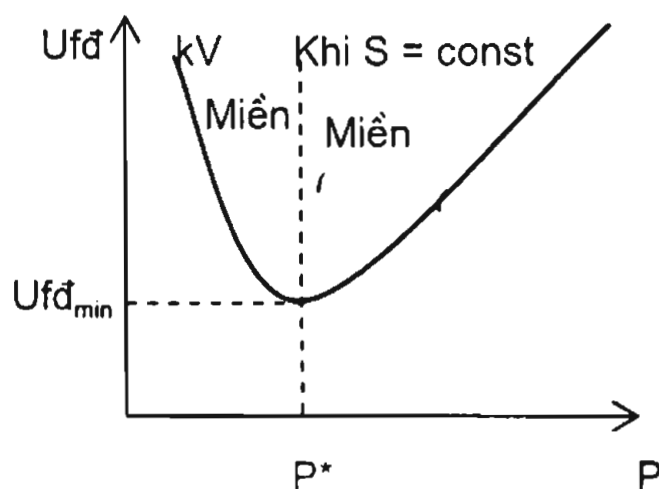
### c) Định luật Pasen

Khi nghiên cứu phóng điện của chất khí trong điện trường đồng nhất ta thấy điện áp phóng điện phụ thuộc vào áp suất P của chất khí và cũng phụ thuộc vào khoảng cách giữa hai điện s ( $U_{fd} = f(p, s)$ ). Chúng ta xét riêng từng trường hợp một:

\* **Trường hợp thứ nhất:** Quan hệ điện áp phóng điện phụ thuộc vào áp suất khi khoảng cách hai cực không đổi ( $s = \text{const}$ ). Đồ thị quan hệ  $U_{fd} = f(p)$  cho ở hình 5-10.

Chúng ta có thể giải thích như sau:

- Khi áp suất lớn, mật độ phân tử khí tăng cao, khoảng cách giữa các phân tử khí bé, nghĩa là đoạn đường chuyển động tự do của điện tử bé "λe" nên năng lượng tích lũy của điện tử trong chuyển động tự do sẽ nhỏ, mặc dù số va chạm với phân tử trung hoà lớn, song hệ số ion hoá bé. Để có đủ điện tích gây nên phóng điện thì



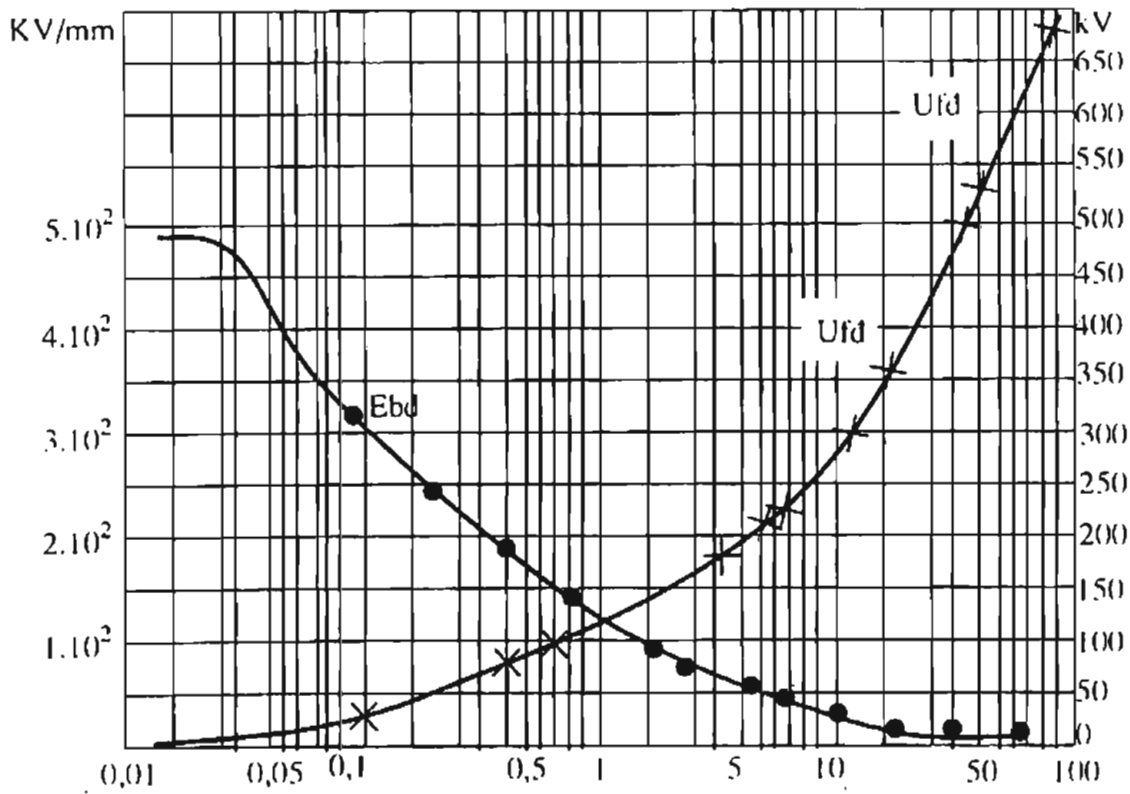
Hình 5-10. Quan hệ  $U_{fd} = f(P)$  khi  $S = \text{const}$ .

phải cần có sự ion hoá lớn, do vậy cần phải tăng điện áp lên đến một mức độ nào đó. Chính vì vậy ở áp suất cao có điện áp phóng điện lớn ( vùng II của đồ thị ).

Nếu giảm áp suất lúc đầu điện áp phóng điện sẽ giảm bởi vì lúc đó quãng đường chuyển động tự do để điện tử tích lũy năng lượng sẽ tăng lên ( $\lambda_e$ ), khả năng ion hoá sẽ tăng làm cho sự phóng điện có thể phát sinh. Khi áp suất ở  $P_*$  thì hệ số ion hoá  $\alpha$  là lớn nhất ( $\alpha_{max}$ ), do vậy điện áp phóng điện sẽ cực tiểu ( $U_{fd} min$  ).

Nhưng nếu áp suất giảm quá một trị số nào đó ( $P_*$ ) thì điện áp phóng điện lại tăng lên. Đó là do số phân tử khí giảm, xác suất va chạm của điện tử với phân tử khí giảm nhiều, mặc dù quãng đường chuyển động tự do tăng, song hệ số ion hoá lại giảm vì vậy sự ion hoá lớn khó xảy ra. Để có đủ điện tích phóng điện cần phải tăng điện áp lên, tức là điện áp phóng điện sẽ tăng khi áp suất giảm (vùng I của đồ thị). Khi áp suất dần tới "0" sẽ xảy ra hiện tượng bức xạ ngược, tức là xảy ra ion hoá bề mặt cực âm.

**\* Trường hợp thứ hai:** Quan hệ giữa điện áp phóng điện với khoảng cách khi áp suất không đổi ( $p = const$ ). Đồ thị quan hệ  $U_{fd} = f(s)$  khi  $p = const$  cho ở hình 5-11.



**Hình 5-11. Quan hệ  $U_{fd} = f(S)$  khi  $P = const$ .**

Qua hình vẽ ta thấy nếu khoảng cách giữa hai cực tăng lên thì điện áp phóng điện sẽ tăng, điều này dễ dàng thấy được bởi vì khi tăng khoảng cách điện tích gây nên bởi ion hoá không đủ để tạo thành dòng plasma. Muốn tạo thành dòng cần có sự ion hoá lớn, tức là điện áp phải tăng cao. Mặt khác, khi khoảng cách tăng lên thì

điện trường phóng điện sẽ giảm (nếu điện cực có kích thước không đổi) vì khi đó điện trường giữa hai điện cực chuyển từ trường đồng nhất sang không đồng nhất.

Định luật Pasen xuất phát từ điều kiện phóng điện tự duy trì  $\alpha s = \ln \frac{1}{\gamma}$  và thay thế các trị số:

$$\alpha = A p e^{\frac{-Bp}{E}} ; E = \frac{U}{s} \text{ rút ra được trị số điện áp phóng điện } U_0 = f(ps) \text{ khi cả } p$$

và  $s$  thay đổi:

$$U_0 = \frac{Bps}{\ln\left(\frac{Aps}{\ln \frac{1}{\gamma}}\right)} \quad (5-34)$$

Công thức (5-34) là công thức của định luật Pasen. Hệ số  $\gamma$  trong công thức có thể xác định bằng tính toán lý thuyết nhưng rất phức tạp nên thường được xác định bằng cách so sánh giữa các số liệu tính toán và thực nghiệm của điện áp phóng điện. Khi tính toán lấy các hằng số:

$$A = 8,5 \text{ l/cm. mm Hg.}$$

$$B = 250 \text{ V/cm. mm Hg.}$$

Trị số thực nghiệm phải hiệu chỉnh về điều kiện khí hậu tiêu chuẩn ( $P = 760$  mm Hg,  $t = 20^\circ\text{C}$ ) vì điện áp phóng điện phụ thuộc vào áp suất và nhiệt độ  $U_{td}(t,p)$ .

$$U_{td} = U_0 \cdot \delta \quad (5-35)$$

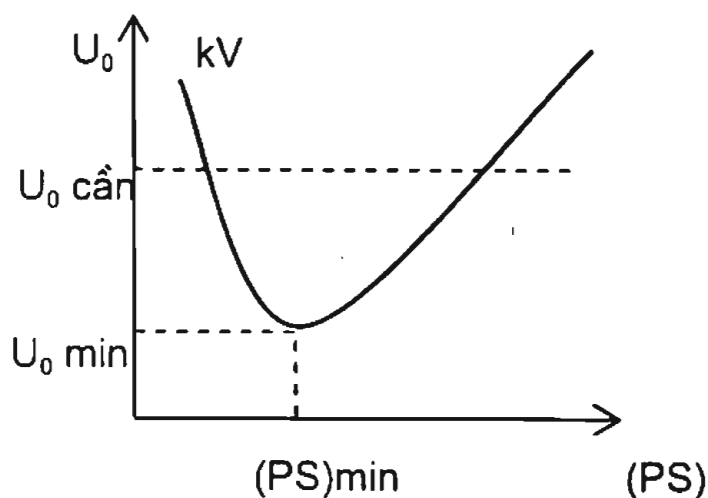
Với  $\delta$  - mật độ tương đối của không khí  $\delta = \frac{0,386p}{t^\circ + 273^\circ}$ . Ngoài ra điện áp

phóng điện còn phụ thuộc vào độ ẩm của không khí. Nếu ta gọi  $K$  là hệ số hiệu chỉnh theo độ ẩm, ta có:

$$U_0 = U_{td} \cdot \frac{K}{\delta} \quad (5-36)$$

Nhận thấy rằng khi áp suất lớn có thể viết điều kiện phóng điện tự duy trì của không khí:  $\alpha s = 20$ , còn khi áp suất thấp chỉ là:  $\alpha s = 3,7 \div 4$ .

Công thức của định luật Pasen nói lên quan hệ giữa điện áp phóng điện với tích số  $ps$  (khi nhiệt độ môi trường không đổi):  $U_0 = f(ps)$ . Quan hệ này được biểu



Hình 5-12. Quan hệ  $U_0 = f(ps)$ .

thị trên hình 5-12. Điện áp phóng điện có trị số cực tiểu tương ứng với trị số  $(ps)_{\min}$  còn ở hai bên trị số điện áp phóng điện tăng cao. Để giải thích hiện tượng này ta trở lại công thức tính hệ số ion hoá  $\alpha$ :

$$\alpha = A p s e^{-\frac{B p s}{U_0}} \quad \text{có thể viết: } \alpha s = A p s e^{-\frac{B p s}{U_0}}$$

Ở vế phải của công thức này: tích số  $A p s$  là số lần va chạm của một điện tử khi nó đi suốt khoảng cực, còn  $e^{-\frac{B p s}{U_0}}$  là xác suất ion hoá (có thể suy từ xác suất có đoạn đường tự do  $\geq x_i = \frac{w_i}{qE}$ ). Ứng với trị số  $ps$  lớn (phía bên phải của đồ thị so với  $(ps)_{\min}$ ). Khi  $ps$  tăng, tuy số lần va chạm có tăng nhưng xác suất ion hoá giảm, hệ số ion hoá  $\alpha$  giảm, đồng thời với khoảng cách cực lớn nên mật độ điện tích bé không đủ gây nên phóng điện. Để có đủ điện tích để gây nên phóng điện tự duy trì cần phải tăng điện áp lên để có sự ion hoá lớn, tức là  $U_0$  phóng điện phải tăng.

Khi  $ps$  bé (phía bên trái trị số  $(ps)_{\min}$ ) và khi giảm  $ps$  thì số lần va chạm giảm, tuy xác suất ion hoá có tăng nhưng tăng chậm. Mặt khác, hệ số ion hoá  $\alpha$  giảm khi áp suất giảm, đồng thời mật độ phân tử khí bé nên xác suất va chạm càng bé khi điện tử chuyển động trên một khoảng cách cực bé, nên khó có thể gây nên ion hoá lớn để gây nên phóng điện. Để xảy ra phóng điện cần phải có đủ mật độ điện tích, tức là cần phải tăng điện áp để có ion hoá lớn,  $U_0$  phóng điện tăng lên.

Tóm lại khi  $ps$  giảm và  $ps$  tăng đều làm cho điện áp phóng điện  $U_0$  tăng lên. Như vậy điện áp phóng điện  $U_0$  đạt cực tiểu ở  $(ps)_{\min}$ . Dựa vào quan hệ  $U_0 = f(ps)$  của định luật Pasen, trong thực tế người ta tính toán tối ưu kích thước thiết bị và công nghệ chế tạo thiết bị đảm bảo yêu cầu kỹ thuật vận hành. Khi cần phóng điện sớm như công nghệ làm đèn nêông, đèn quảng cáo, trang trí ... với một khoảng cách cực đã xác định cần giảm áp suất tới một trị số nào đó để có  $(ps)_{\min}$  ứng với  $U_0$  min. Nhưng đối với các thiết bị điện áp cao cần tránh phóng điện, tức là không nên để xảy ra phóng điện ta thường vận dụng nhánh bên phải (nén áp suất cao) hay nhánh bên trái (hút chân không), xem hình 5-12.

Khi xét mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ tới điện áp phóng điện  $U_0$ , công thức của định luật Pasen có thể viết dưới dạng:

$$U_0 = \frac{B T_0 \left( \frac{ps}{T} \right)}{\ln \left[ \frac{A T_0 \left( \frac{ps}{T} \right)}{\ln \frac{1}{\gamma}} \right]} \quad (5-37)$$

hoặc dạng tổng quát  $U_0 = f\left(\frac{ps}{T}\right)$  hay  $U_0 = f(\delta s)$ .

Như vậy trong điều kiện trường đồng nhất trị số điện áp phóng điện của chất khí là hàm số của tích số giữa khoảng cách cực với mật độ tương đối của chất khí. Trị số điện áp phóng điện của chất khí phụ thuộc vào điều kiện khí hậu nên khi tiến hành thực nghiệm ở các điều kiện khí hậu khác nhau phải có sự hiệu chỉnh trở về điều kiện khí hậu tiêu chuẩn.

### 5.2.7. Phóng điện của chất khí trong điều kiện điện trường không đồng nhất

#### a) Phân biệt giữa hai loại điện trường gần đồng nhất và không đồng nhất

Trong thực tế rất ít khi đạt được điện trường đồng nhất mà thường là loại điện trường không đồng nhất như: điện trường giữa hai dây dẫn, giữa hai hình trụ hoặc giữa dây dẫn với mặt đất ...

Đặc điểm của loại điện trường không đồng nhất là sự phân bố không đều của cường độ điện trường trong không gian giữa hai điện cực. Mức độ không đồng nhất của điện trường được biểu thị bằng hệ số không đồng nhất  $K$  - đó là tỷ số giữa trị số cường độ điện trường cực đại ( $E_{max}$ ) với trị số trung bình:

$$K = \frac{E_{max}}{E_{tr.b}}$$

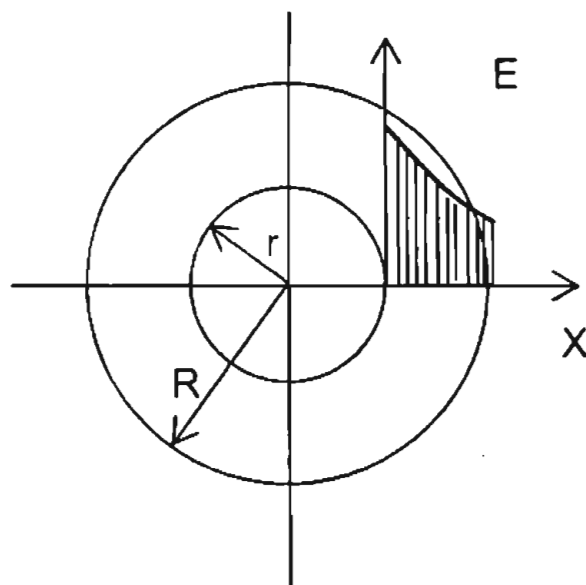
$E_{tr.b}$  - cường độ điện trường trung bình, bằng tỷ số giữa điện áp với chiều dài khoảng cách giữa các cực: ( $E_{tr.b} = \frac{U}{s}$ ).

Cường độ điện trường cực đại  $E_{max}$  xuất hiện ở trên bề mặt điện cực mà có bán kính cong bé nhất.

Thực nghiệm cho thấy tính chất không đồng nhất của trường ảnh hưởng nhiều đến quá trình phóng điện. Xét trường hợp điện trường giữa hai hình trụ đồng tâm (hình 5-13), trụ trong có bán kính  $r$  và trụ ngoài có bán kính  $R$ .

Cường độ điện trường tại điểm cách tâm khoảng cách  $x$  ( $r \leq x \leq R$ ) được xác định theo công thức sau:

$$E_x = \frac{U}{x \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad (5-38)$$



Hình 5-13. Điện trường giữa hai hình trụ đồng tâm.



Từ công thức (5-38) xác định được điện trường cực đại xuất hiện trên mặt điện cực hình trụ nhỏ và có trị số:

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \quad (5-39)$$

Còn điện trường cực tiểu xuất hiện trên bề mặt hình trụ lớn:

$$E_{\min} = \frac{U}{R \ln \frac{R}{r}} \quad (5-40)$$

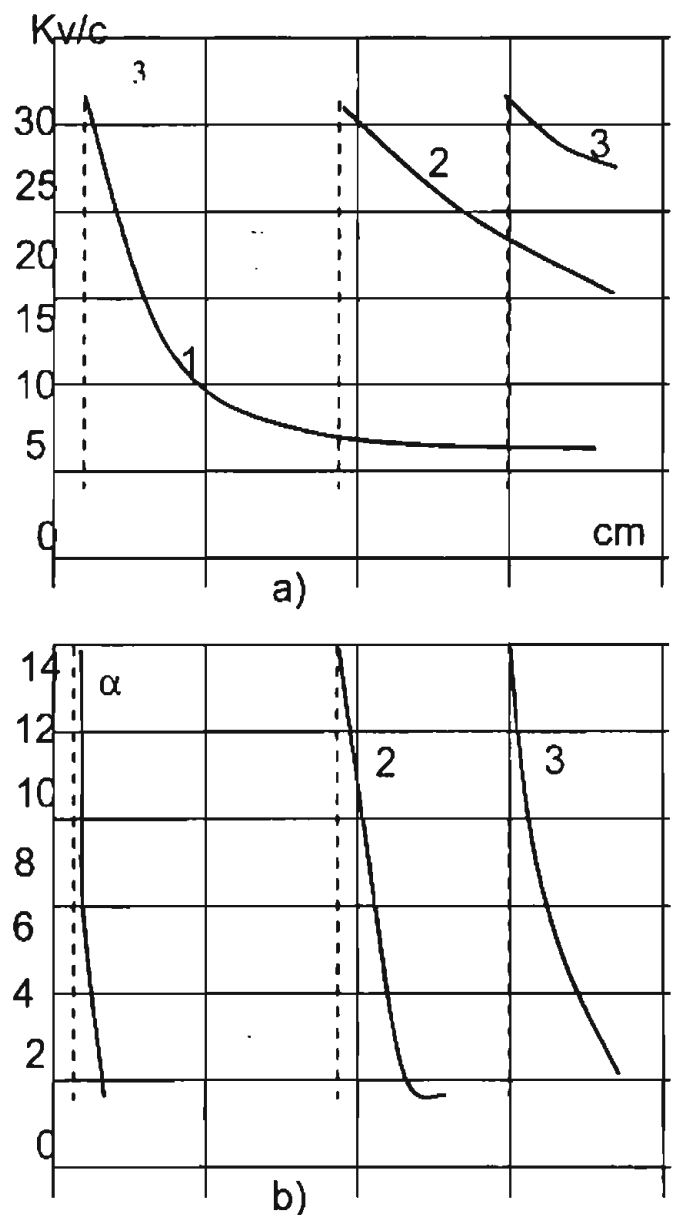
Khi cho thay đổi bán kính  $r$  của trụ trong nhưng giữ cố định bán kính  $R$  của trụ ngoài để được các mức độ không đồng nhất khác nhau ( $r$  càng bé trường càng không đồng nhất), đồng thời thay đổi trị số điện áp sao cho trong mọi trường hợp trị số điện trường cực đại giữ không đổi.

Trên hình 5-14a biểu thị sự phân bố của trường và 5-14b, của hệ số ion hoá  $\alpha$  theo  $x$ . Các đường cong của hình 5-14 cho thấy:

Khi bán kính trụ trong càng bé thì trường càng không đồng nhất và hệ số ion hoá  $\alpha$  giảm càng nhanh, đặc biệt ở trường hợp 1 và 2, hệ số  $\alpha$  chỉ tồn tại trong một phạm vi nào đó của khoảng cực nên quá trình ion hoá va chạm chỉ xảy ra trong lớp khí bao quanh hình trụ bên trong.

Ở trường hợp 3 có hệ số  $\alpha \neq 0$  trên toàn bộ khoảng cực nên thác điện tử đầu tiên được phát triển trên suốt chiều dài khoảng cực và sau đó hình thành dòng; quá trình phóng điện xảy ra tương tự như trong trường đồng nhất.

Ở trường hợp 2 thác điện tử chỉ phát triển trong một đoạn tương đối lớn của chiều dài cực (đoạn có hệ số  $\alpha \neq 0$ ), tiếp theo sau là quá trình hình thành dòng khác với trường đồng nhất. Vì cường độ trường ở đoạn còn lại đủ lớn



**Hình 5-14. Quan hệ của điện trường và hệ số ion hoá  $\alpha$  theo  $x$  trong tụ điện trụ.**

nên vẫn có thể khiến cho dòng tiếp tục phát triển tới cực đối diện để duy trì quá trình phóng điện giữa hai điện cực.

Ở trường hợp 1 thác điện tử chỉ phát triển được một đoạn đường rất ngắn, sau đó có hình thành dòng nhưng vì trường ở đoạn còn lại quá bé (hình 5-14a) nên dòng không thể phát triển tới điện cực đối diện được. Quá trình phóng điện ở đây vẫn là tự duy trì nhưng chỉ tồn tại trong một phạm vi nhỏ bao quanh trụ trong mà không chiếm được toàn bộ khoảng cách giữa các điện cực. Dạng phóng điện này được gọi là phóng điện "vàng quang". Để có phóng điện hoàn toàn cần phải tăng điện áp cao hơn so với trị số điện áp phóng điện vàng quang.

Tương ứng với hai trường hợp sau gọi là trường gần đồng nhất. Như vậy, trong trường không đồng nhất có hai dạng phóng điện đó là: phóng điện "vàng quang" và phóng điện "chọc thủng". Trong các phần sau chúng ta xét kỹ hơn hai dạng phóng điện này.

Trên thực tế rất khó xác định ranh giới giữa hai loại điện trường nói trên. Có thể cho rằng khi trường gần đồng nhất thì hệ số không đồng nhất  $K < 2$  và chỉ khi  $K > 4$  thì các đặc điểm của quá trình phóng điện của trường không đồng nhất mới biểu hiện rõ rệt. Từ đó ta có trường gần đồng nhất của hai hình trụ đồng tâm khi có:  $S < r$ . Trong trường hợp điện cực là hai bán cầu đường kính là  $D$ , trường phân bố giữa hai cực gần đồng nhất khi có  $S < D$  ( $S$  - là khoảng cách giữa hai điện cực).

### ***b) Phóng điện trong trường gần đồng nhất***

Quá trình phóng điện trong điện trường gần đồng nhất xảy ra tương tự với điện trường đồng nhất. Xuất phát từ đó có thể viết được điều kiện phóng điện tự duy trì, song cần chú ý là do cường độ điện trường thay đổi nên hệ số ion hoá cũng thay đổi nên không thể viết  $\alpha s = \text{const}$  mà phải viết là:

$$\int_0^s \alpha dx = \text{const} \quad (5-41)$$

Tích phân này tiến hành theo đường sức gần nhất từ cực này đến cực kia. Trị số của hằng số trong công thức (5-11) cũng gần bằng với hằng số của phương trình (5-32) nghĩa là bằng khoảng 20.

Chúng ta không thể xác định một công thức chung để tính toán điện áp phóng điện cho tất cả các loại trường gần đồng nhất, bởi vì, cường độ điện trường cũng như hệ số ion hoá  $\alpha$  còn phụ thuộc vào các kích thước hình học của từng loại điện cực. Ở đây sẽ trình bày cách tính toán cho một số trường hợp đơn giản nhất và từ đó suy luận ra dạng tổng quát:

Trong trường hợp hai hình trụ đồng tâm ta có điều kiện phóng điện tự duy trì sau:

$$\int_r^R A p s e^{\frac{-Bp}{E}} dx = \text{const}$$

Thay trị số của E ở công thức (5-38) ta sẽ được:

$$\int_r^R A p e^{\frac{-B p x \cdot \ln R / r}{U_0}} dx = \text{const}$$

Sau khi lấy tích phân ta có phương trình của điện áp phóng điện như sau:

$$\frac{AU_0}{B \ln \frac{R}{r}} \left[ e^{-\frac{B \ln \frac{R}{r}}{U_0} p \cdot r} - e^{-\frac{B \ln \frac{R}{r}}{U_0} \frac{R}{r} \cdot p \cdot r} \right] = \text{const}$$

Dạng tổng quát có thể viết:

$$U_0 = f(p, r, \frac{R}{r}) \quad (5-42)$$

hoặc: 
$$U_0 = f(p, s, \frac{R}{r})$$

hoặc: 
$$U_0 = f(\delta, s, \frac{R}{r}) \quad (5-43)$$

Từ công thức (5-43) thấy rằng: trong trường gần đồng nhất trị số điện áp phóng điện không những chỉ là hàm số của tích số giữa mật độ tương đối của chất khí với khoảng cách cực mà còn là hàm số của một số tỷ lệ độc lập nhau giữa các kích thước hình học của điện cực.

Điện áp phóng điện giữa hai quả cầu (khi  $s < D$ ) được xác định theo công thức:

$$U_0 = 27,2 \cdot \delta \cdot r \cdot \frac{\left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{\delta r}}\right) \frac{s}{r}}{0,25 \cdot \left[\frac{s}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{s}{r} + 1\right)^2 + 8}\right]}$$

Trong đó: r - bán kính của quả cầu,  $r = D/2$ ;  $\delta$  - mật độ tương đối của không khí.

Dạng tổng quát để biểu thị điện áp phóng điện của trường gần đồng nhất được viết:

$$U_0 = f(\delta s; \frac{r_1}{s}; \frac{r_2}{s}; \dots) \quad (5-44)$$

Quy luật phóng điện trong trường gần đồng nhất mở đường cho việc nghiên cứu phóng điện trên các mô hình đồng dạng. Ta có thể phát biểu quy luật trên như sau:

*"Nếu thay đổi khoảng cách giữa các điện cực và kích thước hình học khác của điện cực sao cho các tỷ lệ hình học nói trên giữ không đổi - nghĩa là dùng các khe hở đồng dạng về hình học - thì điện áp phóng điện chỉ còn là hàm số của tích số  $ps$ " và "nếu cho áp suất biến thiên ngược với sự biến thiên của khoảng cực thì trị số điện áp phóng điện sẽ giữ không đổi" ...*

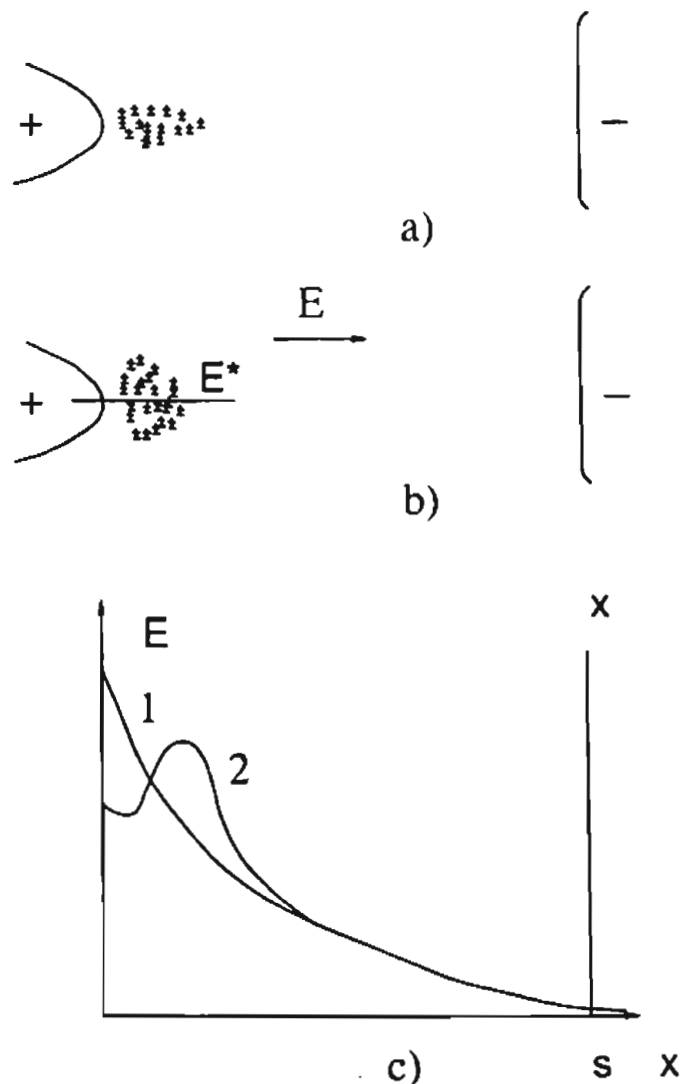
Định luật về phóng điện trong điện trường gần đồng nhất bao hàm nhiều ý nghĩa quan trọng. Trước hết, do trị số điện áp phóng điện cũng là hàm số của tích số giữa khoảng cách cực với áp suất nên thường dùng biện pháp tăng áp suất khí để nâng cao điện áp phóng điện (mức cách điện). Điều quan trọng hơn hết là định luật này đặt cơ sở cho việc nghiên cứu phóng điện trên các mô hình đồng dạng, tạo khả năng khái quát hoá các kết quả thực nghiệm để xác định trị số điện áp phóng điện.

**c) Phóng điện trong điện trường không đồng nhất**

Đặc điểm của điện trường không đồng nhất là sự phân bố không đều cường độ điện trường trong khoảng không gian giữa hai điện cực. Do sự tăng cường trường ở phía điện cực có bán kính cong bé nên mọi quá trình ion hoá, quá trình phóng điện cũng đều bắt nguồn từ đấy dù điện cực là dương hay âm. Khi có ion hoá điện tích không gian sinh ra sẽ làm biến dạng điện trường bên ngoài và có ảnh hưởng rất lớn đến sự phát triển của phóng điện về sau. Cho nên để nghiên cứu về phóng điện trong trường không đồng nhất cần phải nghiên cứu riêng cho từng trường hợp cụ thể - khi điện cực có bán kính cong bé là dương hay âm.

Dạng điện cực điển hình cho loại trường không đồng nhất là đôi cực: mũi nhọn - cực bản.

Trong trường không đồng nhất có thể xảy ra hai loại phóng điện đó là: phóng điện "**vàng quang**" và phóng điện "**chọc thủng**". Cả hai loại phóng điện này



**Hình 5-15. Quá trình phóng điện vàng quang khi mũi nhọn có cực tính dương.**

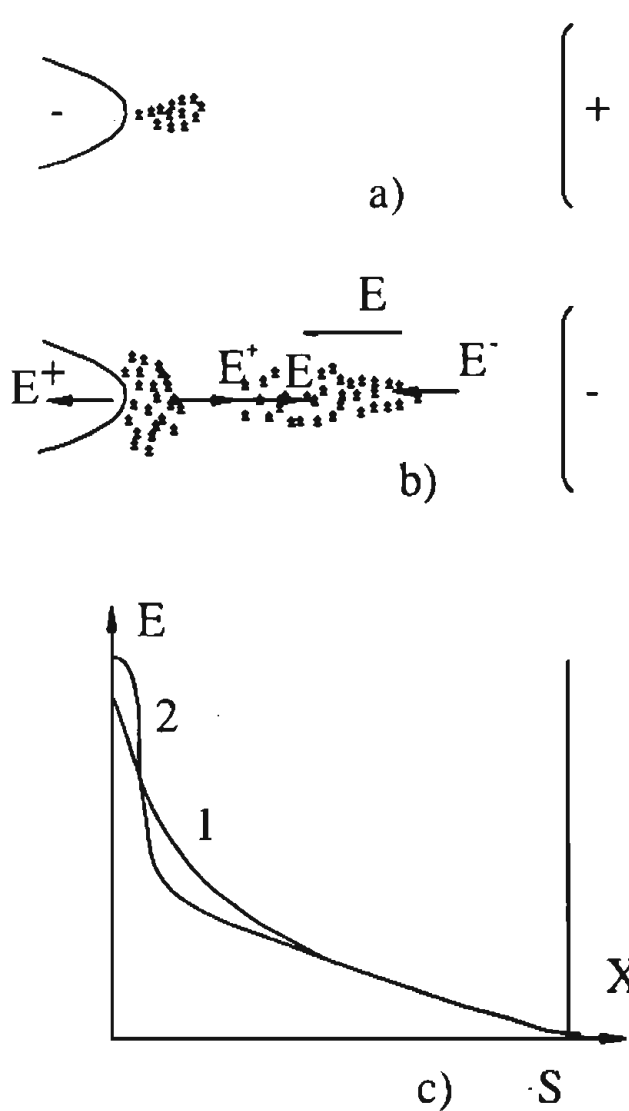
đều phụ thuộc vào cực tính, do vậy dưới đây sẽ lần lượt trình bày phóng điện ứng với từng trường hợp khi mũi nhọn có cực tính khác nhau.

**a) Phóng điện vầng quang**

\* **Khi mũi nhọn có cực tính dương:** Cường độ điện trường bên ngoài là đường 1 của hình 5-15c. Mũi nhọn là khu vực có điện trường mạnh nên trước khi có xuất hiện vầng quang ở đây đã có quá trình ion hoá và tạo nên thác điện tử (hình 5-15a), các thác này sẽ di chuyển về phía mũi nhọn (cực dương) và khi tới nơi các điện tử của thác đi vào điện cực để lại các ion dương tạo nên lớp điện tích không gian ở khu vực mũi nhọn (hình 5-15b). Trường của điện tích không gian dương  $E^+$  sẽ làm biến dạng trường bên ngoài (hình 5-15c) là đường 2 của đồ thị. Kết quả ở phía bên phải trường được tăng cường ( $E^+$  cùng phương với trường bên ngoài  $E$ ), ngược lại ở phía bên trái tức là ở khu vực gần điện cực mũi nhọn trường bị giảm đi ( $E^+$  ngược phương với  $E$ ) do đó, sẽ hạn chế quá trình ion hoá gây khó khăn cho sự hình thành vầng quang. Để duy trì phóng điện vầng quang liên tục cần phải nâng điện áp lên so với điện áp đặt vào ban đầu, tức là  $U_{đvq}$  tăng.

\* **Khi mũi nhọn có cực tính âm:** Cường độ điện trường bên ngoài giảm dần từ mũi nhọn đến cực bản (đường 1 của hình 5-16c). Ở phía mũi nhọn có trị số trường cực đại cho nên quá trình ion hoá và hình thành thác điện tử cũng xảy ra ở khu vực điện cực mũi nhọn, bây giờ là cực âm. Các điện tử của thác sẽ di chuyển về phía cực dương (cực bản) nhưng khi bay về phía này, điện tử rơi vào khu vực trường yếu dần, nên ngoài một số bay tới được cực dương và bị hút vào đấy, số còn lại do tốc độ giảm dần nên dễ bị hút vào nguyên tử ôxy, hình thành một lớp điện tích không gian âm ở lưng trũng khoảng giữa các điện cực (xem hình 5-16b).

Các điện tích dương của thác sẽ di chuyển về phía mũi nhọn và hình thành một lớp điện tích không gian dương ở khu vực này. Chúng không bị hút ngay vào cực âm vì khối lượng của chúng lớn nên tốc độ di chuyển chậm. Trường của các điện tích không gian ( $E^+$  - của lớp điện tích không



**Hình 5-16. Quá trình phóng điện vầng quang khi mũi nhọn có cực tính âm.**

gian dương; E<sup>-</sup> của lớp điện tích không gian âm) sẽ làm biến dạng trường chung bên ngoài (đường 2 của hình 5-16c). Do mật độ của lớp điện tích không gian âm bé hơn so với điện tích không gian dương nên tác dụng làm biến dạng trường của nó yếu hơn và do đó cường độ điện trường tổng ở khu vực mũi nhọn được tăng cường làm cho quá trình ion hóa cũng như phóng điện vầng quang phát triển dễ dàng hơn. Do vậy, để duy trì phóng điện vầng quang liên tục ta có quyền giảm điện áp sau khi có thác điện tử phát triển so với điện áp ban đầu đặt vào giữa hai cực ( $U_{fdvq}$  giảm xuống). Sự phân tích trên đây hoàn toàn phù hợp với kết quả thực nghiệm: điện áp phóng điện vầng quang khi mũi nhọn có cực tính dương cao hơn so với khi mũi nhọn có cực tính âm nếu có cùng một khoảng cách cực.

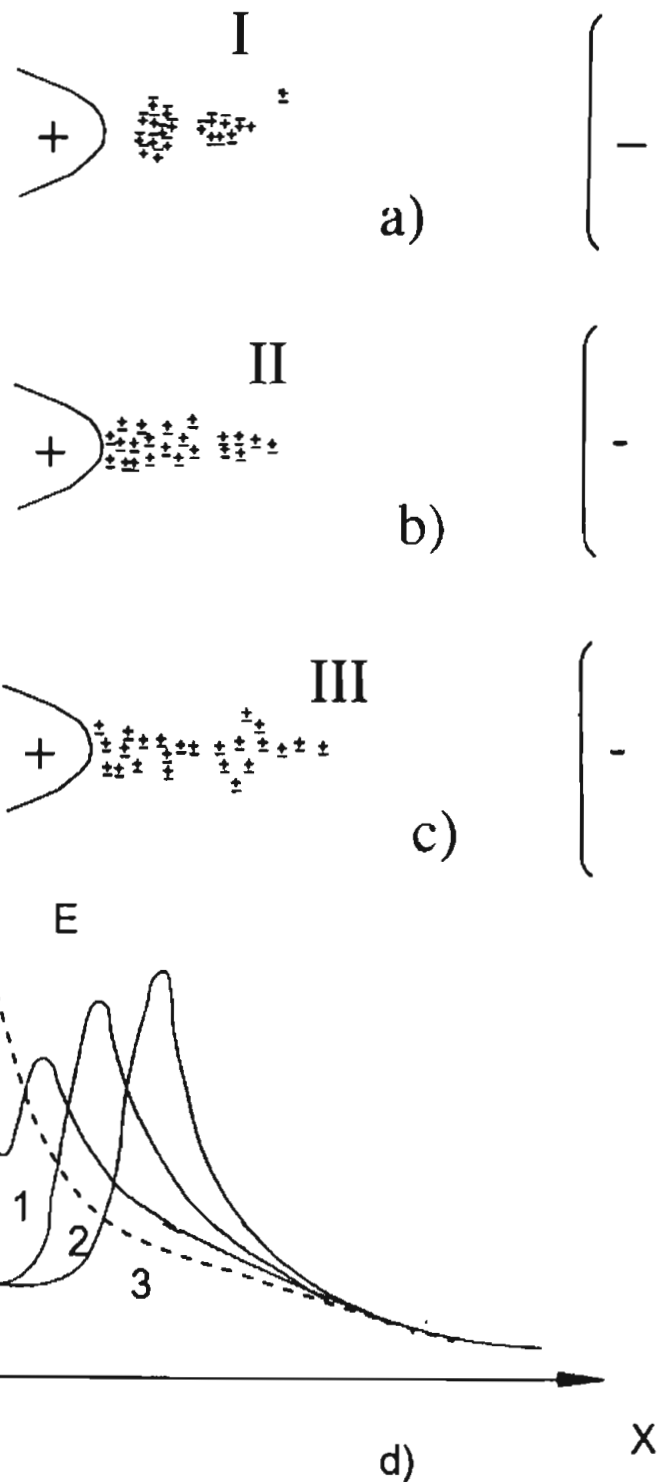
$$U_{fdvq} > U_{fdvq} \quad (5-45)$$

**b) Phóng điện chọc thủng**

Ta cũng xét hai trường hợp: khi mũi nhọn có cực tính dương và khi mũi nhọn có cực tính âm.

\* Khi mũi nhọn có cực tính dương:

Như trên đã phân tích, lớp điện tích không gian dương ở khu vực mũi nhọn làm giảm trường ở phía mũi nhọn, gây khó khăn cho phóng điện vầng quang. Nhưng trường phía cực bản được tăng cường và nếu tiếp tục tăng điện áp thì sẽ đến lúc trường ở đây có cường độ đủ lớn và có thể tạo nên các thác điện tử mới (I) như trên hình 5-17a. Điện tử của thác sẽ hợp với các ion dương của lớp điện tích không gian tạo nên dòng plazma bám vào điện cực mũi nhọn, trong khi đó có các ion dương của thác I sẽ hình thành lớp điện tích không gian dương tồn tại ở khu vực đầu dòng plazma (hình 5-17b). Quá trình trên tương đương với sự kéo dài điện cực



**Hình 5-17. Quá trình phóng điện chọc thủng khi mũi nhọn có cực tính dương.**

mũi nhọn thêm một đoạn bằng chiều dài của dòng và phía trước nó có tồn tại lớp điện tích không gian dương.

Trên hình 5-17d mô tả sự phân bố của trường:

- Đường chấm là trường ngoài (khi chưa bị ảnh hưởng của lớp điện tích không gian).

- Đường 1 mô tả sự phân bố của trường trước khi xuất hiện thác điện tử mới (ứng với đường cong trên hình 5-15c).

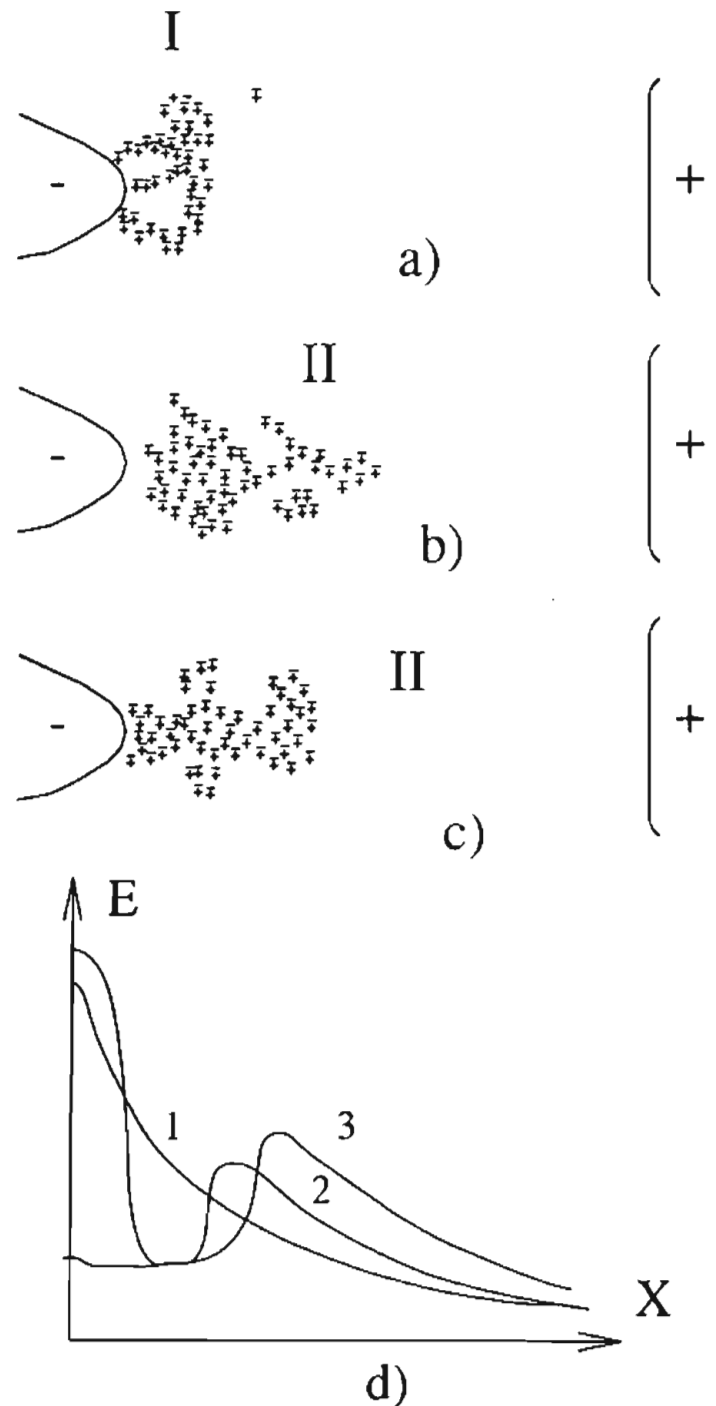
- Đường cong 2 là sự phân bố của trường sau khi mũi nhọn đã được kéo dài (trường được tăng cao hơn so với đường 1 vì đã tăng điện áp và khoảng cách cực bị rút ngắn).

Quá trình tiếp theo xảy ra tương tự: sẽ hình thành các thác mới (II) ở phía đầu dòng (hình 5-17b) và dòng được kéo dài thêm (hình 5-17c), sự phân bố của trường lúc này sẽ theo đường cong 3 (hình 5-17d). Sau đó hình thành các thác mới (III) như hình 5-17c v.v... và quá trình được phát triển tiếp tục, dòng được kéo dài về phía cực bản với nhịp độ ngày càng nhanh do cường độ trường ở khu vực đầu dòng càng được tăng cao (so sánh trị số cực đại của các đường cong 1, 2, 3 trên hình 5-17d) làm cho phóng điện sớm hơn.

Mũi nhọn có cực tính dương có điện áp phóng điện thấp hơn so với trường hợp khác bởi 2 lý do: Thứ nhất là sự tăng cường trường ở đầu dòng làm cho sự ion hoá phần khí tiếp theo dễ dàng hơn. Thứ hai là cường độ điện trường giữa hai điện cực có sự thay đổi lớn (không đồng nhất) xem ở hình 5-17d cũng làm cho điện áp phóng điện giảm. Thực nghiệm cho ta thấy:

$$\overset{\longrightarrow}{U_0} = (2 \div 2,5) \overset{\longrightarrow}{U_0} \quad (\text{khi khoảng}$$

cách giữa 2 cực không đổi).



Hình 5-18. Quá trình phóng điện chọc thủng khi mũi nhọn có cực tính âm.

*\* Mũi nhọn có cực tính âm*

Trên hình 5-16c ta thấy ở gần mũi nhọn trường được tăng cường nhưng ngay sau đó chỉ cần dịch về phía bên phải một ít thì trường giảm đi rất nhiều. Sự tăng của trường ở gần mũi nhọn làm cho quá trình ion hoá ở nơi này phát triển mạnh và cùng một lúc nhiều thác điện tử mới (I) như trên hình 5-18 a. Vì số lượng thác điện tử nhiều nên không thể hình thành một dòng plazma hẹp mà sẽ tạo nên một lớp plazma rộng bao quanh mũi nhọn (hình 5-18b), như vậy sẽ không tập trung điện tích thành dòng.

Lớp điện tích này có tác dụng như một lớp màn chắn dẫn điện với bán kính cong lớn hơn nhiều so với của mũi nhọn (có thể xem như kích thước điện cực được tăng cường). Sự phân bố của trường biểu thị bởi đường cong 2 trên hình 5-18d: ở bên trái lớp plazma trường được tăng cường nhưng bên phải trường bị giảm yếu, do đó ở phía bên phải lớp plazma ion hoá khó phát triển, ngược lại quá trình ion hoá lại phát triển mạnh trong khu vực giữa lớp plazma và điện cực mũi nhọn.

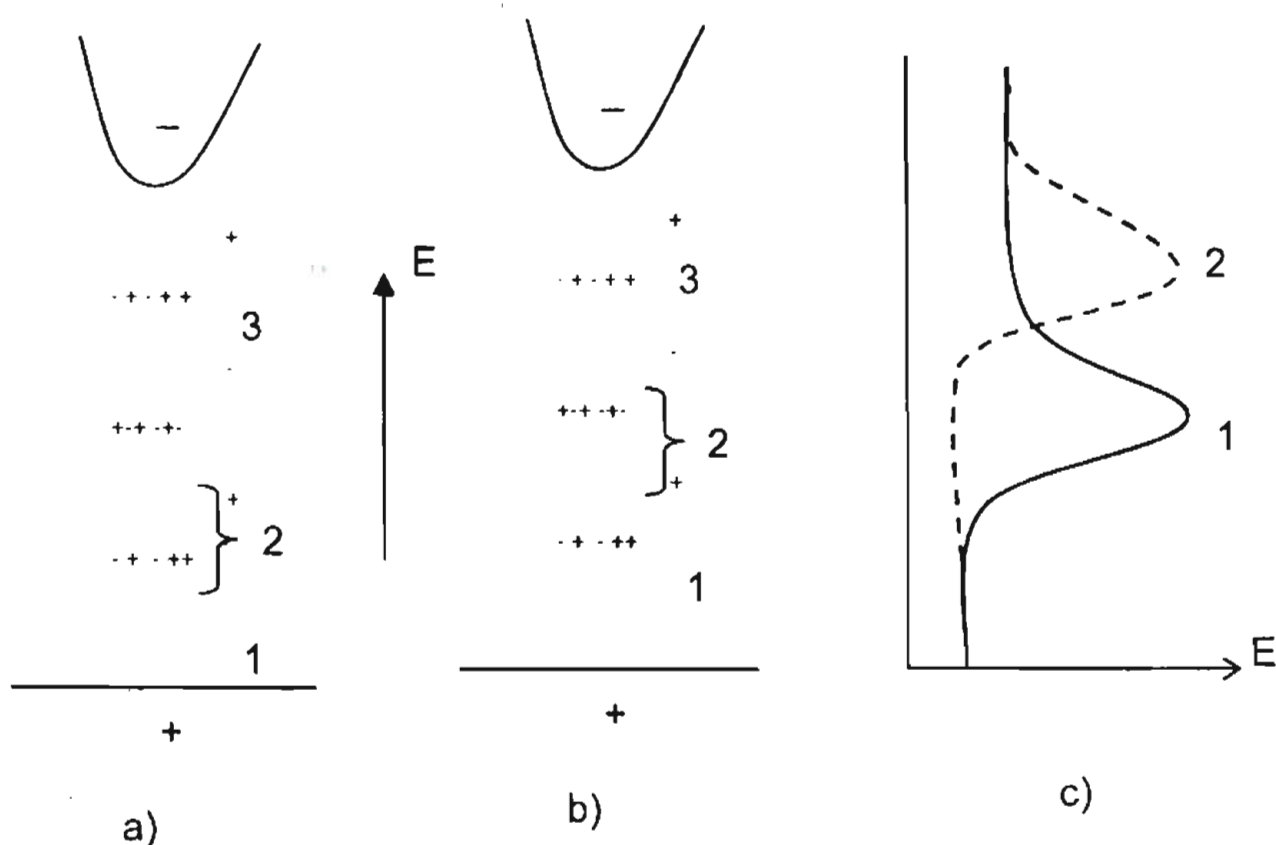
Nếu tiếp tục tăng điện áp thì trong giai đoạn đầu quá trình ion hoá chủ yếu vẫn xảy ra ở phía trái lớp plazma và đưa đến kết quả là thể tích lớp plazma tăng dần và hơi bị méo về phía cực bản. Do điện áp tăng, cường độ điện trường ở phía bên phải lớp plazma cũng tăng theo và khi nó đạt được trị số đủ lớn sẽ gây ion hoá và hình thành các thác điện tử mới (II) như trên hình 5-18b. Quá trình tiếp theo xảy ra tương tự. Kết quả là lớp plazma ngày càng được kéo dài về phía cực bản. So với trường hợp khi mũi nhọn là cực dương thì quá trình phóng điện ở đây khó khăn hơn và do đó điện áp phóng điện cao hơn (có thể gấp 2÷ 2,5 lần). Sự khác nhau của cực tính khiến cho quá trình hình thành và phát triển của dòng có khác nhau nhưng kết quả đều giống nhau ở chỗ dòng plazma kéo dài từ mũi nhọn tới cực bản.

Sự phát triển của dòng trên toàn bộ khoảng cách giữa các điện cực đảm bảo có quá trình phóng điện hoàn toàn nhưng chưa phải là kết thúc. Xét trường hợp mũi nhọn có cực tính âm (hình 5-19). Vì dòng plazma dẫn điện nên kết quả có thể xem tương đương với sự kéo dài điện cực mũi nhọn về phía cực bản, điện áp ở đầu dòng có trị số gần bằng điện áp của mũi nhọn (chênh lệch bởi thành phần điện áp đáng trên thân dòng). Khi dòng tiếp cận với cực bản thì cường độ trường ở khe hở giữa nó với cực bản sẽ tăng lên rất cao vì hầu như toàn bộ điện áp đặt vào khoảng cách còn lại này sẽ gây nên ion hoá mãnh liệt và tạo nên dòng plazma mới có mật độ ion hoá lớn hơn nhiều so với dòng cũ (hình 5-19a).

Sự phân bố của trường như đường 1 hình 5-19c. Vì có điện dẫn cao nên trường trong nội bộ dòng mới nhỏ nhưng trường ở đầu dòng (chỗ tiếp giáp giữa dòng cũ và mới) rất lớn đảm bảo cho dòng mới tiếp tục phát triển từ cực bản về mũi nhọn (hình 5-19b và đường 2 hình 5-19c).



Quá trình này được gọi là "*phóng điện ngược*" vì nó phát triển theo chiều ngược với dòng ban đầu.



**Hình 5-19. Quá trình phóng điện ngược.**

Hình a và b: 1 - dòng mới; 2 - khu vực điện trường mạnh; 3 - dòng cũ.

Phóng điện ngược có tốc độ phát triển rất nhanh, khoảng  $10^9$  cm/giây và bảo đảm hình thành dòng điện có điện dẫn lớn nối liền giữa hai cực, kết thúc quá trình phóng điện.

Tóm lại, khi nghiên cứu quá trình phóng điện vầng quang và phóng điện chọc thủng khi điện cực mũi nhọn dương và âm ta có kết quả sau:

$$\begin{array}{ccc} \xrightarrow{+} & \xrightarrow{-} & \\ U_{fdvq} & > U_{fdvq} & \end{array} \quad (5-45)$$

$$\begin{array}{ccc} \xrightarrow{+} & \xrightarrow{-} & \\ U_{fdct} & < U_{fdct} & \end{array} \quad (5-46)$$

Dựa vào kết quả này người ta sử dụng *chính lưu "âm"* là cực phóng trong hệ thống lọc bụi tĩnh điện, sơn tĩnh điện đem lại hiệu quả cao và đảm bảo an toàn khi vận hành. Bởi vì trong lọc bụi tĩnh điện, sơn tĩnh điện cần có sự ion hoá lớn ở cực phóng, song không được phóng điện chọc thủng. Nếu để xảy ra phóng điện chọc thủng sẽ gây nên cháy nổ phá huỷ thiết bị.

**d) Biện pháp nâng cao điện áp phóng điện trong điện môi khí**

Trong kỹ thuật điện nói chung và kỹ thuật điện cao áp nói riêng những thiết bị điện có cách điện là các chất khí không được phép để xảy ra phóng điện chọc

thùng hay phóng điện bề mặt. Nếu để xảy ra phóng điện sẽ dẫn tới sự phá huỷ thiết bị làm thiệt hại lớn về kinh tế và quá trình vận hành hệ thống điện. Chính vì vậy khi thiết kế, chế tạo thiết bị điện người ta chọn cách điện là các chất khí phải có cường độ cách điện cao, nhiệt độ hoá lỏng thấp và có tính chất truyền nhiệt làm mát tốt ... (ví dụ: khí êlêgaz, khí frêôn hay các chất khí khác) đảm bảo vận hành lâu dài và đem lại hiệu quả kinh tế cao.

Khi nghiên cứu quá trình phóng điện của chất khí trong điện trường đồng nhất ở trên, chúng ta thấy một trong những biện pháp để nâng cao điện áp phóng điện (tức là hạn chế phóng điện), đó là nén áp suất cao hoặc hút chân không. Biện pháp nén áp suất cao vẫn sử dụng để nâng cao điện áp phóng điện trong điện trường không đồng nhất.

Nghiên cứu hiện tượng phóng điện trong trường không đồng nhất cho thấy sự tăng cực bộ của trường là do trong khe hở tồn tại điện tích không gian. Điện tích không gian làm biến dạng trường chung tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành dòng và quá trình phóng điện được phát triển dễ dàng hơn. Ở phạm vi áp suất khí quyển, điện trường phóng điện trong trường đồng nhất và gần đồng nhất, khoảng 30kV/cm, nhưng trong trường không đồng nhất chỉ đạt 20 kV/cm khi mũi nhọn có cực tính âm và khoảng 7,5 kV/cm khi mũi nhọn có cực tính dương.

Với cùng khoảng cách giữa hai cực, nếu ta thay đổi điện trường bằng cách thay đổi điện cực từ đồng nhất sang gần đồng nhất và không đồng nhất, chúng ta có quan hệ của điện áp phóng điện chọn thùng như sau:

$$U_{fdct}^{E \text{ đồng nhất}} > U_{fdct}^{E \text{ gần đồng nhất}} > U_{fdct}^{E \text{ không đồng nhất}}$$

Như vậy, để nâng cao điện áp phóng điện trong trường không đồng nhất thực tiễn hơn cả là cải thiện sự phân bố điện trường sao cho đồng nhất hơn. Theo phương hướng này ta dùng màn chắn đặt giữa các điện cực nhằm ngăn cản sự di chuyển của điện tích không gian. Tuy nhiên tác dụng của màn chắn không cao vì hiệu quả tăng điện áp phóng điện không thể vượt quá giới hạn của trường đồng nhất và màn chắn chỉ phát huy tác dụng khi mũi nhọn có cực tính dương.

Màn chắn thường là một tấm cách điện mỏng đặt trùng với phương của mặt đẳng thế và ở vị trí thích hợp giữa hai điện cực. Cường độ cách điện của bản thân màn chắn không có ảnh hưởng đáng kể vì hiệu quả nâng cao cách điện của toàn bộ khe hở không phải là do cách điện của bản thân mà là do nó làm thay đổi sự phân bố của điện tích không gian và của trường.

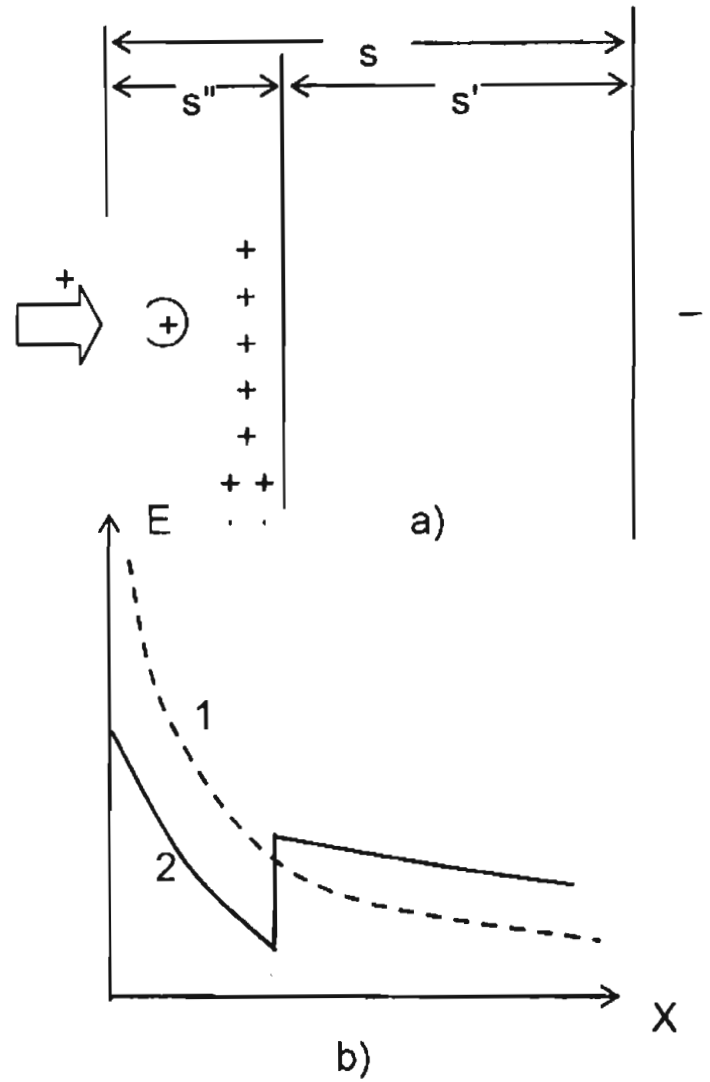
*\* Trường hợp mũi nhọn có cực tính dương.*

Khi chưa đặt màn chắn lớp điện tích không gian dương ở gần mũi nhọn (hình 5-15) làm tăng điện trường ở phía cực bản, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình ion hoá phát triển về phía cực đối diện. Khi có đặt màn chắn các ion dương này di

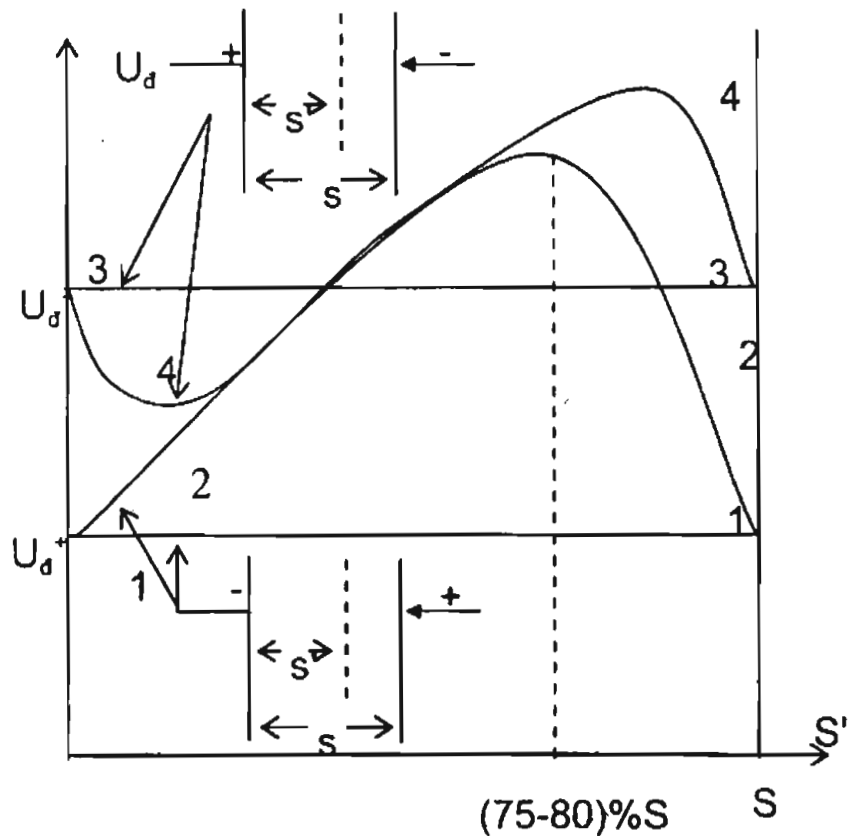
chuyển về phía cực bản sẽ bị giữ lại và phân bố trên mặt màn chắn. Sự phân bố này càng đều khi màn chắn đặt càng xa mũi nhọn. Như vậy, giữa màn chắn và cực bản sẽ hình thành một trường gần đồng nhất. Trên hình 5-20b, đường 1 là sự phân bố của trường khi chưa đặt màn chắn, đường 2 là khi có màn chắn đặt cách mũi nhọn khoảng cách  $s''$ . Cách điện của toàn bộ khe hở là tổng hợp của hai phần có trường không đồng nhất là  $s''$  và trường gần đồng nhất là  $s'$ .

Nếu đặt màn chắn càng gần mũi nhọn thì phần có trường gần đồng nhất  $s'$  sẽ chiếm được phần lớn khoảng cực và điện áp chọc thủng càng tăng. Tuy nhiên nó chỉ có thể đạt tới mức độ nhất định vì khi đặt gần sát mũi nhọn điện tích sẽ phân bố không đều trên màn chắn, cường độ trường sẽ tăng cao và gây nên ion hoá chất khí cả ở phía bên kia của màn chắn (phía cực bản). Do đó điện áp chọc thủng bắt đầu giảm. Đặc biệt khi màn chắn đặt sát mũi nhọn (hoặc cực bản) thì nó mất hoàn toàn tác dụng và điện áp chọc thủng sẽ trở lại trị số như khi không có màn chắn.

Nếu ta thay đổi vị trí màn chắn  $s''$  trong khoảng không gian giữa hai cực  $s$  ( $s$  không đổi) thì điện áp phóng điện chọc thủng là đường 2 của đồ thị hình 5-21, nó đạt trị số cực đại khi  $s'$  bằng



Hình 5-20. Màn chắn đặt trong khe hở có cực mũi nhọn dương.



Hình 5-21. Tác dụng của màn chắn trong trường không đồng nhất.

- Đường 2,4 - có đặt màn chắn.
- Đường 1,3 - chưa có màn chắn.

70%-75% chiều dài khoảng cách cực s. Đường 1 trên hình vẽ là điện áp phóng điện khi chưa có màn chắn. Nếu so sánh trị số của đường 2 ở điểm cực đại với đường 1 thì điện áp phóng điện chọc thủng khi có màn chắn tăng lên hơn hai lần.

*\* Trường hợp mũi nhọn có cực tính âm.*

Do ảnh hưởng của các lớp điện tích không gian dương và âm (hình 5-16 khi mũi nhọn có cực tính âm) nên trường được tăng cường ở phía mũi nhọn nhưng phía cực bản trường giảm đi rất nhiều. Khi có màn chắn lớp điện tích không gian âm sẽ phân bố trên mặt màn chắn tạo nên trường gần đồng nhất giữa nó với cực bản. Như vậy nếu lúc chưa có màn chắn trị số điện áp chọc thủng tăng cao chủ yếu là do ảnh hưởng của lớp điện tích không gian dương thì khi có màn chắn lớp điện tích không gian âm sẽ giữ vai trò chính.

Tác dụng của màn chắn tương tự như trường hợp trên nghĩa là tạo nên một trường gần đồng nhất (s') giữa nó với cực bản; vì lý do này trên hình 5-21 đường 2 và 4 có phần lớn đoạn đường hầu như đi trùng với nhau, không có sự phân biệt về cực tính. Đối chiếu trị số điện áp chọc thủng giữa đường 3 và đường 4 thấy rằng, trong trường mũi nhọn có cực tính âm màn chắn chỉ phát huy tác dụng trong một phạm vi nào đó của khoảng cực ( $s' = (0,5 \div 1) s$ ). Đặc biệt khi đặt ở các vị trí s' bé thì màn chắn lại làm giảm điện áp chọc thủng tới mức thấp hơn so với khi không có màn chắn, điều này có thể giải thích là do ở phía mũi nhọn và cực bản có mật độ điện tích lớn gần như dẫn điện, màn chắn như là điện cực âm, giữa màn chắn và cực bản có khoảng cách bé và điện áp phóng điện sẽ có trị số thấp.

Xét hai trường hợp mũi nhọn có cực tính dương và mũi nhọn có cực tính âm, ta thấy màn chắn có tác dụng tốt nhất khi s' ở vị trí khoảng (75-80)%S. Như vậy màn chắn vẫn phát huy tác dụng ở điện áp xoay chiều, làm tăng điện áp phóng điện chọc thủng khi đặt đúng vị trí. Dựa vào tính chất này người ta sử dụng màn chắn trong thiết bị điện cao áp để tăng cường cách điện và giảm kích thước thiết bị đem lại hiệu quả kinh tế cao.

### **5.2.8. Phóng điện vầng quang trên đường dây tải điện**

Đường dây tải điện là một phần tử lớn trong hệ thống điện để truyền tải và phân phối điện năng từ các nhà máy điện đến các nơi tiêu thụ. Sự truyền tải năng lượng điện với công suất lớn thường đòi hỏi phải tăng điện áp và dòng điện trên đường dây dài hàng trăm thậm chí tới hàng nghìn kilômét. Xung quanh dây dẫn điện áp cao có cường độ điện trường lớn sẽ xảy ra hiện tượng phóng điện vầng quang và gây nên tổn hao năng lượng lớn, gây nhiễu loạn hệ thống thông tin liên lạc và sự ăn mòn vật liệu ... Do vậy chúng ta phải nghiên cứu hiện tượng phóng điện vầng quang trên đường dây cao áp, từ đó đề ra các biện pháp làm giảm phóng điện vầng quang và tổn hao do vầng quang gây nên.

Vầng quang là một dạng phóng điện tự duy trì đặc trưng cho sự phóng điện trong trường không đồng nhất. Phóng điện tuy đạt được điều kiện tự duy trì nhưng dòng không thể kéo dài trên toàn bộ khoảng cực mà chỉ giới hạn trong phạm vi nhỏ ở gần điện cực có bán kính cong bé. Phạm vi ấy là quãng của vầng quang. Các quá trình ion hoá hoặc kết hợp trở về trạng thái bình thường của các phân tử bị kích thích phát sinh rất nhiều photon khiến cho vùng hẹp này toả sáng (do đó mà có tên gọi là vầng quang). Các ion được tạo nên trong quãng của vầng quang dưới tác dụng của điện trường sẽ chuyển dịch ra phía ngoài và hình thành dòng điện vầng quang. Điện áp tăng cao thì số ion tăng và dòng điện vầng quang tăng. Quan hệ của dòng điện vầng quang với điện áp là một trong các đặc tính năng lượng cơ bản của phóng điện vầng quang.

Nội dung vật lý của vầng quang đã được nghiên cứu các phân ở trên trong khe hở mũi nhọn - cực bản, trong đó mũi nhọn thay thế cho dây dẫn có đường kính bé. Điện áp bắt đầu có phóng điện tự duy trì gọi là điện áp phát sinh vầng quang ứng với trị số  $U_{vq}$ .

Phóng điện vầng quang có ý nghĩa quan trọng trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật điện cao áp. Ở một số cơ sở luyện kim, nhà máy nhiệt điện, nhà máy sản xuất xi măng, hoá chất v.v... đã dùng vầng quang âm để lọc bụi. Điện tử sinh ra bởi quá trình ion hoá trong quãng vầng quang sẽ chuyển dịch về phía cực dương, trong quá trình đó nó sẽ bám vào bụi khói, di chuyển về và bám vào cực lẳng là cực dương. Qua hệ thống rung và gõ sau chu kỳ nhất định bụi được xả xuống phễu thu bụi. Ngoài ra phóng điện vầng quang còn sử dụng trong hệ thống sơn tĩnh điện đem lại hiệu quả kinh tế và chất lượng sơn.

Trong hệ thống điện vầng quang có các tác dụng khác nhau. Bình thường không nên để xảy ra vầng quang vì sự chuyển dịch của ion dưới tác dụng của trường sẽ tạo nên dòng điện rò, gây tổn hao năng lượng. Tuy vậy vầng quang lại có tác dụng tích cực trong bảo vệ hệ thống điện chống quá điện áp khí quyển. Khi có sét đánh trên đường dây, vầng quang sẽ tiêu hao năng lượng của các sóng quá điện áp sét, làm giảm biên độ và độ dốc đầu sóng, do đó tăng an toàn cho cách điện của trạm biến áp và nhà máy điện.

#### ***a) Vầng quang trên đường dây dẫn điện một chiều***

Đặc điểm của phóng điện vầng quang của " dây dẫn - cực bản " khi dây dẫn ngắn cũng giống như của khe hở " mũi nhọn - cực bản ". Kết quả quan sát cho thấy khi dây dẫn có cực tính âm dòng điện vầng quang cũng có các dạng xung lặp lại đều đặn, còn khi cực tính dương thì các xung dòng điện rất hỗn loạn. Nhưng cần chú ý là ngay cả khi dây dẫn được đánh bóng rất kỹ trên bề mặt cũng có chỗ bị nhám và ở đó vầng quang xuất hiện sớm.

Khi dây dẫn dài, vầng quang có thể phát triển đồng thời tại nhiều điểm vì vậy các xung dòng điện hợp lại thành dòng điện liên tục. Nếu tăng điện áp thì vầng quang sẽ phát triển trên toàn bộ bề mặt dây dẫn và dòng điện mất hẳn tính chất không liên tục của nó.

Thực nghiệm cho thấy, cường độ trường phát sinh vầng quang  $E_{vq}$  ít phụ thuộc vào cực tính. Trong tụ điện hình trụ - dây dẫn bán kính  $r_0$  đặt dọc theo trục của hình trụ bán kính  $R$  ( $R \gg r_0$ ) - cường độ trường phát sinh vầng quang được xác định bằng công thức kinh nghiệm:

$$E_{vq} = 31,8 \delta \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{r_0 \delta}} \right) \quad (5-47)$$

và điện áp phát sinh vầng quang:

$$U_{vq} = E_{vq} \cdot r_0 \cdot \ln \frac{R}{r_0} \quad (5-48)$$

Với hai dây dẫn bán kính  $r_0$  đặt cách nhau khoảng cách là  $s$  ( $s \gg r_0$ ) hay là dây dẫn đặt cách mặt phẳng  $h = \frac{s}{2}$  thì cũng có các công thức tính tương tự:

$$E_{vq} = 29,8 \delta \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r_0 \delta}} \right) \quad (5-49)$$

$$U_{vq} = E_{vq} \cdot r_0 \cdot \ln \frac{s}{r_0} \quad (5-50)$$

Sự dịch chuyển của điện tích từ dây dẫn có vầng quang đến điện cực đối diện tạo nên dòng điện vầng quang. Dòng điện này có tích chất như một dòng điện rò và gây tổn hao năng lượng gọi là tổn hao vầng quang. Ứng với đơn vị dài của đường dây, tổn hao này được xác định theo công thức:

$$P = U \cdot I = U \cdot f(u) \quad (5-51)$$

$I$  - dòng điện vầng quang;  $I = f(u)$  - đặc tính von-ampe của vầng quang.

Việc xác định biểu thức để giải thích đặc tính von-ampe của vầng quang rất phức tạp, cho đến nay vẫn chưa được giải quyết thích đáng do chưa xác định được chính xác sự phân bố điện tích trong quang của vầng quang cũng như trong khu vực ngoài.

Trong tụ điện hình trụ có thể xác định gần đúng đặc tính von-ampe bằng cách giải phương trình Poisson trong tọa độ trụ:

$$\operatorname{div} E = \frac{dE}{dr} + \frac{E}{r} = \frac{1}{r} \frac{d(Er)}{dr} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

với:  $\rho$  - mật độ điện tích khối;  $K = \frac{U}{E}$  - độ linh hoạt của điện tích.

Để tính dòng điện văng quang trong trường hợp này có thể sử dụng công thức sau:

$$I = \frac{8\pi \cdot \epsilon \cdot k}{R^2 \ln \frac{R}{r_0}} \cdot U(U - U_{vq}) \quad (5-52)$$

Công thức tính tổn hao văng quang của đường dây dẫn điện một chiều có thể viết dưới dạng gần đúng như sau:

$$P = A \cdot U^2 (U - U_{vq}), \quad \text{kW/km} \quad (5-53)$$

Trong đó: A - là hệ số phụ thuộc vào kích thước của khe hở.

Trên đường dây dẫn điện một chiều văng quang đơn xảy ra khi dây dẫn chỉ có một cực tính, còn văng quang kép là khi các dây dẫn đặt trên cột có cực tính khác nhau.

### ***b) Văng quang trên đường dây dẫn điện xoay chiều***

Khi nghiên cứu về phóng điện văng quang trên đường dây dẫn điện xoay chiều ba pha, ta cần phải xem xét điện tích khối của các pha có ảnh hưởng lẫn nhau không. Vì cực tính của các dây dẫn biến đổi trong từng chu kỳ nên điện tích khối của mỗi pha chỉ bị đẩy xa khỏi dây dẫn một đoạn đường nào đó, còn trong nửa chu kỳ sau lại bị kéo về phía dây dẫn.

Ta xét quá trình phóng điện trên một dây dẫn xoay chiều với giả thiết dây dẫn được nối với nguồn đúng vào lúc điện áp bằng không. Trên hình 5-22a cho đường biểu diễn điện áp nguồn  $U(t)$  cường độ trường trên mặt dây dẫn  $E_{dd}(t)$  và điện tích dây dẫn  $Q_{dd}(t)$  biến thiên trong phạm vi một chu kỳ.

\* **Khi:  $t = t_0 \div t_1$ :** thời gian này chưa xuất hiện văng quang nên điện tích của dây dẫn được tính theo công thức:

$$Q_{dd} = U \cdot C_{hh} \quad (5-54)$$

$C_{hh}$  - điện dung của dây dẫn đối với đất khi chưa có văng quang.

\* **Khi  $t = t_1 \div t_2$ :** điện áp và cường độ trường trên mặt dây dẫn đạt trị số tới hạn  $U_{vq}$ ,  $E_{vq}$  để phát sinh văng quang. Lúc này có xuất hiện các dòng plazma, một số ion theo dòng đi từ dây dẫn ra khoảng không gian xung quanh sẽ tạo nên điện tích khối dương (hình 5-22a). Khi điện áp tăng từ trị số  $U_{vq}$  tới trị số biên độ  $U_{max}$  thì dòng càng kéo dài và số điện tích chuyển dịch ra ngoài càng nhiều khiến cho dòng điện dẫn cao và trường trong nội bộ dòng bé hơn nhiều so với trị số  $E_{vq}$ . Trong khi đó cường độ trường trên mặt dây dẫn giữ không đổi và bằng  $E_{vq}$  vì nó chỉ cần đảm bảo có quá trình ion hoá chung quanh dây dẫn, điện áp tăng sẽ làm cho dòng dài thêm nhưng trường thì không tăng thêm. Do đó điện tích trên mặt dây dẫn cũng giữ không đổi:

$$Q_{dd} = 2\pi\epsilon \cdot E_{vq} \quad (5-55)$$

Điện tích này tạo nên phần điện áp trên dây dẫn:

$$U'_{dd} = \frac{Q_{dd}}{C_{hh}} \quad (5-56)$$

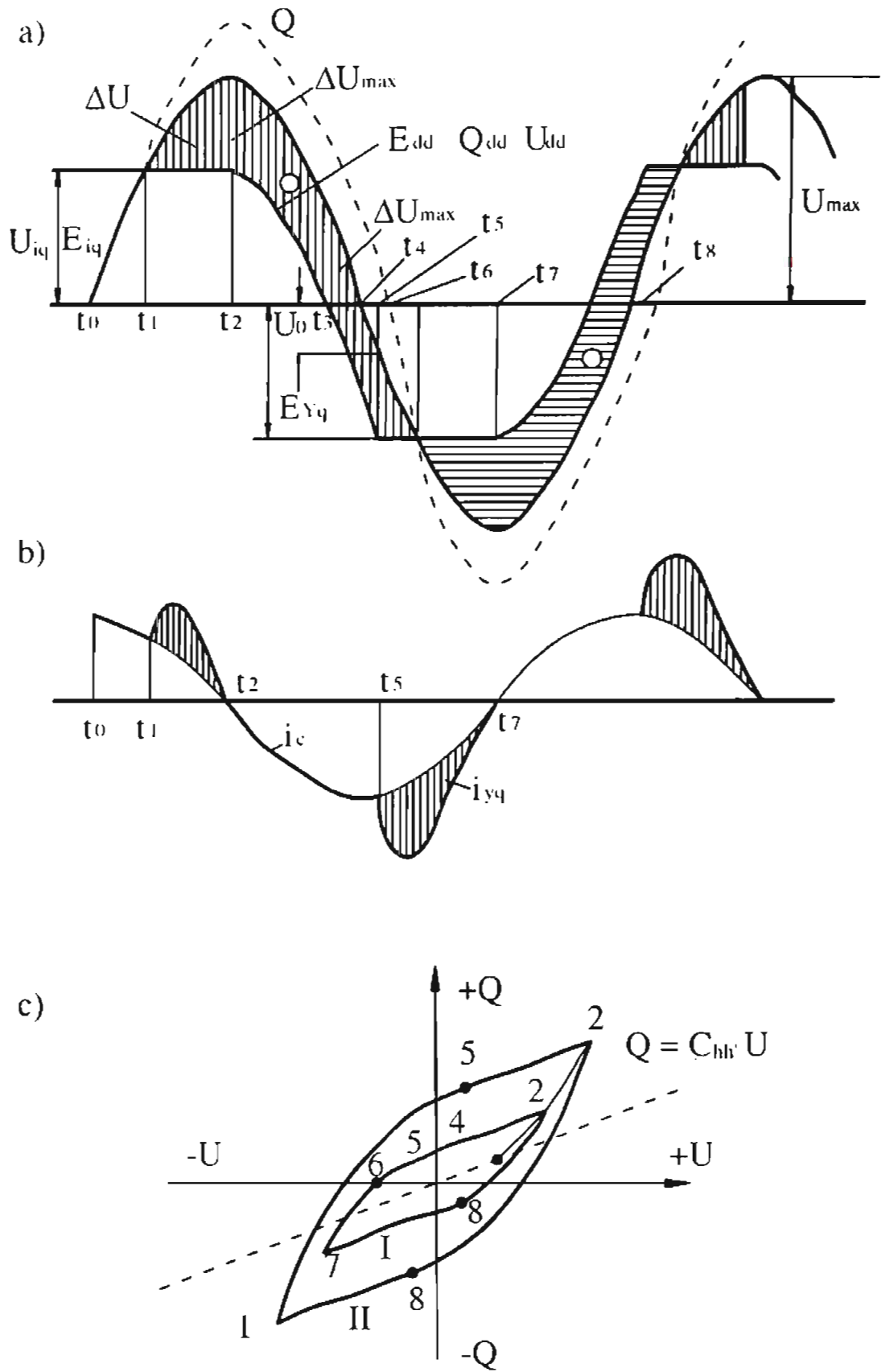
Như vậy phần điện áp còn lại trên dây dẫn  $\Delta U = U = U'_{dd}$  (biểu thị bởi phần gạch theo chiều thẳng đứng trên hình 5-22a) là do điện tích khối  $\Delta Q$  tạo nên. Trên hình vẽ, đường chấm biểu thị trị số điện tích tổng mà nguồn phải cung cấp do có thêm quá trình hình thành điện tích khối  $\Delta Q$ , điện tích này có trị số:

$$Q = Q_{dd} + \Delta U.$$

Khi điện áp đạt tới trị số  $U_{max}$  thì cũng đạt được các trị số  $\Delta U_{max}$ ,  $\Delta Q_{max}$ ,  $Q_{max}$ .

\* **Khi  $t = t_2 \div t_3$ :** khi  $t > t_2$  điện áp nguồn bắt đầu giảm và kéo theo sự giảm của điện tích tổng  $Q$ .

Những điện tích trên bề mặt dây dẫn sẽ chạy về nguồn trước nghĩa là  $Q_{dd}$  bị giảm do đó làm giảm cường độ trường trên mặt dây dẫn và ion hoá chấm dứt. Các dòng plasma mất dần và tiến tới mất hẳn tính chất dẫn điện, để lại trong khoảng không gian quanh dây dẫn số lượng điện tích khối  $\Delta Q_{max}$  (hình 5-22b).



Hình 5-22. Vầng quang điện trường dây dẫn điện xoay chiều.

a) Biến thiên theo thời gian của điện áp  $U$ , cường độ trường trên mặt dây dẫn, điện tích tổng  $Q$ ;

b) Dòng điện  $i_c$  và  $i_{vq}$ ; c) đặc tính Von-Culông



Tại thời điểm  $t = t_3$ , toàn bộ phần điện tích trên dây dẫn đã trả về nguồn, cường độ trường trên mặt dây dẫn cũng như thành phần điện áp  $U'_{dd}$  giảm tới số không. Điện áp  $U(t)$  còn có trị số dương là do ảnh hưởng của điện tích khối (đường biểu diễn của  $E_{dd}$ ,  $Q_{dd}$  và  $U'_{dd}$  trong khoảng thời gian này được xác định bằng cách lấy tung độ của đường  $U(t)$  trừ đi một đoạn  $\Delta U_{max}$  còn đường  $Q(t)$  thì xác định bằng cách cộng thêm vào tung độ đường  $Q_{dd}$  đại lượng  $\Delta Q_{max}$ ).

\* **Khi  $t = t_4$**  trên dây dẫn xuất hiện điện tích âm đủ để tạo nên phần điện áp có trị số bằng  $\Delta U_{max}$  (hình 5-22a) triệt tiêu phần điện áp do điện tích khối gây nên và làm cho điện áp tổng giảm tới số không.

**Tại thời điểm  $t_5$**  trường trên dây dẫn đã đạt được trị số tới hạn để phát sinh vầng quang âm. Xung quanh dây dẫn bắt đầu hình thành điện tích khối âm, chúng sẽ bù các điện tích khối dương còn lại từ nửa chu kỳ trước và đến khi  $t = t_6$  thì điện tích khối dương được bù hoàn toàn và điện tích tổng  $Q$  lúc này có trị số bằng không. Các thành phần  $Q_{dd}$ ,  $E_{dd}$  và  $U'_{dd}$  sẽ giữ không đổi trong suốt giai đoạn có xảy ra quá trình ion hoá ( $t_5 \div t_7$ ).

Từ hình vẽ có thể thấy được khi  $t = t_5$  điện áp nguồn chỉ cần đạt tới mức  $U_0 < U_{vq}$  đã có thể bắt đầu có vầng quang âm. Trị số  $U_0$  được xác định theo biểu thức:

$$\begin{aligned}
 U_0 &= U_{vq} - \Delta U_{max} \\
 \text{Thay thế trị số} \quad \Delta U_{max} &= U_{max} - U_{vq} \text{ sẽ được:} \\
 U_0 &= 2U_{vq} - U_{max} \qquad (5-57)
 \end{aligned}$$

Do đó nếu biên độ điện áp nguồn càng lớn thì vầng quang âm xuất hiện càng sớm thậm chí có thể phát sinh ngay trong nửa chu kỳ dương của điện áp (khi  $U_{max} > 2U_{vq}$  thì  $U_0 < 0$ ).

\* **Khi  $t = t_5 \div t_7$** : Quá trình được lặp lại như ở đoạn thời gian  $t = t_1 \div t_2$ , điện áp nguồn tăng tới trị số biên độ và điện tích khối âm đạt trị số cực đại  $\Delta Q_{max}$ . Các quá trình về sau cũng được lặp lại tương tự.

Hình 5-22b cho quan hệ về dòng điện khi có vầng quang. Trên thành phần dòng điện, điện dung hình "sin" ic xác định bởi điện áp nguồn và điện dung hình học của đường dây ( $ic = C_{hd} \frac{du}{dt}$ ) có xếp chồng thành phần dòng điện do sự chuyển dịch ion của quá trình ion hoá. Thành phần này chỉ tồn tại trong giai đoạn có vầng quang (khoảng thời gian  $t_1 \div t_2$ ,  $t_5 \div t_7$ ).

Hình 5-22c cho đặc tuyến von-culông của đường dây có vầng quang, đó là quan hệ giữa điện tích tổng do nguồn cung cấp với điện áp nguồn. Đoạn thẳng 01 ứng với khoảng thời gian khi chưa xuất hiện vầng quang, độ nghiêng của nó xác

định bởi điện dung hình học của đường dây, các phần đường đặc tuyến được xây dựng từ các số liệu của hình 5-22a.

**c) Tổn hao vầng quang trên đường dây dẫn điện xoay chiều**

\* Để tính tổn hao vầng quang của đường dây dẫn điện xoay chiều có thể dựa vào đặc tính von-culông (hình 5-22c), tổn hao trong một chu kỳ được tính theo:

$$P = \int_0^{\pi} u i dt = \int u dQ$$

nó tỷ lệ với diện tích của đường đặc tính von-culông. Tổn hao trong một đơn vị thời gian nghĩa là công suất tổn hao vầng quang có trị số bằng:

$$\Delta P = f \cdot \int u dQ$$

f- là tần số của điện áp xoay chiều.

\* Phương hướng chính để xác định tổn hao vầng quang trên đường dây dẫn xoay chiều vẫn là tổng quát hoá các số liệu thực nghiệm. Một trong các công thức kinh nghiệm được quen biết nhiều là công thức của Pich:

$$\Delta P = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{s}} (U - U_0)^2 \cdot 10^5 \text{ kW / km.pha.}$$

Trong đó:  $\delta$  - mật độ tương đối của không khí;

$r_0$  - bán kính dây dẫn , cm;

s - khoảng cách trung bình hình học giữa các dây dẫn , cm;

f- tần số;

U - giá trị hiệu dụng của điện áp pha, KV;

$U_0$  - trị số điện áp tính toán , gần bằng điện áp vầng quang. Trị số này được tính theo công thức:

$$U_0 = 21,2 \cdot \delta \cdot r_0 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \ln \frac{s}{r_0} \quad (5-58)$$

$m_1$  là hệ số nhả được đặc trưng cho bề mặt của dây dẫn (0,85 ÷ 0,9).

$m_2$  - hệ số khí hậu, biểu thị mối quan hệ giữa tổn hao vầng quang với điều kiện khí hậu.

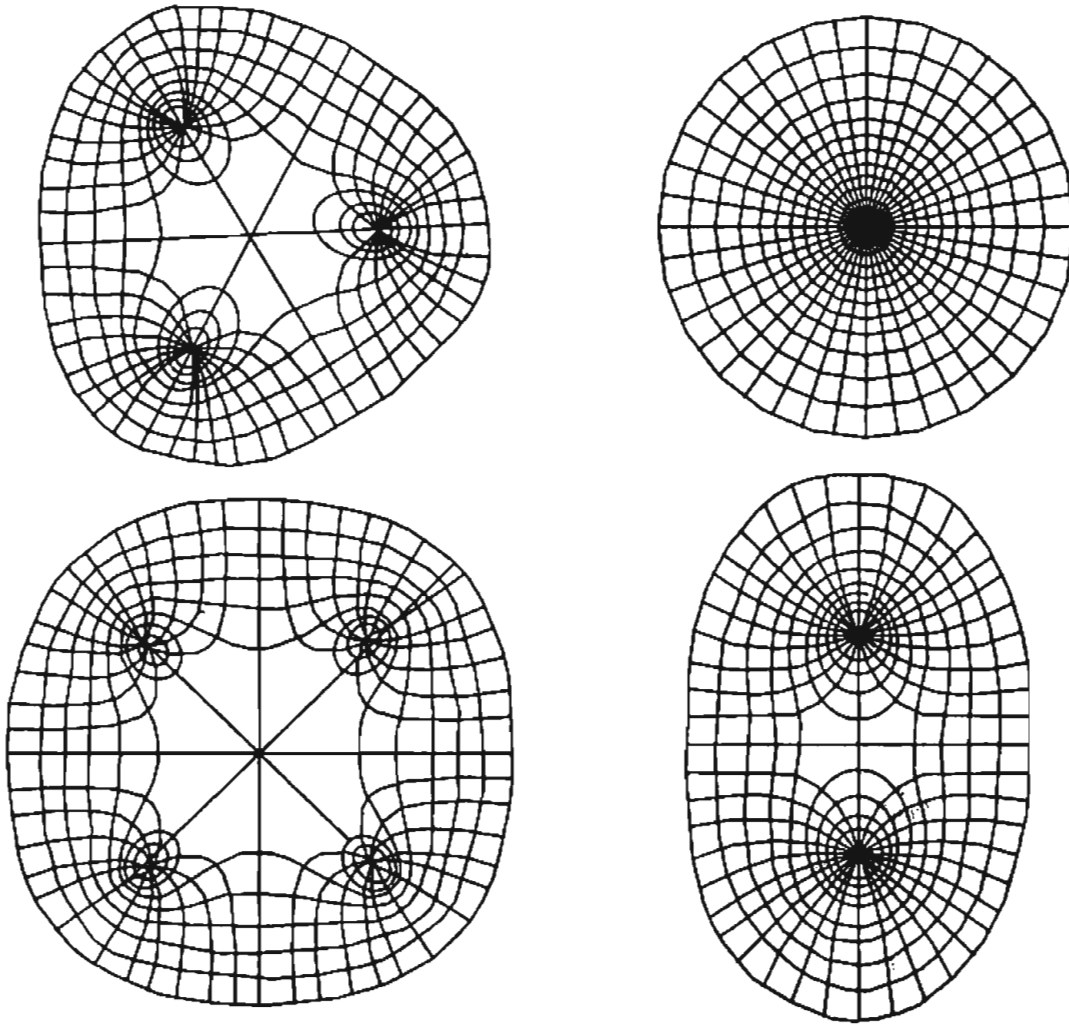
Hiện nay công thức Pich không được dùng để xác định tổn hao vầng quang vì kết quả của nó khác nhiều so với số liệu thực nghiệm, đặc biệt đối với đường dây siêu cao áp.

\* Đối với đường dây siêu cao áp để giảm tổn hao vầng quang và khả năng chuyên tải năng lượng cần phải có đường kính lớn, điều đó gây rất nhiều khó khăn cho sản xuất cũng như trong xây lắp. Vấn đề này được giải quyết bằng cách dùng

dây phân nhỏ - dây dẫn ở mỗi pha có tiết diện lớn được thay thế bằng một số dây dẫn tiết diện nhỏ hơn đặt cách nhau theo khoảng cách thích hợp.

Trên hình 5-23 cho sự phân bố của trường khi dây dẫn được thay bằng 2, 3, 4 dây phân nhỏ.

Để tính cường độ trường trên mặt dây phân nhỏ có thể dùng phương pháp xếp chồng: trường trên mặt dây phân nhỏ sẽ là tổng hợp của trường tạo nên bởi điện tích của chính nó và trường được tạo nên bởi điện tích của dây phân nhỏ ở bên cạnh.



Hình 5-23. Phân bố trường của dây đơn và dây phân nhỏ.

Trường tạo nên bởi điện tích của chính nó có dạng hình tia và có trị số tuyệt đối bằng:

$$E = \frac{U_{ph}}{n \cdot r_0 \cdot \ln \frac{s}{r_{t\otimes}}} \quad (5-59)$$

Trong đó:  $U_{ph}$  - điện áp làm việc của dây dẫn ( điện áp pha );  $n$  - số dây phân nhỏ;  $r_0$  - bán kính dây phân nhỏ;  $s$  - khoảng cách các pha;

$$r_{td} = \sqrt[n]{r_0 \cdot D_1 \cdot D_2 \dots D_{n-1}}; \quad D = 2r_{td}.$$

$D_1, D_2 \dots D_{n-1}$  - là khoảng cách từ một dây phân nhỏ đến các dây phân nhỏ khác trong pha.

Trường tạo nên bởi điện tích của dây phân nhỏ bên cạnh cũng có dạng hình tia và có trị số:

$$\Delta E = \frac{q}{2\pi\epsilon D} = E \cdot \frac{r_o}{D} \quad (5-60)$$

Trường cực đại và cực tiểu khi dùng hai dây phân nhỏ được tính:

$$E_{\max}^{(2)} = E_{tb} \left( 1 + \frac{2r_o}{D} \right) \quad (5-61)$$

$$E_{\min}^{(2)} = E_{tb} \left( 1 - \frac{2r_o}{D} \right) \quad (5-62)$$

Công thức tính trị số trường cực đại khi dùng 3 và 4 dây phân nhỏ:

$$E_{\max}^{(3)} = E_{tb} \left( 1 + \frac{2\sqrt{3}r_o}{D} \right) \quad (5-63)$$

$$E_{\max}^{(4)} = E_{tb} \left( 1 + \frac{3\sqrt{r_o}}{D} \right) \quad (5-64)$$

Từ biểu thức của trị số  $E_{\max}$  - trị số đáng được quan tâm nhất vì có liên quan trực tiếp đến sự phát sinh vầng quang - có thể thấy rõ với khoảng cách  $D$  thích hợp thì trị số  $E_{\max}$  có trị số bé nhất, đó là trị số được chọn bằng phương pháp tính toán hoặc thực nghiệm khi thiết kế đường dây.

Dùng đường dây phân nhỏ ngoài tác dụng làm giảm tổn hao vầng quang còn có ưu điểm khác là làm giảm điện cảm của đường dây do đó tăng thêm khả năng chuyên tải công suất và đem lại hiệu quả kinh tế lớn.

Hiện nay để tính toán sơ bộ về trị số tổn hao vầng quang thường dùng công thức Maiơ, công thức này có thể dùng cho dây đơn cũng như dây phân nhỏ:

$$\Delta P = nkfr_o^2 \cdot E_{td} (E_{td} - E_{vq}) \left( 2,3 \ln \frac{1350E_{td}}{fr_o} - 1 \right) 10^{-5}, \text{ kW / km pha} \quad (5-65)$$

$n$  - số dây phân nhỏ;  $f$  - tần số, Hz;  $r_o$  - bán kính dây dẫn, cm;  $E_{vq}$  - cường độ trường phát sinh vầng quang, kV/cm;  $E_{td} = \frac{E_{\max} + E_{tb}}{2}$ , kV/cm;  $K$  - hệ số liên quan tới khí hậu  $K = 44$  và  $E_{vq} = 17\text{kV/cm}$  khi khí hậu tốt và  $k = 31,5$ ;  $E_{vq} = 11\text{kV/cm}$  khi khí hậu xấu.

Nếu thời gian có khí hậu xấu chiếm tỷ lệ  $m\%$  của thời gian cả năm thì công suất tổn hao vầng quang trung bình hàng năm là:

$$\Delta P_{\text{th.năm}} = m\% \Delta P_{\text{xấu}} + (1-m\%) \Delta P_{\text{lối}} \quad (5-66)$$

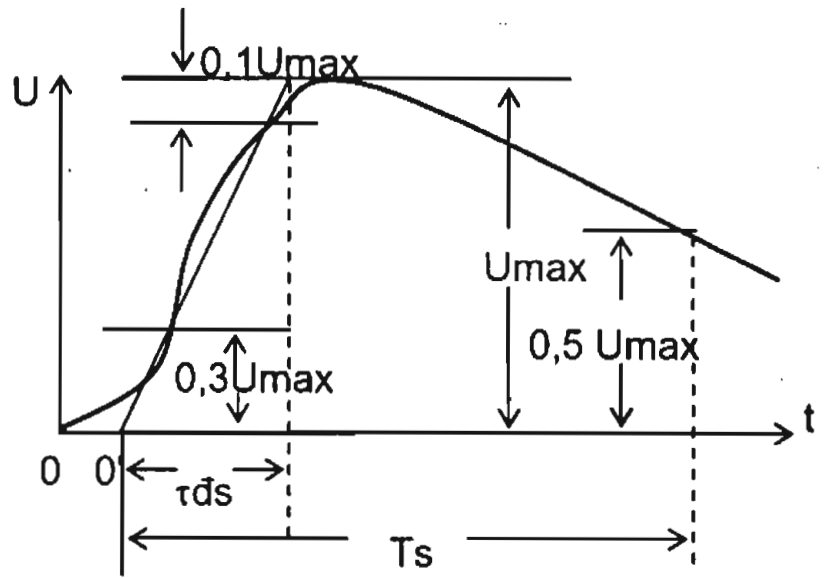
Nói chung, các tính toán về vầng quang cho đến nay vẫn chưa toàn diện và chính xác vì bản thân vầng quang có liên quan đến nhiều yếu tố phức tạp mà trong tính toán chưa đề cập đến một cách đầy đủ.

### 5.2.9. Phóng điện ở điện áp xung

#### a) Điện áp xung

Ở các phần trên đã nghiên cứu phóng điện trong chất khí khi điện áp tác dụng là điện áp một chiều và xoay chiều. Trong thực tế điện áp tác dụng còn có thể ở dạng xung gây nên bởi phóng điện sét vào đường dây trên không hoặc khi sét đánh vào khu vực gần đường dây, đánh vào thiết bị của trạm biến áp ngoài trời v.v...

Loại điện áp này có dạng sóng xung kích: điện áp tăng nhanh từ không đến trị số cực đại (đầu sóng) và sau đó giảm chậm đến trị số không (đuôi sóng). Hình 5-24 cho dạng sóng xung kích và cách xác định độ dài đầu sóng  $T_{ds}$  và độ dài sóng  $\tau_s$ .



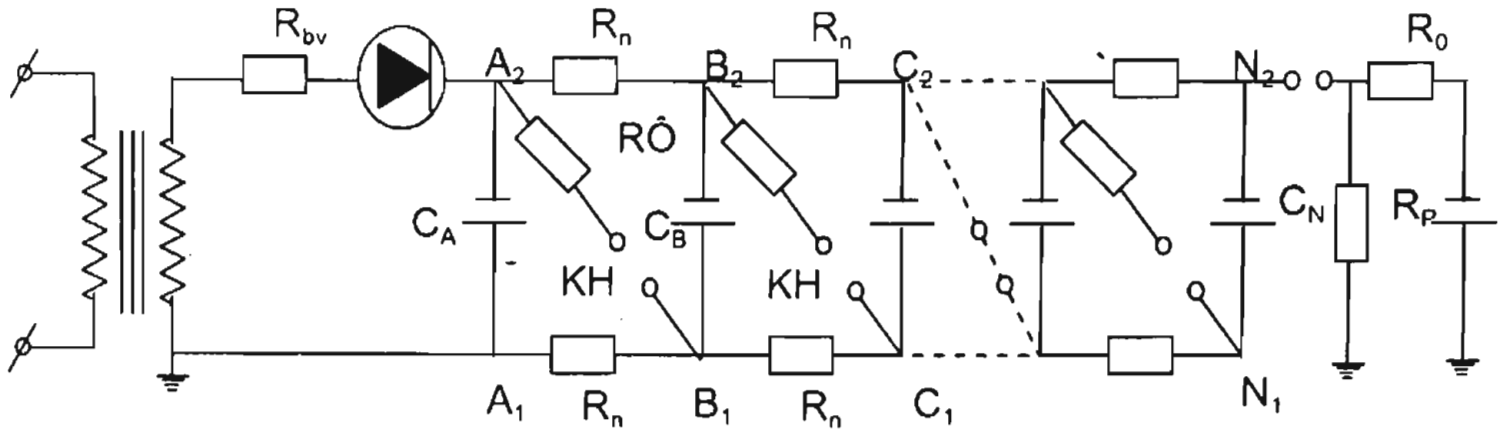
Hình 5-24. Cách xác định độ dài sóng và độ dài đầu sóng.

Do phần đầu sóng tăng chậm và không có ý nghĩa quan trọng đến quá trình phóng điện, nên nó được thay thế bằng đoạn thẳng xiên góc qua các điểm có tung độ  $0,3 U_{\text{max}}$  và  $0,9 U_{\text{max}}$ , giao điểm của đường xiên này với trục hoành và đường nằm ngang qua  $U_{\text{max}}$  cho độ dài đầu sóng  $\tau_{ds}$ . Độ dài sóng  $\tau_s$  tính tới khi điện áp giảm xuống chỉ còn một nửa trị số biên độ  $U_{\text{max}}$ . Quy định này xuất phát từ kết quả thực nghiệm, khi điện áp đã giảm tới mức 50% trị số biên độ sẽ không còn khả năng gây nên phóng điện do đó có thể không cần chú ý đến phần sau của sóng.

Theo quy ước quốc tế, dạng sóng tiêu chuẩn có độ dài đầu sóng:  $\tau_{ds} = 1,2/\mu$  giây  $\pm 30\%$  và độ dài sóng  $\tau_s = 50/\mu$  giây  $\pm 20\%$ . Ký hiệu sóng xung  $\tau = 1,2/50$ . Ở Liên Xô cũ sóng tiêu chuẩn với độ dài đầu sóng  $\tau_{ds} = 1,5/\mu$  giây và độ dài sóng  $\tau_s = 40/\mu$  giây ( $\tau = 1,5/40$ ).

Trong các phòng thí nghiệm thường dùng máy phát điện áp xung để tạo nên điện áp xung mà nguyên lý làm việc của nó là dựa trên các quá trình nạp và phóng của tụ điện. Để có điện áp xung có thể tiến hành bằng cách dùng nhiều tụ, chúng được nạp song song nhưng khi phóng điện lại nối tiếp làm cho điện áp tăng cao theo kiểu nối cấp. Hình 5-25 cho sơ đồ cụ thể của máy phát điện áp xung.

\* **Giai đoạn nạp:** Qua máy biến áp T và chỉnh lưu K các tụ điện  $C_A, C_B, \dots, C_N$  được nạp tới điện áp U và khi quá trình nạp kết thúc thì điểm  $A_2, B_2, \dots, N_1$  có điện thế U còn các điểm  $A_1, B_1, \dots, N_1$  có điện thế bằng không (nối đất).



Hình 5-25. Sơ đồ máy phát điện áp xung.

T- máy biến áp thí nghiệm;

K - chỉnh lưu cao;

$C_A, C_B, \dots, C_N$  - tụ điện;

$R_{bv}$  - điện trở bảo vệ

$R_n$  - điện trở nạp điện;

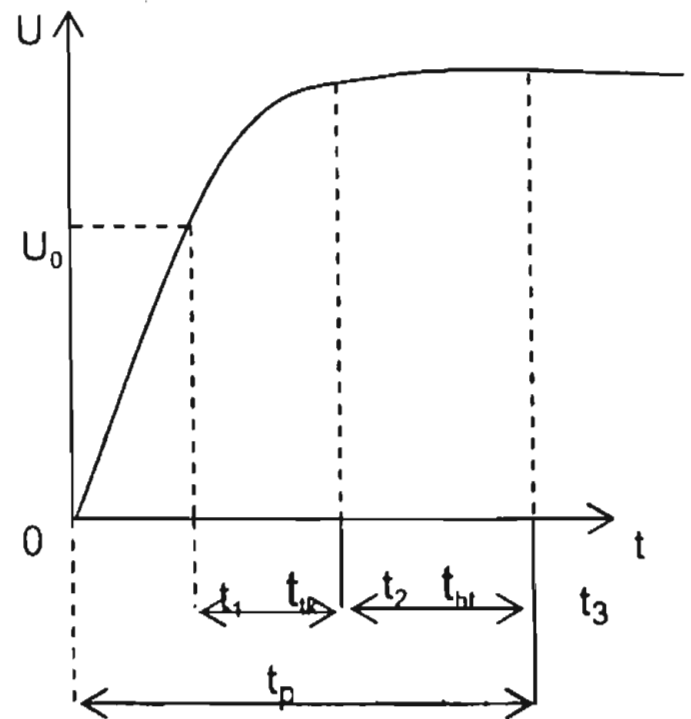
$R_0$  - điện trở ổn định;

$R_p$  - điện trở phóng điện;

$C_p$  - tụ điện phóng điện.

\* **Giai đoạn phóng:** Nếu chọn khoảng cách khe hở  $KH_1$  sao cho ở điện áp U có thể có phóng điện được thì sau khi phóng điện của điểm  $B_1$  sẽ tăng vọt tới mức U và như vậy thế của điểm  $B_2$  sẽ tăng tới mức 2U. Khe hở  $KH_2$  được chọn cho phóng điện ở điện áp 2U và sau khi nó phóng điện sẽ làm thế điểm  $C_1$  tăng từ 0 đến mức 2U và của điểm  $C_2$  tăng từ U tới mức 3U ...

Như vậy, nếu dùng n cấp để các tụ điện trong giai đoạn phóng được ghép nối tiếp nhau qua các khe hở  $KH_1, \dots, KH_n$  thì điện áp xung ở đầu máy phát có thể đạt tới mức nU.



Hình 5-26. Các thành phần của thời gian phóng điện.

Các phần tử còn lại trong sơ đồ làm nhiệm vụ bảo vệ và điều chỉnh quá trình phóng điện áp xung.

### **Thời gian phóng điện:**

Khi dùng điện áp một chiều hay xoay chiều thì trị số điện áp phóng điện ít phụ thuộc vào thời gian tác dụng của điện áp. Nhưng đối với điện áp xung, trị số điện áp phóng điện phụ thuộc rất nhiều vào thời gian tác dụng của điện áp, thời gian càng bé thì điện áp phóng điện càng tăng cao. Nguyên nhân chủ yếu của hiện tượng này là do bản thân quá trình phóng điện đòi hỏi phải có khoảng thời gian cần thiết để tích lũy đủ mật độ điện tích gây nên phóng điện. Thời gian này gọi là thời gian phóng điện.

Cho điện áp tác dụng lên khe hở khí hình 5-26 và giả thiết tại mức điện áp  $U_0$  điều kiện phóng điện tự duy trì được thực hiện. Trước thời điểm  $t_1$  và ngay cả ở  $t_1$  cũng chưa thể có phóng điện vì trước hết phải có xuất hiện ít nhất một điện tử tác dụng ở khu vực cực âm, từ đó tạo nên thác điện tử thứ nhất. Điện tử này có thể được tạo nên do sự bắn phá cực âm của các ion dương hoặc các nhân tố ion hoá bên ngoài. Như vậy, quá trình phóng điện không thể bắt đầu từ  $t_1$  mà phải từ thời điểm  $t_2 = t_1 + t_{ik}$ ; trong đó:  $t_{ik}$  - là thời gian chờ đợi xuất hiện điện tử tác dụng đầu tiên. Vì thời gian này rất tản mạn, có thể nhanh chậm khác nhau và chỉ có thể xác định bằng phương pháp thống kê nên gọi là thời gian chậm trễ thống kê. Quá trình phóng điện được hoàn thành ở thời điểm  $t_3 = t_2 + t_{ht}$  trong đó:  $t_{ht}$  - là thời gian hình thành phóng điện, trong khoảng thời gian này thác điện tử sẽ phát triển thành dòng để nối liền khoảng cực và hoàn thành quá trình phóng điện.

Tổng hợp ba thành phần thời gian nói trên sẽ được thời gian phóng điện:

$$t_p = t_1 + t_{ik} + t_{ht} \quad (5-67)$$

- Trị số thời gian chậm trễ thống kê có thể xác định bằng thực nghiệm. Quy luật phân bố của thời gian chậm trễ thống kê trung bình cũng giống như quy luật phân bố đoạn đường tự do:

$$P = e^{-\frac{t}{(t_{ik})_{tb}}}$$

với  $p$  là xác suất có thời gian chậm trễ thống kê lớn hơn hoặc bằng  $t$ . Thời gian chậm trễ thống kê phụ thuộc vào khá nhiều yếu tố như: nhân tố ion hoá bên ngoài, công thoát của vật liệu làm điện cực, điện áp v.v...

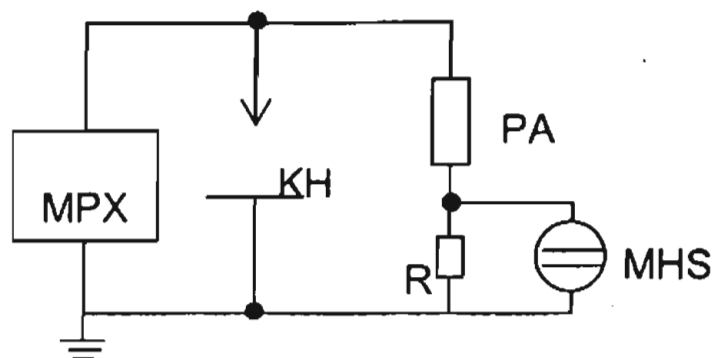
Thời gian hình thành phóng điện gồm ba giai đoạn:

- + Giai đoạn thác điện tử đầu tiên phát triển tới độ dài  $x_k$  chuẩn bị điều kiện cho việc hình thành dòng.
- + Giai đoạn phát triển của dòng tới hết chiều dài khoảng cực.
- + Giai đoạn của phóng điện ngược.

Sự phát triển của dòng là do có nhiều thác mới mà sự hình thành của chúng lại phụ thuộc vào thời gian chờ đợi xuất hiện các điện tử thứ cấp, thời gian này rất bé so với thời gian chậm trễ thống kê của thác đầu tiên, diện tích không gian phân bố không theo quy luật nhất định, đặc biệt trong các khoảng cách dài quỹ đạo phóng điện không theo đường thẳng v.v... Những nguyên nhân này đều làm cho thời gian hình thành phóng điện cũng bị tản mạn và có tính chất thống kê.

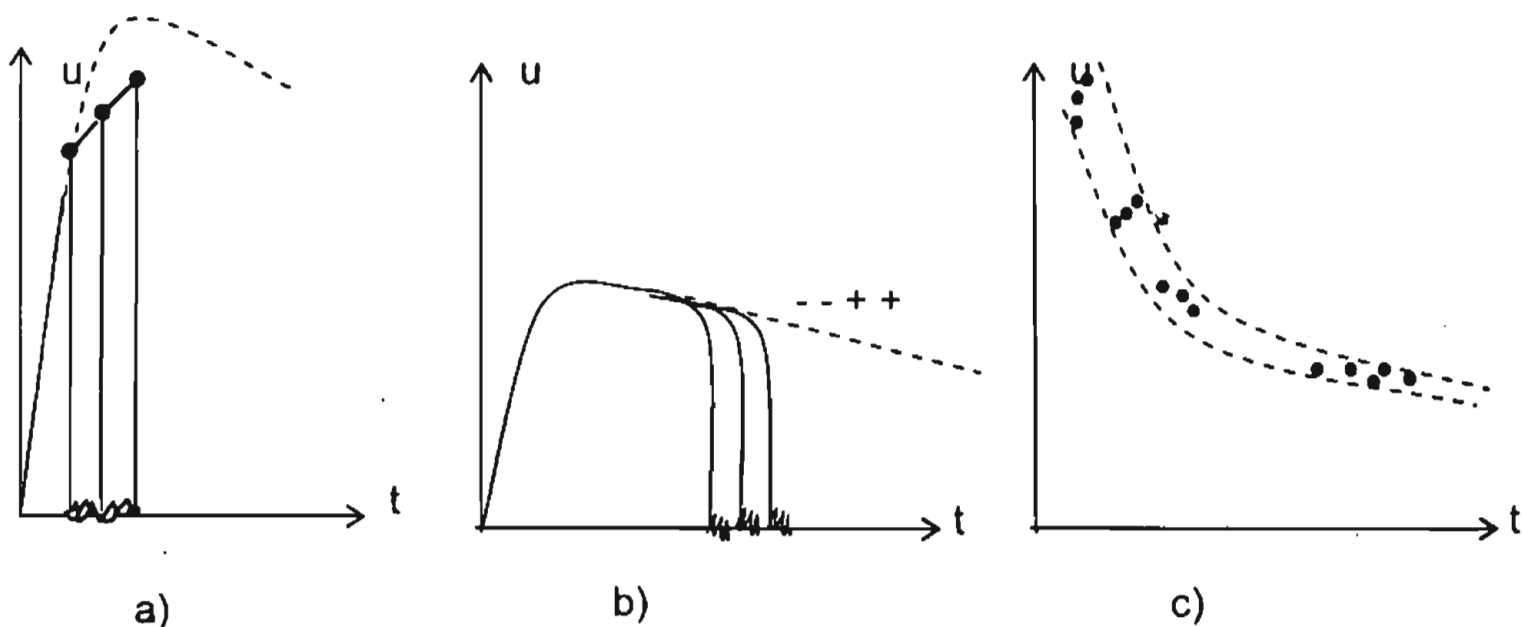
### b) Phóng điện xung kích

Sau khi xét về thời gian phóng điện thấy rằng: trị số điện áp phóng điện xung kích phụ thuộc vào thời gian tác dụng của điện áp, thời gian càng ngắn thì yêu cầu trị số điện áp càng cao. Do đó đối với phóng điện xung kích không thể biểu thị điện áp phóng điện bằng trị số cố định mà biểu thị bởi đặc tính von-giây là quan hệ giữa biên độ điện áp tác dụng với thời gian phóng điện. Đặc tính này được xác định bằng thực nghiệm theo sơ đồ hình 5-27. Xây dựng đặc tính von-giây rất công phu và phức tạp, phải dùng dạng sóng nhất định và thí nghiệm nhiều lần cho mỗi cặp trị số  $U(t)$ .



Hình 5-27. Sơ đồ nguyên lý để xác định đặc tính von-giây bằng phương pháp thực nghiệm.

MPX - máy phát điện áp xung;  
KH - khe hở; PA - phân áp;  
MHS - máy hiện sóng



Hình 5-28. Cách xây dựng đặc tính von-giây.

Trên hình 5-28 cho kết quả thực nghiệm và cách xây dựng đặc tính von-giây của cách điện. Hình 5-28a ứng với các trường hợp phóng điện xảy ra ở giai đoạn



dầu sóng khi điện áp có biên độ lớn, còn hình 5-28b là khi biên độ bé phóng điện ở đuôi sóng. Ứng với mỗi trị số biên độ điện áp sẽ có nhiều trị số của thời gian phóng điện và ngược lại, cho nên đặc tính von-giây là một khu vực tập hợp nhiều điểm (hình 5-28c). Thực tế thường biểu thị theo đường cong trung bình có kèm theo giới hạn sai số so với đường trung bình ấy.

Trong phóng điện xung kích không những chỉ có thời gian phóng điện mà cả khả năng phóng điện cũng mang tính chất tản mạn. Đặc điểm này được biểu thị bằng xác suất về số lần phóng điện, nó phụ thuộc rất nhiều vào biên độ điện áp tác dụng, biên độ càng lớn thì xác suất phóng điện càng cao. Trong thực tế, thường dùng các trị số điện áp phóng điện theo xác suất phóng điện sau đây để biểu thị mức cách điện xung kích:

- Trị số điện áp phóng điện xung kích 50% còn gọi là điện áp phóng điện bé nhất (ký hiệu  $U_{50\%}$ ), là biên độ sóng xung kích khi cho tác dụng nhiều lần sẽ có 50% số lần xảy ra phóng điện. Trị số này ứng với đoạn nằm ngang của đường đặc tính von-giây và có thời gian phóng điện khoảng  $6 \div 10 \mu\text{giây}$ .

- Cường độ xung kích đảm bảo là giới hạn an toàn của cách điện với xác suất phóng điện bằng không. Trị số này thường bé hơn điện áp thí nghiệm xung kích khoảng  $10 \div 30\%$ .

Cần chú ý là các đường đặc tính von-giây còn phụ thuộc vào cực tính dương hay âm của sóng xung điện áp.

Đường đặc tính von-giây có ý nghĩa rất quan trọng trong việc phối hợp cách điện giữa thiết bị điện và thiết bị bảo vệ cho nó. Để bảo đảm an toàn cho cách điện thiết bị không bị phóng điện, thiết bị bảo vệ cần phải có đường đặc tính von-giây hoàn toàn nằm dưới đường đặc tính von-giây của cách điện và có dạng phẳng ngang không giao chéo ở khoảng thời gian bé.

### 5.3. SỰ PHÓNG ĐIỆN TRONG ĐIỆN MÔI LỎNG

Ở điều kiện bình thường điện môi lỏng có cường độ điện trường cách điện cao hơn nhiều so với điện môi khí. Hiện tượng phóng điện trong điện môi lỏng phức tạp hơn nhiều so với điện môi khí ngay cả khi điện môi lỏng tinh khiết, vì sau mỗi lần phóng điện sẽ sinh ra các tạp chất là muội khói do chất lỏng bị đốt cháy.

Trong các chất lỏng thường chứa các tạp chất như là: nước, bọt khí, bụi bẩn, xơ v.v... lơ lửng ở bên trong. Sự tồn tại các tạp chất làm cho hiện tượng phóng điện đánh thủng điện môi lỏng phức tạp lên rất nhiều, gây khó khăn cho việc thành lập lý thuyết chính xác về phóng điện điện môi lỏng. Đã có nhiều công trình nghiên cứu về tiền phóng điện, diễn biến quá trình phóng điện v.v trong điện môi lỏng. Để giải thích cơ cấu của sự phóng điện chất lỏng, người ta đã đưa ra một số lý thuyết cơ bản dưới đây.

### 5.3.1. Lý thuyết về nhiệt

Lý thuyết này áp dụng đối với các điện môi lỏng kỹ thuật. Trong các chất này thường chứa các tạp chất như: bọt khí, nước, tạp chất cơ học, các chất dẫn điện, bán dẫn ... Ở đây sự phóng điện không phải là do ion hoá va chạm mà là do sự phát nóng cục bộ và sự sôi cục bộ ở bên trong chất lỏng ở những nơi có nhiều tạp chất đưa đến sự hình thành một cầu dẫn điện giữa hai cực. Theo lý thuyết này, khi điện áp tác dụng tăng lên thì lúc đầu sẽ có sự ion hoá trong các bọt khí, ở phần bọt khí có nhiệt độ và độ dẫn điện tăng, dưới tác dụng của trường nó sẽ bị kéo dài ra và gây nên phóng điện giữa hai cực.

### 5.3.2. Lý thuyết ion hoá

Đối với các điện môi lỏng đã được lọc sạch các tạp chất, người ta giải thích sự phóng điện như sự ion hoá đối với chất khí. Song mật độ phân tử chất lỏng lớn hơn nhiều so với chất khí nên đoạn đường chuyển động tự do của điện tử bé và năng lượng tích lũy trên quãng đường này có trị số bé khó gây nên ion hoá lớn. Chính vì vậy mà chất lỏng có cường độ cách điện cao hơn nhiều so với chất khí.

### 5.3.3. Lý thuyết phóng điện do điện thuận tuý

Lý thuyết này dùng để giải thích sự phóng điện trong chất lỏng tinh khiết. Nguyên nhân chủ yếu là do điện gây nên. Sự phóng điện ở trong trường hợp này là do các điện tử thoát ra từ mặt điện cực bằng kim loại dưới tác dụng của cường độ điện trường mạnh đồng thời sự phân huỷ bản thân phân tử chất lỏng.

Trong thực tế kỹ thuật điện người ta thường phối hợp cả ba lý thuyết trên để giải thích sự phóng điện trong điện môi lỏng. Thực tế cho ta thấy cường độ cách điện của chất lỏng phụ thuộc vào nhiều yếu tố: ví dụ ta xét sự phóng điện của dầu máy biến áp.

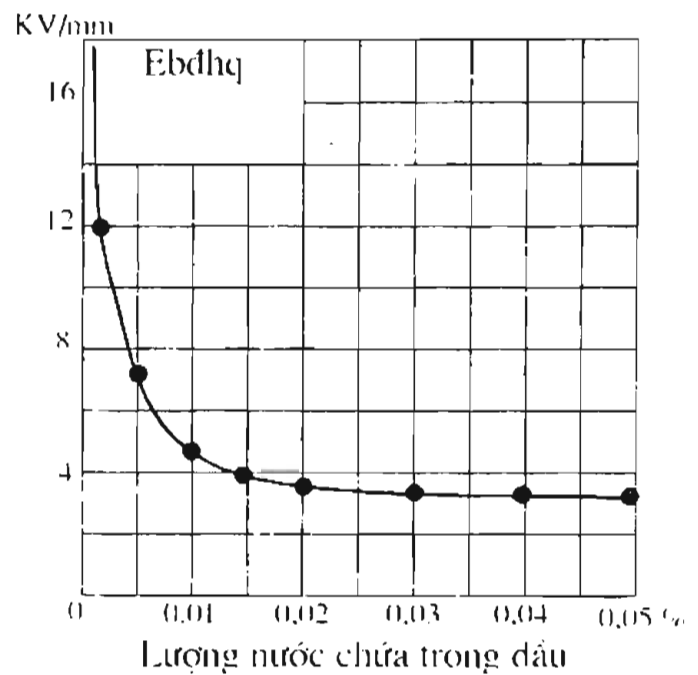
Để xác định cường độ cách điện hay điện áp phóng điện của dầu máy biến áp, người ta thường tiến hành thí nghiệm trên các thiết bị có điện áp tăng cao (AИИ-70, AИМ-90, AИД-70 của Liên Xô cũ ...) với công suất khoảng 2KVA. Mẫu dầu máy biến áp được cho vào cốc thử dầu có 2 cực phẳng hay hai nửa bán cầu đường kính  $\phi$  25mm, khoảng cách giữa hai cực được căn chuẩn là 2,5 mm (khe hở dầu giữa hai cực). Điện áp tần số 50Hz được tăng đều với tốc độ tăng 2kV/giây cho đến khi phóng điện.

#### *a) Ảnh hưởng của nước và sợi bẩn*

Thí nghiệm đã cho thấy tạp chất ảnh hưởng rất lớn tới độ bền điện của điện môi lỏng. Điều này thấy rõ từ đường cong hình 5-29, quan hệ giữa độ bền điện của dầu MBA theo lượng nước chứa trong nó. Nếu lọc sạch các tạp chất ra khỏi dầu

MBA sẽ làm cho độ bền điện tăng lên rõ rệt. Ví dụ, dầu MBA không sạch có  $E_{db} \approx 4\text{KV/mm}$ , sau khi lọc sạch cẩn thận, độ bền điện tăng lên đến 20-25 kV/mm.

Nước trong điện môi lỏng có thể ở trạng thái hoà tan hay trạng thái nhũ tương (bọc nước). Khi có quá nhiều nước thì có trạng thái lắng đọng (vì tỷ trọng của nước là 1, còn của dầu MBA nằm trong khoảng từ 0,86 đến 0,88). Với cùng một lượng nước trong dầu nhưng khi ở trạng thái hoà tan thì cường độ cách điện của dầu giảm không nhiều, thí nghiệm phóng điện khó phát hiện ra. Còn khi ở trạng thái nhũ tương thì điện áp phóng điện giảm đi nhiều và nhất là trong dầu có chứa các sợi nhỏ tạp chất ở thể rắn. Vì các sợi và bọc nước tạo điều kiện làm cầu nối cho sự phóng điện sớm hơn (tính chất bắc cầu).

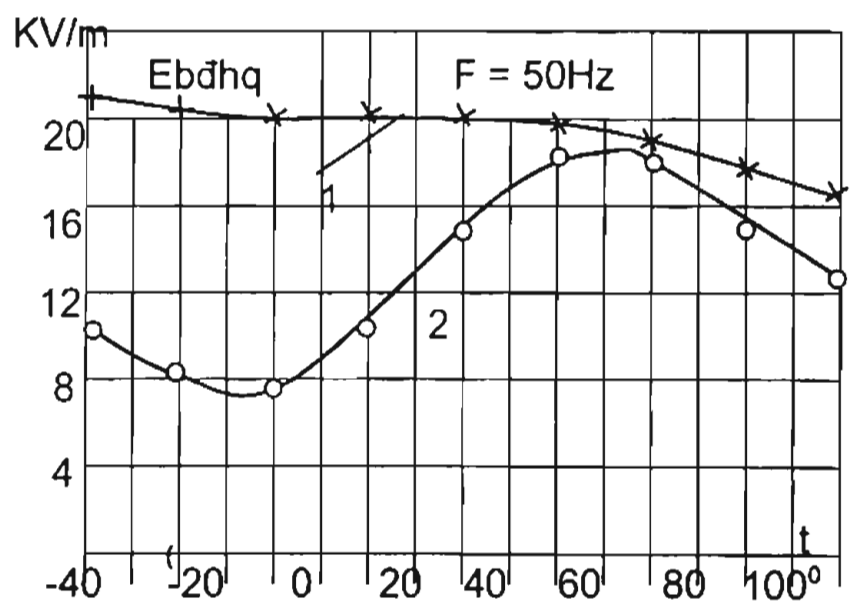


**Hình 5-29. Sự biến thiên của độ bền điện  $E_{đt}$  theo lượng nước trong dầu.**

Đối với điện áp xung thì tạp chất ít bị ảnh hưởng tới trị số điện áp phóng điện vì thời gian tác dụng của điện áp quá ngắn. Độ bền điện của điện môi lỏng bản cao gấp 5÷7 lần độ bền điện khi điện áp tác động lâu dài. Đối với chất lỏng tinh khiết thì những trị số này không khác nhau nhiều và tỷ số giữa các trị số điện áp đánh thủng ấy nhỏ hơn 3.

**b) Ảnh hưởng của nhiệt độ**

Độ bền điện của điện môi lỏng tinh khiết hầu như không phụ thuộc vào nhiệt độ khi nhiệt độ làm việc nhỏ hơn 80°C. Khi nhiệt độ cao, điện môi lỏng có sự giãn nở nhiệt, chuyển động nhiệt của các phân tử tăng lên nhất là gần nhiệt độ sôi của điện môi lỏng, làm cho điện áp phóng điện hay độ bền điện sẽ giảm.



**Hình 5-30. Sự biến thiên của độ bền điện dầu MBA theo nhiệt độ.**

1- dầu sạch; 2 - dầu đang vận hành có chứa nước.

Trên hình 5-30 là quan hệ của cường độ điện trường cách điện của dầu máy biến áp với nhiệt độ khi dầu sạch (đường 1) và khi dầu đang vận hành (đường 2).

Qua đồ thị (đường 2) ta thấy, dầu MBA có cường độ điện trường cách điện lớn nhất khi dầu có nhiệt độ trong miền từ  $60 \div 80^{\circ}\text{C}$ . Ở miền nhiệt độ này nước có trong dầu MBA đã hoà tan đều trong dầu, làm cho độ bền điện lớn. Khi nhiệt độ tăng từ  $80 \div 100^{\circ}\text{C}$  độ bền điện giảm vì gần nhiệt độ sôi của nước và dầu, dễ dàng cho sự phóng điện.

Khi nhiệt độ ở trong miền nhỏ hơn  $60^{\circ}\text{C}$  các phân tử dầu chuyển đẩy nước từ hoà tan sang trạng thái nhũ tương (bọc nước) làm cầu nối cho sự phóng điện sớm hơn, nên cường độ cách điện giảm. Ở miền nhiệt độ thấp nước nằm trong trạng thái đóng băng, khi xảy ra phóng điện cần năng lượng lớn phá vỡ lực liên kết của băng. Do vậy cường độ cách điện tăng lên khi nhiệt độ càng giảm.

### c) Ảnh hưởng của áp suất

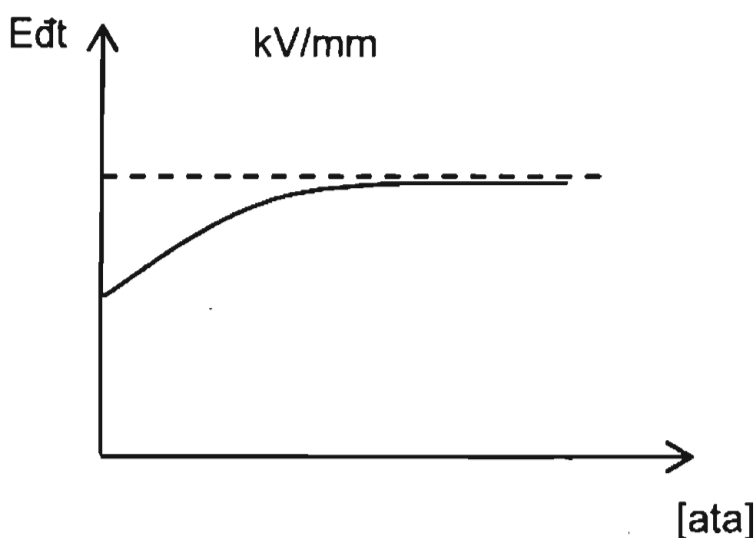
Cường độ cách điện của điện môi lỏng bình thường thì không phụ thuộc vào áp suất. Song khi điện môi lỏng có chứa các bọt khí thì quan hệ giữa  $E_{dt}$  với áp suất được biểu diễn ở hình 5-31.

Khi áp suất tăng thì cường độ cách điện sẽ tăng, song không tăng nhiều vì số lượng bọt khí có hạn. Thực chất ở đây chỉ là nén phân bọt khí chứa trong điện môi lỏng, quy luật này đã được xét kỹ trong phần phóng điện trong điện môi khí ở bên trên.

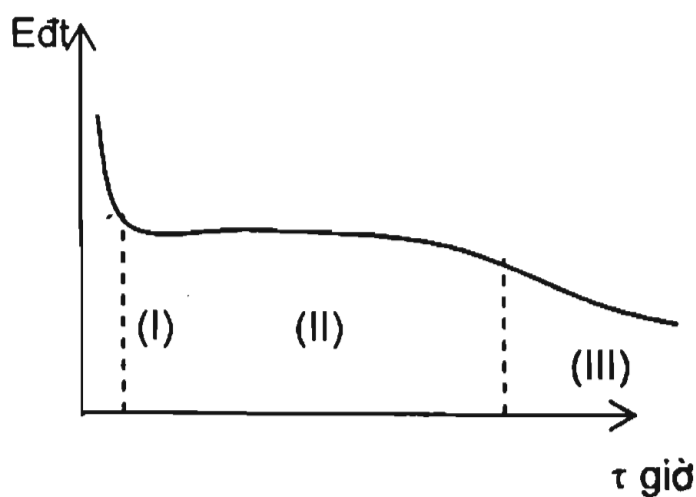
### d) Ảnh hưởng thời gian tác dụng điện áp

Độ bền điện của điện môi lỏng giảm khi thời gian tác dụng của điện áp càng tăng (xem hình 5-32). Chất lỏng có nhiều tạp chất thì có mức độ suy giảm mạnh.

Khi thời gian tác dụng điện áp bé ( $t \leq 10^{-4}$  giây) các phân tử tạp chất không kịp chuyển dịch trên khoảng cách giữa các cực nên không làm ảnh hưởng tới cường độ



Hình 5-31. Quan hệ  $E_{dt} = f(P)$  khi chất lỏng có chứa các bọt khí.



Hình 5-32. Quan hệ  $E_{dt} = f(\tau \text{ giờ})$ .

độ cách điện, độ bền điện càng cao khi thời gian càng nhỏ giống như điện áp xung (vùng I của đồ thị). Ở vùng II của đồ thị là thời gian làm việc ổn định của điện môi lỏng. Dưới tác dụng của điện áp cao và thời gian tác dụng lớn, điện môi lỏng có thể bị phân huỷ, biến tính tức là điện môi bị biến già, màu của chúng thay đổi sẫm dần và cường độ cách điện bị suy giảm (vùng III của đồ thị).

Thực tế cho thấy trong quá trình vận hành dưới tác dụng của điện trường, nhiệt độ, ôxy của không khí,... dầu máy biến áp sẽ mất dần tính chất cách điện ban đầu, nó biến đổi màu, nồng độ axit sẽ tăng ... Do vậy cần phải định kỳ kiểm tra dầu MBA để đánh giá chất lượng dầu và có biện pháp sửa chữa, bảo dưỡng, đại tu thiết bị, đảm bảo vận hành thiết bị an toàn.

Cần chú ý rằng, khi dầu MBA vận hành ở điện áp và nhiệt độ càng cao thì khả năng lão hoá càng nhanh. Mặt khác cường độ cách điện giảm khi số lần thí nghiệm phóng điện tăng, bởi vì sau mỗi lần phóng điện sẽ sinh ra tạp chất là muối khoáng trong mẫu thử. Dựa vào quan hệ giữa độ bền điện với số lần phóng điện ta có thể đánh giá tuổi thọ của dầu máy biến áp và phát hiện ra dầu mới hay dầu tái sinh.

## **5.4. SỰ PHÓNG ĐIỆN TRONG ĐIỆN MÔI RẮN**

Khi nghiên cứu về sự phóng điện điện môi rắn ta thấy có hai khả năng xảy ra, đó là:

- Phóng điện đánh thủng hay còn gọi là phóng điện xuyên qua điện môi rắn.
- Phóng điện bề mặt điện môi rắn.

### **5.4.1. Phóng điện đánh thủng**

Phóng điện đánh thủng điện môi rắn phức tạp hơn nhiều so với chất khí và lỏng vì các lý do sau đây:

Điện môi rắn sau khi bị phóng điện sẽ mất hoàn toàn tính chất cách điện, tính chất này không thể khôi phục lại được tức là không có tính chất thuận nghịch như chất khí và lỏng.

Chúng ta không thể tạo nên các mẫu có cấu trúc giống hệt nhau tại mọi điểm, do vậy, phải thí nghiệm nhiều mẫu và dùng xác suất thống kê để đưa ra quy luật về sự phóng điện cho từng loại điện môi rắn.

Cường độ cách điện của các điện môi rắn phụ thuộc vào nhiều yếu tố như: loại phân tử, liên kết phân tử, lượng tạp chất chứa trong điện môi và các yếu tố môi trường: nhiệt độ, độ ẩm, áp suất .v.v....

Khi xét quan hệ cường độ điện trường với nhiệt độ cho thấy: ở nhiệt độ thấp cường độ điện trường ít phụ thuộc vào nhiệt độ (vùng I của hình 5-33), ở đây gọi là phóng điện do điện gây nên. Ở nhiệt độ cao (vùng II của hình 5-33) cường độ điện

trường giảm nhiều khi nhiệt độ tăng, ta thường gọi là phóng điện do nhiệt gây nên trong điện môi rắn.

Phóng điện do điện và phóng điện do nhiệt gây nên có sự khác nhau ở một số điểm sau:

- Phóng điện do điện gây nên xuất hiện khi cường độ điện trường lớn (tùy thuộc vào loại vật liệu) và xảy ra trong thời gian ngắn  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  giây. Còn phóng điện do nhiệt gây nên xảy ra trong một thời gian dài để có thời gian làm tăng nhiệt độ.

Cường độ cách điện  $E_{đt}$  do điện gây nên không phụ thuộc vào chiều dày điện môi. Còn phóng điện do nhiệt lại phụ thuộc vào chiều dày điện môi,  $E_{đt}$  giảm khi chiều dày tăng vì thường cách điện đi đôi với cách nhiệt.

Phóng điện do điện gây nên ít phụ thuộc vào nhiệt độ, song phóng điện do nhiệt phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ, cường độ điện trường đánh thủng giảm khi ở nhiệt độ cao.

- Phóng điện do nhiệt gây nên xảy ra ở nơi nào trong điện môi có sự phát nhiệt lớn nhất, sự truyền nhiệt và làm mát kém nhất. Còn phóng điện do điện gây nên chỉ xảy ra ở nơi yếu nhất và có cường độ điện trường lớn nhất ...

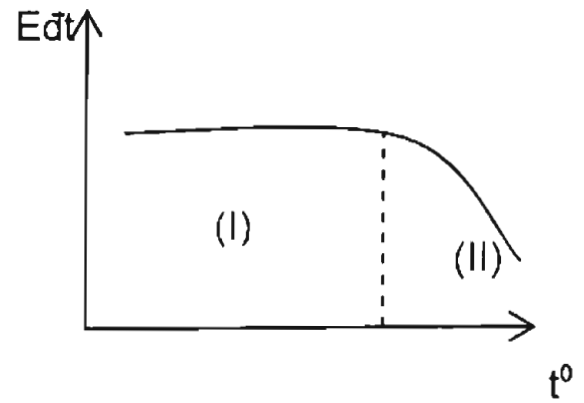
Người ta phân biệt thành bốn dạng đánh thủng điện môi rắn:

- Sự đánh thủng do điện các điện môi rắn đồng nhất vi mô.
- Sự đánh thủng do điện các điện môi rắn không đồng nhất.
- Sự đánh thủng do điện - hoá gây nên.
- Sự đánh thủng do nhiệt gây nên.

Một trong những dạng đánh thủng kể trên có thể xảy ra đối với cùng một vật liệu, tùy theo tính chất của điện trường: một chiều, xoay chiều hay xung, tần số cao hay thấp, khuyết tật trong điện môi, đặc biệt là các bọt khí, những điều kiện làm mát, thời gian tác động của điện áp, điều kiện của môi trường...

#### **a) Sự đánh thủng do điện các điện môi rắn đồng nhất vi mô**

Dạng đánh thủng này có đặc điểm phát triển rất nhanh, xảy ra trong khoảng thời gian nhỏ  $10^{-7} \div 10^{-8}$  giây và không phải do năng lượng nhiệt, mặc dù độ bền điện khi đánh thủng phụ thuộc vào nhiệt độ ở một mức độ nào đó.



Hình 5-33 .Quan hệ  $E_{đt} = f(t^o)$

Về bản chất, sự đánh thủng này là một quá trình điện tử thuần túy, khi trong chất rắn có một số ít điện tử ban đầu dưới tác động của điện trường mạnh sẽ tạo thành thác điện tử. Các điện tử ban đầu này tiêu thụ năng lượng mà nó tích lũy trong quá trình chuyển động trong điện trường, kích thích mạng tinh thể, khi điện tử đạt đến một tốc độ nào đó thì có khả năng tạo nên các điện tử mới do ion hoá và chạm phá huỷ sự cân bằng của chất rắn.

Sự đánh thủng do điện gây nên trong điện môi rắn không gây nên tổn hao điện môi, nghĩa là không làm ảnh hưởng đến độ dẫn điện hay ion hoá các bọt khí ở bên trong điện môi. Trong trường đồng nhất và vật liệu có cấu tạo hoàn toàn đồng nhất có thể dùng cường độ điện trường đánh thủng điện môi làm thước đo độ bền điện của điện môi đó.

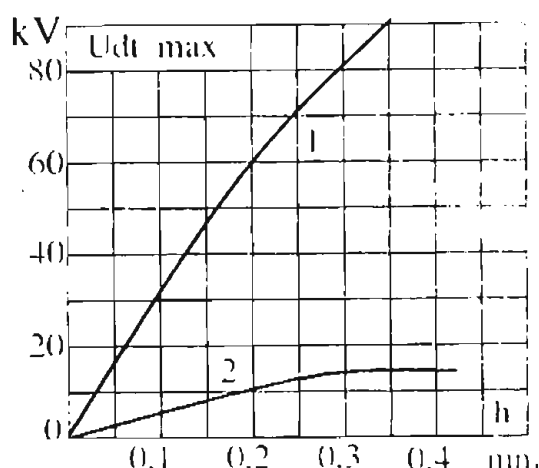
Cường độ cách điện của điện môi rắn càng cao khi kích thước phân tử càng bé. Cường độ cách điện phụ thuộc vào liên kết phân tử, khi liên kết phân tử chặt chẽ thì cường độ cách điện cao.

Đối với điện môi đồng nhất có sự khác nhau rõ rệt giữa trị số điện áp đánh thủng trong trường đồng nhất và không đồng nhất (hình 5-34). Điều này nói lên cường độ điện trường có ảnh hưởng lớn tới sự phóng điện đánh thủng điện môi rắn đồng nhất vi mô. Với cùng một chiều dày  $h$  của điện môi thì điện áp phóng điện trong điện trường đồng nhất cao hơn nhiều so với điện áp phóng điện trong trường không đồng nhất.

**b) Sự đánh thủng do điện các điện môi rắn không đồng nhất**

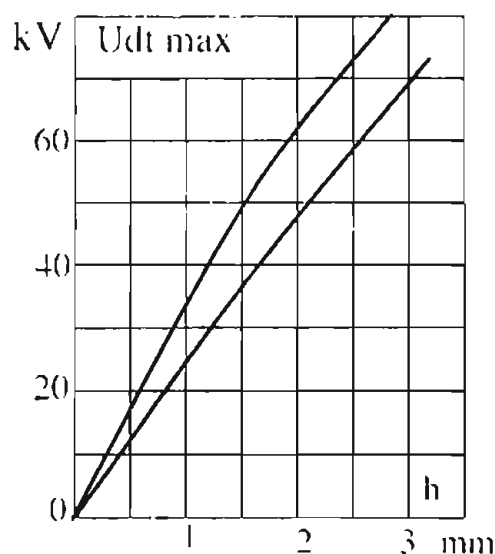
Sự phóng điện đánh thủng này đặc trưng cho các điện môi rắn dùng trong kỹ thuật điện mà hầu hết các trường hợp có chứa tạp chất là bọt khí.

Cũng như sự đánh thủng do điện



**Hình 5-34. Quan hệ  $U_{dt} = f(h)$ .**

- 1- trường đồng nhất;
- 2- trường không đồng nhất.



**Hình 5-35. Quan hệ  $U_{dt} = f(h)$  của sứ cách điện khi  $f = 50\text{Hz}$ .**

- 1 - trường đồng nhất;
- 2 - trường không đồng nhất.

của điện môi đồng nhất, hiện tượng đánh thủng này có đặc điểm phát triển rất nhanh. Điện áp đánh thủng đối với điện môi không đồng nhất ở trong điện trường đồng nhất hoặc không đồng nhất thường không cao và khác nhau ít (hình 5-35).

Do cấu tạo không đồng nhất nên sự xuất hiện các điểm yếu nhiều hơn, nên ảnh hưởng của cường độ điện trường tới điện áp phóng điện không đáng kể (phóng điện dễ xảy ra ở các vị trí yếu trong điện môi).

Các số liệu về quan hệ giữa điện áp đánh thủng với chiều dày  $h$  của điện môi ở hình 5-34 và 5-35 chỉ ra rằng, khi tăng chiều dày của mẫu thử nghiệm thì độ không đồng nhất của cấu trúc tăng lên, số lượng các chỗ yếu, các bọt khí tăng và độ bền điện trong trường đồng nhất cũng như không đồng nhất đều giảm.

Đôi khi trong thí nghiệm quan sát thấy độ bền của gốm khi trường không đồng nhất thậm chí còn cao hơn khi trường đồng nhất. Ví dụ, độ bền điện của mẫu gốm rutin có chiều dày  $1,6 \div 1,7$  mm khi điện áp thí nghiệm là một chiều trong trường hợp các điện cực kim - mặt phẳng vào khoảng  $24$  kV/mm, còn ở các điện cực phẳng - chỉ bằng  $12,5 \div 15$  kV/mm. Từ đó suy ra rằng, diện tích cực càng nhỏ, trị số độ bền điện của vật liệu gốm càng cao, có thể cao hơn do số lượng chỗ yếu nằm trong phạm vi của trường giảm xuống, mặc dù trong trường hợp này trường rất không đồng nhất.

Độ bền điện của điện môi rắn không đồng nhất trên thực tế không phụ thuộc vào nhiệt độ khi nhiệt độ thấp. Nếu nhiệt độ cao hơn một trị số nào đó, độ bền điện giảm rõ rệt. Điều đó chứng tỏ sự xuất hiện cơ chế đánh thủng do nhiệt (hình 5-33).

Những điện môi có lỗ xốp hờ có độ bền điện rất kém, trong loại điện môi này có đá hoa, giấy không được tẩm, gỗ, gốm xốp. Độ bền điện của chúng, trừ giấy có độ ép chặt cao, khác rất ít so với độ bền điện của không khí. Các điện môi có lỗ xốp kín (bọt khí ở bên trong), ví dụ: gốm, có độ bền điện cao hơn. Sự có mặt của các bọt khí trong vật liệu cách điện rắn đặc biệt nguy hiểm khi ở tần số cao hay điện áp cao. Vì khi ở điện áp cao và tần số cao có thể gây nên ion hoá bọt khí, dẫn đến sự phát nóng lớn, làm cầu nối cho sự phóng điện sớm hơn. Mặt khác khi bị ion hoá ôxy biến thành ôzôn ( $O_3$ ), nó kết hợp với nước và nitơ của không khí thành axit nitric ( $HNO_3$ ) có thể ăn mòn hoá học vật liệu.

Các điện môi có cấu tạo đặc và không chứa bọt khí có độ bền điện cao. Loại này gồm mica, giấy đã được tẩm điện môi lỏng thuỷ tinh v.v...

Trị số độ bền điện của một số điện môi rắn cho ở bảng 5.4.



**Bảng 5.4. Trị số  $E_{dt}$  của một số điện môi rắn**

Tên vật liệu	Độ bền điện trong trường đồng nhất tần số 50HZ $E_{dt}$ KV/mm	Đặc điểm cấu tạo
Thủy tinh	100 ÷ 300	Điện môi đồng nhất và nhiều lớp nếu trường vuông góc với các lớp
Muối mỏ	100 ÷ 150	
Mi ca	100 ÷ 300	
Giấy tẩm	100 ÷ 300	
Polistirol	90 ÷ 120	
Gốm	10 ÷ 30	Điện môi cấu tạo không đồng nhất có mao quản kín hoặc nhỏ nối thông với nhau.
Micaléch	10 ÷ 15	
Chất dẻo có độn (Phênolfóc nealdehyt, chất dẻo amin)	10 ÷ 15	
Đá hoa	4 ÷ 5	
Gốm xốp	1,5 ÷ 5	
Gỗ	4 ÷ 2,6	
Giấy cáp không tẩm	7 ÷ 10	

**c) Sự đánh thủng do điện hoá gây nên**

Sự đánh thủng do điện hoá gây nên của các vật liệu cách điện có ý nghĩa đặc biệt quan trọng khi ở nhiệt độ và độ ẩm cao. Dạng đánh thủng này có thể thấy ở cả điện áp một chiều và xoay chiều tần số thấp, khi quá trình điện phân phát triển trong vật liệu làm cho điện trở cách điện bị giảm và không hồi phục được. Hiện tượng này thường gọi là sự hoá già điện môi trong điện trường, bởi vì nó làm cho độ bền điện giảm dần và cuối cùng điện môi bị đánh thủng ở cường độ trường thấp hơn nhiều so với cường độ trường đánh thủng khi làm thí nghiệm ngắn hạn.

Trong các điện môi hữu cơ (giấy tẩm, cao su v.v...) sự hoá già được gây ra trước hết bởi sự phát triển quá trình ion hoá các bọt không khí có trong nó. Các quá trình này gắn liền với việc thoát khí ôzôn và ôxít nitơ tạo nên axit nitơric  $HNO_3$  làm cho cách điện bị phá huỷ hoá học dần dần. Hiện tượng hoá già còn có thể xảy ra ở một số điện môi vô cơ, ví dụ gốm titan.

Quá trình phát triển của sự đánh thủng do điện hoá cần phải có thời gian dài, bởi vì nó liên quan tới hiện tượng dẫn điện. Hiện tượng này làm cho một lượng nhỏ hoạt chất hoá học thoát dần ra hoặc hình thành nên các hợp chất bán dẫn. Trong

gốm chứa ôxít kim loại có hoá trị biến đổi (ví dụ:  $\text{TiO}_2$ ) sự đánh thủng điện hoá thường gặp hơn trong gốm có các ôxít nhôm, silíc, magiê, bari v.v...

Sự có mặt của ôxít kiềm trong gốm nhôm silicat tạo điều kiện để đánh thủng điện hoá và hạn chế nhiệt độ làm việc cho phép. Vật liệu chế tạo điện cực có tác dụng lớn đối với hiện tượng đánh thủng điện hoá quan sát ở điện áp một chiều và xoay chiều tần số thấp trong điều kiện nhiệt độ cao hay độ ẩm lớn. Ví dụ, bạc có khả năng khuếch tán vào gốm làm cho sự đánh thủng điện hoá thêm dễ dàng (đối với vàng thì ngược lại).

#### *d) Sự đánh thủng do nhiệt gây nên*

Loại phóng điện này là do khi đặt điện môi vào trong điện trường điện môi bị nung nóng đến nhiệt độ cao, có thể làm cho vật liệu bị nứt, phồng rộp, cháy hay các dạng phá huỷ nhiệt khác, điều này có liên quan tới sự phát triển quá mức của dòng điện dẫn hay tổn hao điện môi. Khi tổn hao điện môi có trị số lớn sẽ làm nung nóng vật liệu, nhiệt độ trong vật liệu sẽ tăng lên và điện dẫn cũng tăng lên theo hàm số mũ, nó tác động đến điện môi làm cho điện môi tích luỹ năng lượng nhiệt lớn. Nếu không có sự truyền nhiệt và làm phát thích hợp thì nhiệt độ bên trong điện môi tăng lên quá mức làm phá huỷ điện môi, lúc đó gọi là phóng điện do nhiệt gây nên.

Điện áp đánh thủng trong phóng điện do nhiệt liên quan với một loạt yếu tố: tần số của điện trường, điều kiện làm mát, nhiệt độ môi trường xung quanh v.v... Ngoài ra, điện áp đánh thủng do nhiệt còn phụ thuộc vào tính chất chịu nhiệt của vật liệu. Với cùng một điều kiện bên ngoài như nhau thì các điện môi hữu cơ bao giờ cũng có điện áp đánh thủng nhiệt thấp hơn các điện môi vô cơ vì độ bền nhiệt của điện môi hữu cơ nhỏ hơn điện môi vô cơ.

Khi tính toán điện áp đánh thủng do nhiệt, trước tiên cần chú ý tới độ bền nhiệt của vật liệu, góc tổn hao điện môi của nó và sự biến thiên tổn hao điện môi hay tgđ theo nhiệt độ. Sự phát nhiệt trong điện môi phụ thuộc vào tổn hao điện môi, khi làm việc ổn định ở một điện áp nào đó nhiệt lượng sinh ra trong điện môi bằng nhiệt lượng toả ra môi trường xung quanh. Trong nhiều trường hợp sự toả nhiệt được thực hiện bởi sự đối lưu với không khí, song cũng có khi bằng sự truyền dẫn nhiệt vào môi trường xung quanh. Khi tính toán và chọn vật liệu chúng ta phải chọn trị số điện áp làm việc tương ứng với nhiệt độ làm việc ổn định lâu dài, không được cho nhiệt độ vượt quá một trị số tới hạn nào đó. Vì nếu nhiệt độ cao hơn trị số này thì vật liệu cách điện sẽ bị phân huỷ.

Cần lưu ý rằng khi điện áp đặt vào vật liệu tăng lên, công suất phản kháng sẽ tăng, làm cho tgđ cũng tăng lên theo nhiệt độ và vật liệu cách điện càng bị nung nóng hơn, tức là có nhiệt độ cao hơn (xem chương IV).

Nếu gọi nhiệt lượng phát sinh trong điện môi là P thì ta có:

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg}\delta \quad (\text{VAR})$$

Trong đó: P - công suất phản kháng (VAR); U- điện áp;  $\omega$ - tần số góc; C - điện dung vật liệu cách điện;  $\operatorname{tg}\delta$  - tang góc tổn hao điện môi ở nhiệt độ làm việc.

Nhiệt lượng toả ra môi trường là Q:

$$Q = \sigma \cdot S (t_{\text{bm}} - t_0)$$

với:  $\sigma$  - hệ số truyền nhiệt,  $\text{w/cm}^2 \cdot \text{độ}$ ; S - diện tích bề mặt vật liệu cách điện,  $\text{cm}^2$ ;  $t_{\text{bm}}, t_0$  - nhiệt độ bề mặt và nhiệt độ môi trường,  $^{\circ}\text{C}$ .

Khi làm việc ổn định ta có:  $P = Q$ , tức là:

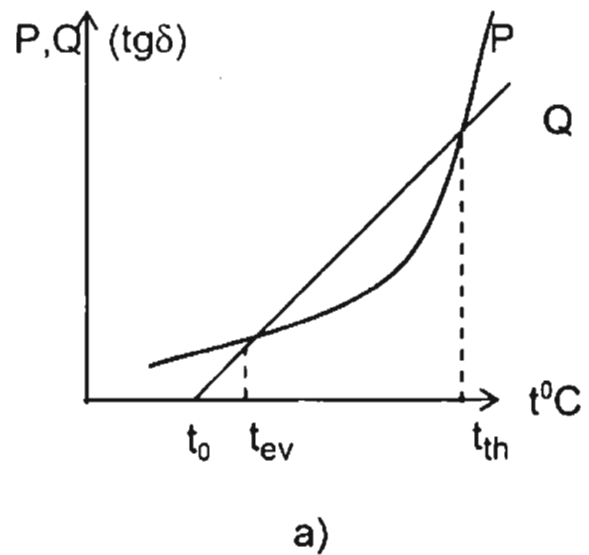
$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg}\delta = Q = \sigma \cdot S (t_{\text{bm}} - t_0) \quad (5-68)$$

Công thức (5-68) cho phép tính toán điện áp làm việc cho phép với mức độ chính xác cần thiết đối với các vật liệu có điện dung biết trước và điện môi dẫn nhiệt tốt, đảm bảo độ giáng nhiệt nhỏ theo tiết diện của vật liệu.

Có thể xây dựng phương trình (5-68) bằng đồ thị với các nhiệt độ bề mặt vật liệu khác nhau khi điện dung của vật liệu không biến đổi theo nhiệt độ (hình 5-36).

Đường cong P trên hình 5-36 là sự biến thiên nhiệt lượng toả ra trong vật liệu do tổn hao điện môi theo nhiệt độ, hình dạng đường cong được xác định bởi quan hệ  $\operatorname{tg}\delta = f(t^{\circ})$ .

Đường thẳng Q là đặc tính truyền nhiệt từ bề mặt vật liệu cách điện vào môi trường theo nhiệt độ. Tang góc nghiêng của đường thẳng này bằng tích diện tích bề mặt vật liệu cách điện với hệ số truyền nhiệt. Đường thẳng cắt trục ngang tại điểm tương ứng với nhiệt độ môi trường xung quanh.



Hình 5-36. Quan hệ  $P = f(t^{\circ})$  và  $Q = f(t^{\circ})$ .

Trong trường hợp tổng quát, đường cong P và Q cắt nhau tại hai điểm ở nhiệt độ làm việc ( $t_{\text{lv}}$ ) và nhiệt độ tới hạn ( $t_{\text{th}}$ ), (xem hình 5-36). Qua hình vẽ ta thấy: trong miền nhiệt độ:  $t_0 \leq t \leq t_{\text{lv}}$ , (nhiệt độ thấp) có  $P > Q$  là do điện môi đặt dưới điện áp làm việc bị nung nóng lên do tổn hao điện môi; nhiệt độ đốt nóng ổn định cuối cùng của vật liệu ứng với  $t_{\text{lv}}$ . Nhưng trong thực tế vật liệu có thể còn bị đốt nóng thêm bởi các nguồn nhiệt ngẫu nhiên khác như: tia mặt trời v.v..., ở đây ta không xét đến nguồn nhiệt này. Song cũng phải lưu ý rằng nếu nguồn nhiệt bên ngoài quá lớn làm đốt nóng và tăng nhiệt độ của vật liệu quá mức giới hạn ( $t_{\text{th}}$ ) thì

cũng có thể dẫn đến sự phá huỷ vật liệu nếu không có sự làm mát tốt. Trong miền nhiệt độ  $t > t_{th}$ : nhiệt lượng phát sinh ra trong điện môi lớn hơn nhiệt lượng toả vào môi trường sẽ làm cho vật liệu phát nóng và có nhiệt độ cao, sẽ gây nên phóng điện do nhiệt phá huỷ vật liệu.

Hiệu số giữa  $t_{th}$  và  $t_{lv}$ :  $\Delta t = t_{th} - t_{lv}$  - chính là khả năng cho phép giao động điện áp của vật liệu (vì ở đó có  $P < Q$ ), đồng thời cho phép tác động của nguồn nhiệt bên ngoài với một mức độ nào đó. Chất lượng của vật liệu càng cao nếu  $\Delta t$  càng lớn.

Từ công thức (5-68) ta có:

$$U_{lv} = \sqrt{\frac{\sigma S(t_{lv} - t_o)}{\omega C \operatorname{tg} \delta_1}} \quad (5-69)$$

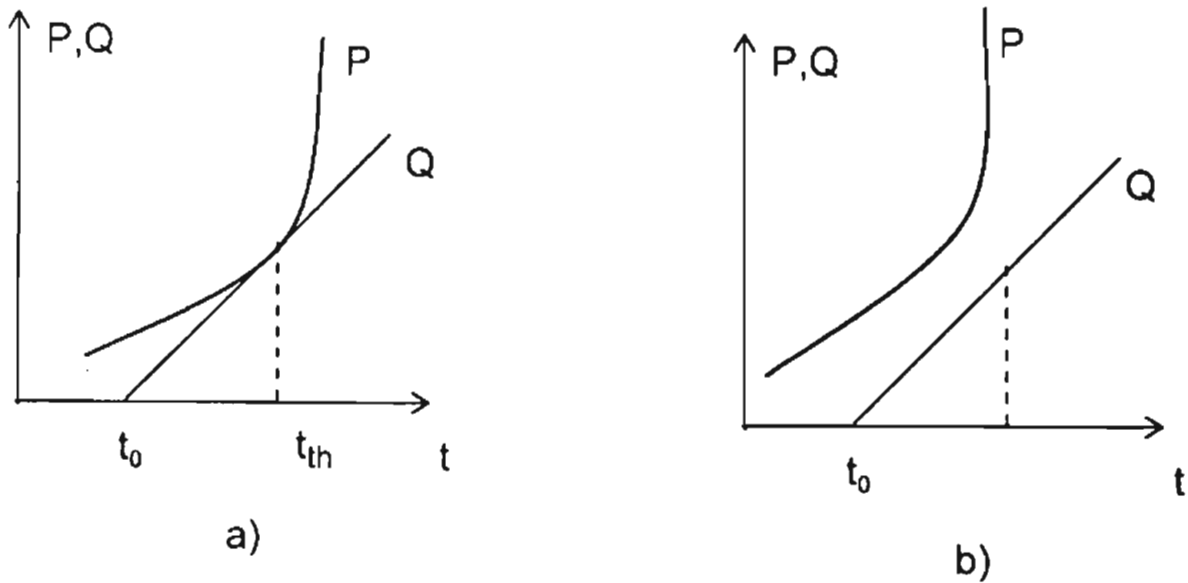
$$U_{th} = \sqrt{\frac{\sigma S(t_{th} - t_o)}{\omega C \operatorname{tg} \delta_2}} \quad (5-70)$$

Trong đó:  $\operatorname{tg} \delta_1$  và  $\operatorname{tg} \delta_2$  ứng với trị số  $\operatorname{tg} \delta$  ở nhiệt độ  $t_{lv}$  và  $t_{th}$ .

Như vậy giới hạn điện áp đặt lên điện môi khi không có nguồn nhiệt bên ngoài tác động sẽ là:

$$\Delta U = U_{th} - U_{lv} \quad (5-71)$$

Thực tế còn xảy ra hai trường hợp nữa đó là:  $P$  và  $Q$  cắt nhau tại một điểm (hình 5-37a) và không cắt nhau hình 5-37b.



Hình 5-37. Quan hệ  $P = f(t)$ ,  $Q = f(t)$ .

Trường hợp đầu (a) ta thấy chỉ có một nhiệt độ làm việc duy nhất, tức là vật liệu chỉ có một điện áp làm việc (công thức 5-70). Nếu có sự dao động điện áp sẽ dẫn đến sự phóng điện do nhiệt. Còn trường hợp sau (b) thì ta không thể chọn được bất kỳ nhiệt độ hay điện áp làm việc nào cho phù hợp với vật liệu vì luôn có  $P > Q$ , nếu đưa vào vận hành vật liệu sẽ sớm bị phá huỷ hoàn toàn.

Để xác định điện áp đánh thủng do nhiệt ta coi điện áp này là điện áp tới hạn ở nhiệt độ tới hạn trong hình vẽ 5-37a:

$$U_{dt} = U_{th} = \sqrt{\frac{\sigma S(t_{th} - t_0)}{\omega C \operatorname{tg} \delta}}$$

Từ hình 5-37a thấy rằng ở chế độ tới hạn, đạo hàm theo nhiệt độ làm việc về trái và về phải của biểu thức (5-68) sẽ bằng nhau. Với:  $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha_{\operatorname{tg} \delta}(t_h - t_0)}$  trong đó:  $\alpha_{\operatorname{tg} \delta}$  - hệ số nhiệt của tang góc tổn hao điện môi, ta có:

$$U_{dt}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha_{\operatorname{tg} \delta}(t_h - t_0)} \cdot \alpha_{\operatorname{tg} \delta} = \sigma S \quad (5-71)$$

Nếu tính trị số điện dung của tụ điện phẳng qua hằng số điện môi và kích thước điện môi:  $h$  - chiều dày điện môi ;  $S$  - diện tích điện cực:

$$C = \frac{2\epsilon \cdot S}{h}$$

Đối với tụ điện phẳng khi truyền nhiệt qua điện cực ta có điện áp đánh thủng nhiệt (sau khi biến đổi công thức 5-71) sẽ là:

$$U_{dt} = \sqrt{\frac{2\sigma h}{\omega \cdot \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot \alpha_{\operatorname{tg} \delta} \cdot e}} \quad (5-72)$$

Chú ý rằng công thức này chỉ áp dụng cho trường hợp cho mẫu vật liệu có chiều dày bé.

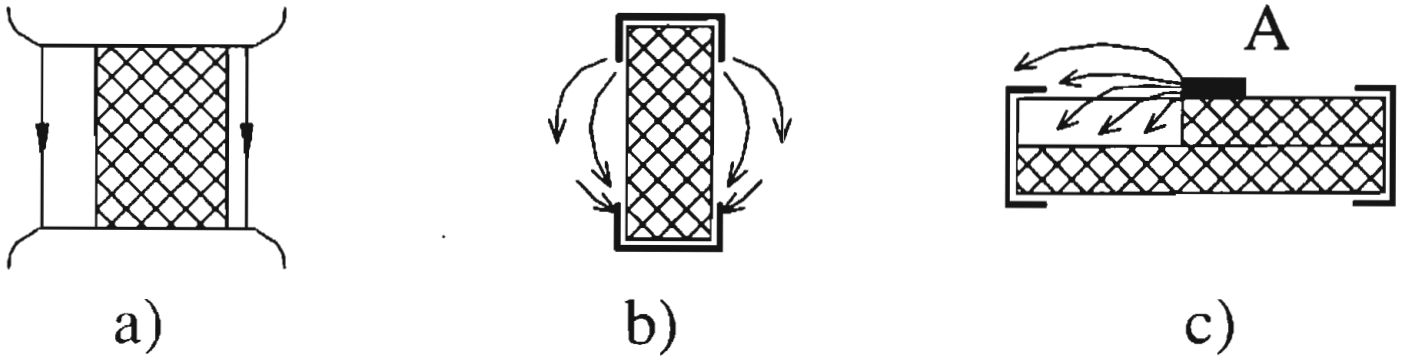
Trong từng trường hợp riêng biệt có thể tìm được cân bằng nhiệt của vật liệu cách điện với sự tính toán độ chênh lệch nhiệt theo chiều dày. Muốn vậy người ta tính toán hoặc xác định bằng thực nghiệm điện dung của vật cách điện, sau đó giải bài toán bằng phương pháp đồ thị phân tích có chú ý đến quan hệ  $\operatorname{tg} \delta$  theo nhiệt độ. Thực tế cho thấy, tính toán nhiệt theo phương pháp phân tích trong hàng loạt trường hợp không phản ánh hết các quy luật phức tạp xác định quá trình tỏa nhiệt trong điện môi và tản nhiệt ra môi trường xung quanh.

#### 5.4.2. Phóng điện bề mặt điện môi rắn

Khi điện môi rắn được đặt trong môi trường khí hay dầu MBA (như: sứ cách điện đường dây, sứ đầu ra của MBA, thủy tinh cách điện, v.v...) thì quá trình phóng điện xảy ra men theo mặt ngoài của điện môi với trị số điện áp phóng điện bé hơn nhiều so với trị số điện áp chọc thủng của khe hở khí hay dầu cũng như của bản thân điện môi rắn. Hiện tượng này rất phổ biến trong cách điện thiết bị điện, cách điện đường dây điện áp cao, các phóng điện này thường không làm hư hỏng cách điện nhưng có thể dẫn đến các sự cố ngắn mạch trong hệ thống điện, do đó cần hạn chế không để xảy ra.

Tùy theo quá trình diễn biến phóng điện với các đặc điểm khác nhau của điện trường, có thể phân ra thành ba trường hợp sau đây:

- Điện môi đặt trong điện trường đồng nhất (hình 5-38a).
- Điện môi đặt trong trường không đồng nhất có thành phần trường dọc theo bề mặt (thành phần tiếp tuyến) lớn (hình 5-38b).
- Điện môi đặt trong trường không đồng nhất có thành phần pháp tuyến lớn (hình 5-38c).



**Hình 5-38. Các trường hợp phóng điện dọc theo bề mặt điện môi rắn.**

Thực nghiệm cho ta thấy, khi đặt điện môi vào trong điện trường đồng nhất trị số điện áp phóng điện xảy ra men theo mặt ngoài của điện môi bé hơn điện áp chọc thủng của khe hở khí (từ 2 lần trở lên). Hiện tượng chọc thủng trong nội bộ điện môi rắn càng khó xảy ra vì cường độ cách điện của nó lớn hơn nhiều so với không khí. Trong trường đồng nhất điện áp phóng điện giảm thấp do các nguyên nhân sau đây:

Trước hết do tiếp xúc giữa điện môi với các điện cực không tốt nên giữa chúng có lớp không khí mỏng. Điện trường trong lớp khí mỏng rất lớn và sớm có quá trình ion hoá, các điện tử và ion dương sinh ra sẽ phân bố trên mặt ngoài của điện môi tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình phóng điện. Thực tế trong các kết cấu cách điện thường dùng mọi biện pháp để đảm bảo sự tiếp xúc chặt chẽ giữa điện cực và điện môi (như dùng ximăng, keo kết dính ...), nhưng trị số điện áp phóng điện mặt ngoài vẫn bé, đó là do nguyên nhân khác: mặt ngoài điện môi bị ẩm. Do tính hút ẩm của vật liệu nên mặt ngoài điện môi hình thành một màng ẩm mỏng. Bản thân màng ẩm có điện dẫn ion và dưới tác dụng của điện trường các ion đó sẽ di chuyển về các điện cực khác dấu. Sự di chuyển này rất chậm chạp nên trên mặt điện môi gần điện cực sẽ tích tụ một số ion cùng dấu với điện cực đó, làm thay đổi sự phân bố điện áp trên bề mặt điện môi, trường trở nên không đồng nhất và do đó điện áp phóng điện giảm thấp.

Trị số điện áp phóng điện mặt ngoài phụ thuộc vào nhiều yếu tố:

- *Độ ẩm của không khí.* Độ ẩm của không khí có ảnh hưởng rất lớn tới trị số điện áp phóng điện. Khi độ ẩm tương đối từ 60-70% trở xuống, trị số điện áp phóng

diện bề mặt tương đối ổn định, nhưng khi độ ẩm cao hơn gây nên sự ngưng tụ khí ẩm trên bề mặt điện môi làm cho điện áp phóng điện giảm nhiều.

- *Do tốc độ di chuyển của các ion trên bề mặt điện môi bé* nên tích tụ điện tích cùng dấu ở các điện cực diễn ra tương đối chậm và cần có thời gian, khiến cho điện áp phóng điện phụ thuộc vào thời gian tác dụng của điện áp.

- *Tính hút ẩm của điện môi.* Khi điện môi cực tính có sự hút ẩm mạnh nên có điện áp phóng điện thấp. Parafin có tính hút ẩm bé nên có điện áp phóng điện cao.

\* *Khi điện môi đặt trong trường không đồng nhất có thành phần tiếp tuyến lớn*, trị số điện áp phóng điện còn giảm thấp hơn so với khi đặt trong trường đồng nhất, nguyên nhân chính là do mặt ngoài bị ẩm và trường không đồng nhất.

Ở gần điện cực cường độ trường rất lớn nên quá trình ion hoá xuất hiện sớm. Dưới tác dụng của thành phần tiếp tuyến của trường, các ion sẽ chuyển dịch về điện cực khác dấu, tạo nên dòng điện đốt nóng lớp ẩm và làm nó bốc hơi. Do lớp ẩm phân bố trên bề mặt điện môi dày mỏng không đều, chỗ mỏng sẽ khô trước gây nên sự gián đoạn dòng điện và tại các nơi này sẽ phát sinh hồ quang, càng xúc tiến quá trình ion hoá phát triển.

Tuy nhiên sự phụ thuộc vào yếu tố ẩm của các loại vật liệu khác nhau nên sự phóng điện có khác với trường hợp trên. Điện áp phóng điện bề mặt của điện môi hút ẩm như gỗ có trị số cao hơn so với sứ, thuỷ tinh - là các vật liệu hút ẩm ít hơn. Hiện tượng này là do lớp ẩm trên mặt gỗ được phân bố đều còn trên mặt sứ, thuỷ tinh ẩm thường đọng thành giọt không liên tục.

\* *Khi thành phần pháp tuyến của điện trường lớn* sẽ làm thay đổi tính chất phóng điện khiến cho điện áp phóng điện giảm đi rất nhiều. Trường ở mép cực rất lớn nên ngay khi điện áp thấp đã có xuất hiện vầng quang, khi điện tăng phóng điện sẽ có dạng các tia lửa xuất phát từ mép cực dương về điện cực đối diện.

Khi điện áp đủ lớn số ion trong các tia lửa tăng nhiều, dưới tác dụng của thành phần pháp tuyến của trường, chúng sẽ bắn phá bề mặt điện môi làm cho bề mặt bị phát nóng, ở một số nơi nhiệt độ sẽ tăng rất cao và phát sinh ion hoá nhiệt. Sự xuất hiện của ion hoá nhiệt làm cho quá trình phóng điện phát triển thuận lợi hơn nhiều, chiều dài của các tia lửa tăng nhanh và quá trình phóng điện kết thúc khi chúng kéo dài tới điện cực đối diện. Giai đoạn này gọi là giai đoạn "*phóng điện trượt*", các tia lửa bám sát bề mặt điện môi dọc theo đường nối liền giữa các cực.

Một đặc điểm khác là do thành phần tiếp tuyến của trường bé nên dòng ion không thể khép kín bằng đường men theo mặt ngoài điện môi mà sẽ khép mạch qua điện dung giữa nó với điện cực đối diện. Trị số về dòng điện, số ion, chiều dài tia lửa ... ngoài việc phụ thuộc vào điện áp còn phụ thuộc vào suất điện dung mặt và tốc độ biến thiên của điện áp theo thời gian. Ở điện áp một chiều vì dòng ion không

thể khép mạch qua điện dung nên các điện tích sẽ ngưng tụ trên bề mặt điện môi và dần dần làm cho điện áp phân bố đều. Như vậy dòng ion không đạt đến trị số đủ gây nên ion hoá nhiệt, do đó điện áp phóng điện không bị giảm thấp mà giữ ở mức cao gần bằng điện áp chọc thủng của khe hở khí.

\* Trong thực tế trên bề mặt điện môi không chỉ có ẩm mà còn có bụi bẩn, tạp chất. Nếu lớp bụi này khô ráo thì nó có điện trở cao và không ảnh hưởng đáng kể đến điện áp phóng điện. Khi trời ẩm, có sương mù hay mưa nhỏ sẽ hình thành lớp dẫn điện trên bề mặt điện môi. Nếu trong bụi có các thành phần muối hoà tan thì điện dẫn của nó tăng cao sẽ tạo nên dòng điện rò lớn đốt nóng bề mặt điện môi. Do độ dày lớp bụi khác nhau và có thành phần hoá học cũng khác nhau nên điện trở trên bề mặt điện môi luôn thay đổi ở các vị trí khác nhau và sự phát nóng càng mãnh liệt theo đường phóng điện. Ở các nơi này được sấy khô điện trở tăng lên đồng thời cũng sẽ phải chịu phần điện áp giáng lớn tạo điều kiện cho trường tăng cục bộ và dẫn đến phóng điện cục bộ làm cho dòng điện rò tăng lên.

Phần đoạn đường còn lại tiếp tục sấy khô và cũng xuất hiện phóng điện cục bộ. Nếu tăng điện áp thì phóng điện cục bộ xuất hiện càng nhiều và có thể xảy ra cùng một lúc tại nhiều chỗ khác nhau trên bề mặt điện môi, khi các vùng có phóng điện này được nối liền với nhau thì sẽ dẫn đến phóng điện hoàn toàn. Quá trình phóng điện diễn biến tương đối chậm, không liên tục nên phóng điện phụ thuộc vào thời gian tác dụng của điện áp.

*\* Biện pháp nâng cao điện áp phóng điện bề mặt.*

Để nâng cao trị số điện áp phóng điện bề mặt người ta thường dùng các biện pháp sau đây:

1- *Tăng chiều dài phóng điện dọc theo bề mặt*, ví dụ trong kết cấu cách điện có bố trí nhiều tầng lá để tăng chiều dài phóng điện và chiều dài rò điện. Đối với các đường dây tải điện trên không đi trong các vùng bụi phải dùng các loại cách điện đặc biệt có chiều dài phóng điện lớn hơn so với loại thông thường hoặc giải quyết bằng cách tăng cường thêm số cách điện trong chuỗi cách điện.

2 - *Cải thiện sự phân bố trường*. Khi điện môi đặt trong trường không đồng nhất có thể dùng cực ngầm để giảm cường độ trường ở cực có điện áp.

Khi có đặt cực ngầm, trường sẽ tập trung ở đầu cực ngầm còn ở phía mũ trường giảm, do đó, làm tăng điện áp phóng điện mặt ngoài. Trường ở cực ngầm có tăng nhưng không đáng ngại vì khả năng chọc thủng cách điện từ nó tới để rất khó xảy ra.

3 - *Trong vận hành để giữ cho điện môi không bị bám bụi* có thể tiến hành vệ sinh theo định kỳ hoặc phủ lên điện môi lớp men hay vật liệu cách điện khác có tính chất chống bám bụi và hơi ẩm.



## Chương VI

# TÍNH CHẤT CƠ - LÝ - HOÁ - CỦA ĐIỆN MÔI

Khi lựa chọn vật liệu cách điện sử dụng vào một mục đích cụ thể, cần phải chú ý tới không những tính chất cách điện của nó trong những điều kiện làm việc bình thường mà còn phải xem xét tới độ ổn định của những tính chất đó khi có sự tác động của cơ học, lý học, hoá học, điều kiện môi trường xung quanh và của các tia phóng xạ, bức xạ v.v... Trong quá trình nghiên cứu, thiết kế, xây dựng công nghệ chế tạo máy điện và các thiết bị điện đòi hỏi phải có sự hiểu biết về các tính chất như: độ bền chịu kéo, nén, uốn, va đập, độ bền chịu rung ở các biên độ và tần số dao động cơ học, độ bền nhiệt, hệ số dẫn nở nhiệt, khả năng chống ăn mòn hoá học, vi sinh học, thời gian lão hoá của vật liệu v.v... để chế tạo ra những thiết bị chất lượng cao, đảm bảo làm việc lâu dài và đem lại hiệu quả kinh tế cao. Đó chính là lý do của việc nghiên cứu về các tính chất cơ - lý - hoá - nhiệt của điện môi.

### 6.1. TÍNH HÚT ẨM CỦA ĐIỆN MÔI

Các vật liệu cách điện nói chung ở mức độ ít hay nhiều đều hút ẩm vào bên trong từ môi trường xung quanh hay thấm ẩm tức là cho hơi nước xuyên qua chúng. Khi bị thấm ẩm các tính chất cách điện của điện môi bị giảm nhiều. Những vật liệu cách điện không cho nước đi vào bên trong nó khi đặt ở trong môi trường có độ ẩm cao, trên bề mặt có thể ngưng tụ một lớp ẩm làm cho dòng rò bề mặt tăng, điện áp phóng điện dọc theo bề mặt giảm và có thể gây nên sự cố cho các thiết bị điện.

#### 6.1.1. Độ ẩm của không khí

Trong không khí luôn chứa một lượng hơi nước nhất định. Độ ẩm của không khí được đánh giá qua số lượng hơi nước chứa trong nó. Chúng ta có những khái niệm về độ ẩm không khí như sau:

*Độ ẩm tuyệt đối của không khí* được đánh giá bằng khối lượng (m gram) của hơi nước chứa trong một đơn vị thể tích không khí ( $m^3$ ). Trên hình 6-1 đưa ra quan

hệ độ ẩm bão hoà tuyệt đối của không khí ( $m_{max}$ ) theo nhiệt độ. Như vậy, ứng với mỗi nhiệt độ sẽ có lượng hơi nước bão hoà nhất định, khi nhiệt độ càng cao lượng hơi nước bão hoà trong không khí càng lớn song không thể vượt quá một trị số nhất định vì hơi nước sẽ rơi xuống dạng sương.

**Độ ẩm tương đối  $\varphi\%$ .** Độ ẩm tương đối của không khí được tính bằng tỷ số phần trăm giữa độ ẩm tuyệt đối với độ ẩm tuyệt đối tối đa.

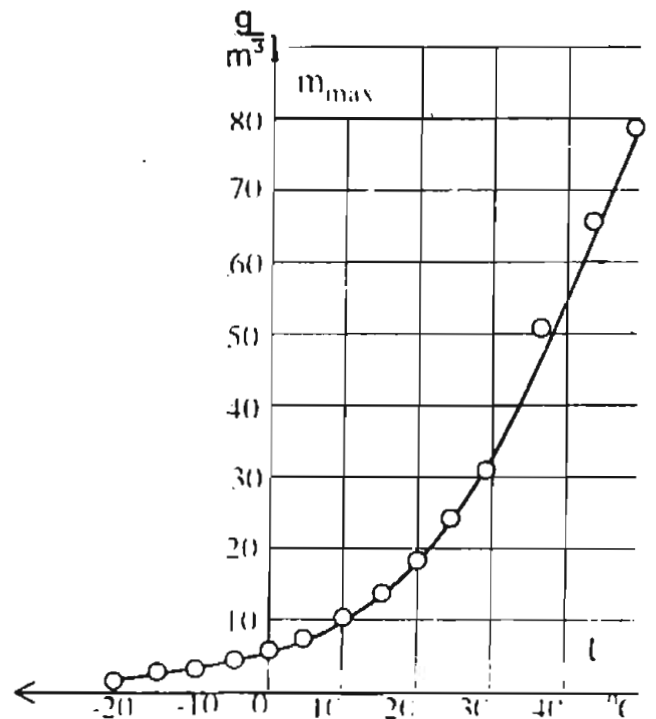
$$\varphi\% = \frac{m}{m_{max}} \cdot 100\% \quad (6-1)$$

Ở nhiệt độ bình thường  $20^\circ \pm 5^\circ\text{C}$  độ ẩm của không khí được lấy bằng 60 - 70% (thường là 65%) - tương đương với độ ẩm tuyệt đối là  $m = 11\text{g}/\text{m}^3$ .

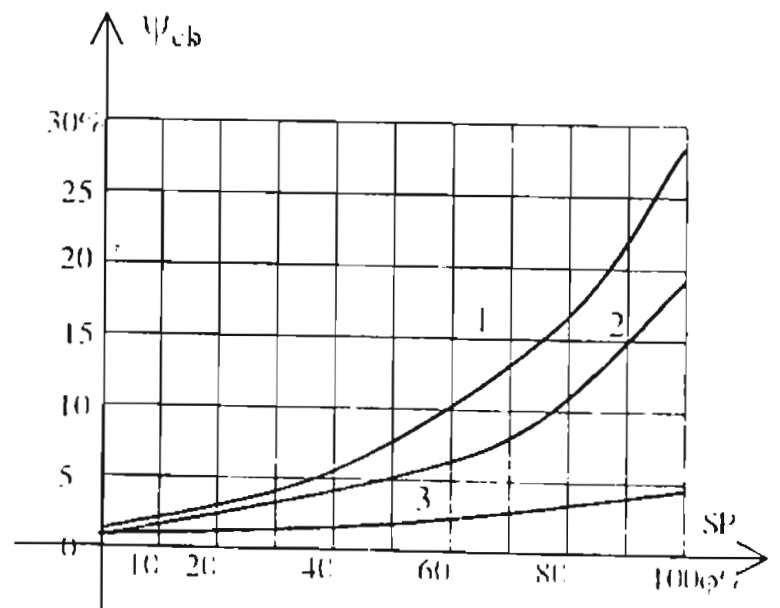
### 6.1.2. Độ ẩm của vật liệu

Khi vật liệu cách điện làm việc ở trong môi trường không khí với độ ẩm  $\varphi\%$  và nhiệt độ  $t^\circ\text{C}$  nào đó, sau một thời gian độ ẩm của vật liệu  $\varphi$  - là lượng hơi nước chứa trong vật liệu sẽ đạt tới giới hạn độ ẩm cân bằng tương ứng với độ ẩm của môi trường không khí. Trị số độ ẩm cân bằng phụ thuộc vào độ ẩm của không khí ( $\varphi\%$ ) và đặc tính hút ẩm của vật liệu cách điện. Trên hình 6-2 cho quan hệ  $\varphi_{cb}$  với độ ẩm của không khí đối với các loại vật liệu khác nhau: đường 1 của hình vẽ là vật liệu tơ tự nhiên; đường 2 - vật liệu sợi bông; đường 3 - vật liệu là sợi polietilen.

Nếu vật liệu tương đối



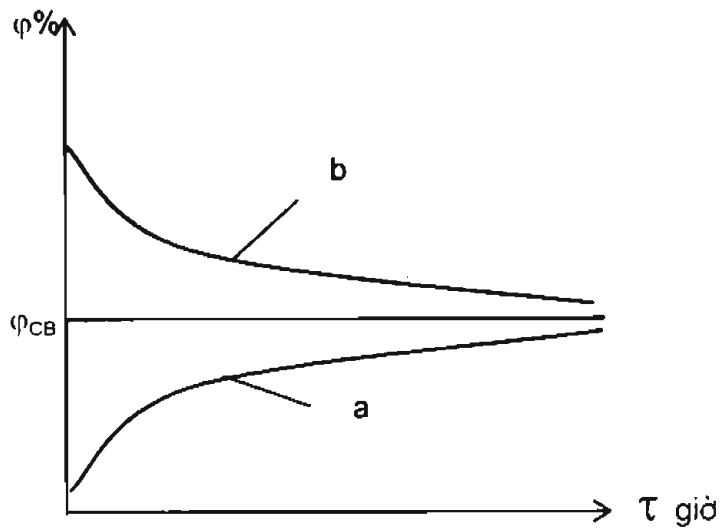
Hình 6-1. Quan hệ giữa độ ẩm tuyệt đối bão hoà theo nhiệt độ của không khí.



Hình 6-2. Quan hệ  $\varphi_{cb} = f(\varphi\%)_{kk}$  đối với một số vật liệu.

1- vật liệu là tơ tự nhiên; 2- vật liệu từ sợi bông;  
3- vật liệu là sợi poliêtilen.

khô được đặt trong không khí ẩm thì vật liệu hút dần hơi ẩm từ không khí, khi đó vật liệu có độ ẩm  $\varphi$  tức là lượng hơi nước chứa trong một đơn vị trọng lượng của vật liệu. Thời gian đặt vật liệu vào trong môi trường tăng lên thì độ ẩm vật liệu tăng dần đến độ ẩm cân bằng tương ứng với độ ẩm của không khí  $\varphi_{kk}$  (hình 6-3a). Ngược lại, nếu độ ẩm trong vật liệu lớn (vật liệu bị ướt) đặt ở trong môi trường không khí với độ ẩm tương đối cũng là  $\varphi_{kk}$  thì



Hình 6.3. Sự biến đổi độ ẩm  $\varphi$  của vật liệu; hút ẩm (a) và sấy khô (b).

sau một thời gian vật liệu được sấy khô (sấy khô tự nhiên), độ ẩm trong vật liệu sẽ giảm xuống và tiệm cận dần tới độ ẩm cân bằng  $\varphi_{cb}$  (đường cong b hình 6-3).

Thường thường người ta xác định độ ẩm của vật liệu bằng cách xác định lượng hơi nước thấm vào hay thoát ra khỏi vật liệu bằng số phần trăm:

$$\varphi_{vl} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100\% \quad (6-2)$$

với  $M_1, M_2$  - trọng lượng của mẫu vật liệu trước và sau khi bị ẩm.

Đối với những vật liệu dệt hay những vật liệu khác như: giấy, bìa cát tông, ... người ta dùng khái niệm *độ ẩm quy ước*, tương ứng với độ ẩm cân bằng khi đặt để trong không khí ở điều kiện bình thường. Ví dụ, đối với giấy cáp, độ ẩm quy ước lấy bằng 8%. Cấu tạo và bản chất hoá học có ảnh hưởng quyết định đến tính hút ẩm của vật liệu. Sự tồn tại và kích thước của các mao dẫn giữ một vai trò lớn trong việc hút ẩm vào bên trong. Các vật liệu xốp, đặc biệt là vật liệu sợi có tính hút ẩm mạnh hơn các vật liệu có cấu tạo đặc vì phân tử nước có kích thước nhỏ (khoảng  $2,7\text{Å}$ ) có thể đi xuyên qua các lỗ xốp trong phân tử vật liệu cách điện.

Người ta xác định độ hút ẩm của vật liệu bằng sự tăng trọng lượng trước và sau khi mẫu bị ngấm ẩm. Nhưng khả năng hút ẩm của vật liệu không phản ảnh hoàn toàn mức độ biến đổi tính chất của vật liệu đó khi bị ẩm. Trong trường hợp nếu hơi ẩm hút vào có khả năng tạo nên sợi hay màng mỏng theo chiều dày cách điện, lớp màng và sợi có thể xuyên qua toàn bộ khoảng cách giữa các điện cực, thì chỉ với một lượng rất nhỏ hơi ẩm hút vào cũng làm cho tính chất của cách điện giảm đi rất nhiều. Nếu hơi ẩm phân bố theo thể tích của vật liệu dưới dạng các tạp chất nhỏ riêng biệt (không nối với nhau) thì ảnh hưởng của hơi ẩm đến tính chất cách điện của vật liệu sẽ ít hơn. Ở các vật liệu xốp mà có chứa các chất hoà tan

trong nước khi bị ẩm ngấm vào bên trong sẽ làm cho điện trở suất khối của vật liệu giảm đi rõ rệt nhất là khi vật liệu ở nhiệt độ cao.

Ở điện áp xoay chiều, một trong những tham số thay đổi nhiều nhất là tgδ và hằng số điện môi ε của vật liệu khi độ ẩm của vật liệu thay đổi. Vì vậy, trong nhiều trường hợp người ta đo trị số điện dung để xác định vật liệu có bị ẩm hay không.

### 6.1.3. Tính thấm ẩm

Tính chất thấm ẩm của vật liệu là khả năng cho hơi nước đi qua bản thân nó. Đặc điểm này rất quan trọng khi đánh giá chất lượng của vật liệu dùng để sơn, phủ bảo vệ chống sự xâm nhập ẩm vào bên trong những vật liệu hay chi tiết cần được bảo vệ. Phần lớn các vật liệu đều thấm ẩm qua các lỗ xốp rất nhỏ và có độ ẩm đo được, song cũng có loại vật liệu như thủy tinh, kim loại, polietilen, gốm đã được nung kỹ ... không thấm ẩm và có độ ẩm bằng không.

Lượng hơi ẩm m (đo bằng microgam) trong thời gian τ giờ đi qua mặt phẳng S (cm<sup>2</sup>) của lớp vật liệu cách điện có chiều dày h (cm) dưới tác dụng của hiệu số áp suất hơi nước P<sub>1</sub> và P<sub>2</sub> (mm cột thủy ngân) ở hai phía bề mặt vật liệu được tính bằng công thức sau:

$$m = \Phi \frac{(P_1 - P_2)S}{h \cdot \tau} \quad (6-3)$$

Trong đó: Φ - độ thấm ẩm của vật liệu.

Độ thấm ẩm của các vật liệu khác nhau thì cũng khác nhau, ví dụ: parafin Φ = 0,0007 vòn đối với polistirol - 0,03; còn triaxetat xenlulô bằng 1 μg/cm.mm cột thủy ngân.

Để làm giảm độ hút ẩm và thấm ẩm của vật liệu cách điện xốp người ta thường dùng biện pháp tẩm. Những vật liệu được tẩm sẽ làm cho sự hút ẩm của vật liệu chậm lại không làm cho điện trở suất ρ thay đổi nhiều sau thời gian tác động lâu dài của độ ẩm. Điều đó được giải thích bởi các phân tử của chất tẩm có kích thước lớn hơn nhiều so với kích thước phân tử nước nên không có khả năng bịt kín hết các lỗ xốp của vật liệu nhất là khi vật liệu có các lỗ xốp nhỏ. Để khắc phục vấn đề này người ta dùng biện pháp tẩm sấy bằng chân không.

Khi sử dụng lâu dài các thiết bị điện trong điều kiện nhiệt đới, trên các điện môi hữu cơ có thấy nấm mốc phát triển. Sự xuất hiện nấm mốc làm cho điện trở suất mặt của điện môi xấu đi, làm tăng tổn hao điện môi, làm cho độ bền cơ học giảm đi và gây nên sự ăn mòn các bộ phận kim loại tiếp xúc với nó.

Những vật liệu làm bằng xenlulô trong đó có cả các vật liệu đã được tẩm (hêtinác, tectôlít) bằng côlôfan, dầu sơn v.v... dễ bị nấm mốc phá huỷ nhất. Các vật

liệu vô cơ như: gốm, thủy tinh, mica, silic hữu cơ, nhựa épốc xi, teflon-4, polietilen, polistirol v.v... ít bị nấm mốc tác động. Trong vùng nhiệt đới nóng - ẩm cần phải tính đến khả năng gây hư hỏng cách điện, vỏ cáp bởi các côn trùng, mối, kiến, hay các động vật khác, ngay cả khi chuyên chở hay được lưu giữ trong kho cũng có khả năng này. Do vậy khi chọn vật liệu cho các thiết bị điện làm việc ở môi trường nhiệt đới cần phải thí nghiệm xác định tính bền nhiệt đới và tuổi thọ của vật liệu để thiết bị làm việc tốt nhất đem lại hiệu quả kinh tế cao.

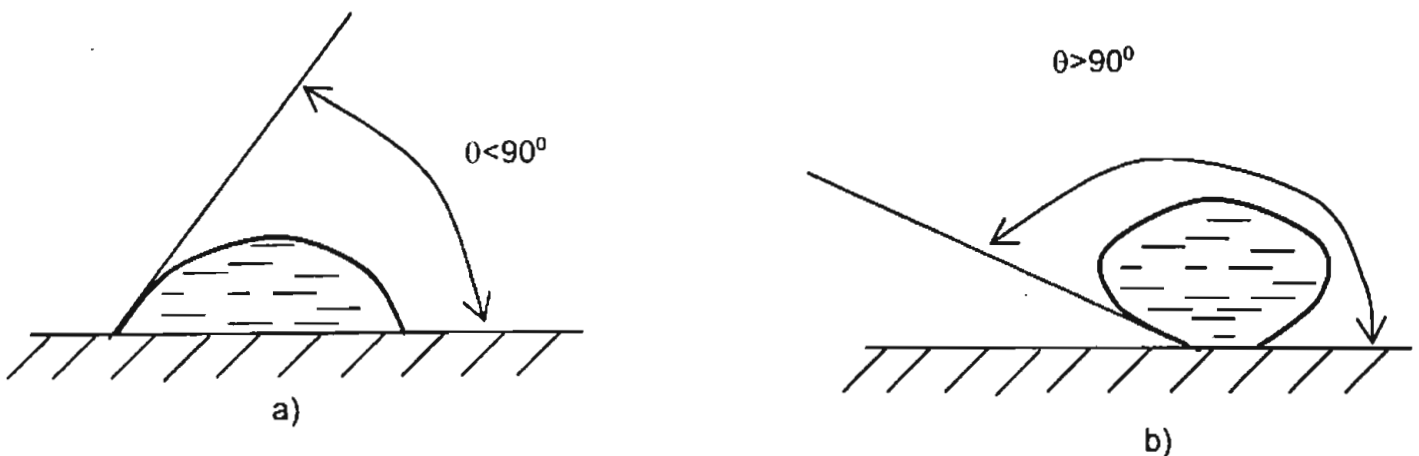
Với mục đích nâng cao tính chống nấm mốc của vật liệu cách điện hữu cơ người ta đưa thêm vào thành phần của nó chất fungixít hoặc phủ lên chất cách điện lớp sơn có chứa fungixít. Chất fungixít là một chất độc hạn chế nấm mốc phát triển khi sử dụng đối với các vật liệu khác nhau cần có công thức pha chế cho thích hợp.

#### 6.1.4. Sự hấp phụ nước trên bề mặt điện môi

Đối với vật liệu không thấm ẩm khi đặt vào trong môi trường có độ ẩm cao thì trên mặt vật liệu hình thành màng ẩm hay bị ngưng tụ lớp nước. Quá trình ngưng tụ hơi nước trên mặt vật liệu gọi là sự hấp phụ nước của vật liệu

Lớp nước hấp phụ phụ thuộc vào độ ẩm, cấu trúc bề mặt và loại vật liệu.

Độ ẩm càng lớn thì bề dày của lớp hấp phụ lớn. Những vật liệu có kết cấu ion hay cực tính mạnh thì có khả năng hấp phụ mạnh vì lực tác dụng giữa các phân tử vật liệu với phân tử nước lớn; còn các vật liệu trung tính hay cực tính yếu thì lực hút này nhỏ nên có sự hấp phụ yếu (ví dụ như parafin).



**Hình 6-4. Giọt chất lỏng trên bề mặt vật liệu.**  
a) Vật liệu dính nước tốt; b) Vật liệu không dính nước.

Khả năng dính nước (hoặc chất lỏng khác) của điện môi được đặc trưng bởi "góc biên dính nước"  $\theta$  của giọt nước đổ lên bề mặt phẳng của vật liệu (hình 6-4). Góc  $\theta$  càng nhỏ, sự dính nước càng mạnh, đối với vật liệu với bề mặt dính nước  $\theta < 90^\circ$  (hình 6-4a), đối với bề mặt không dính nước (kị nước) có  $\theta > 90^\circ$  (hình 6-4b).

Khi bề mặt vật liệu bị hút ẩm thì dòng điện dẫn mặt tăng lên, tổn hao năng lượng cũng sẽ tăng và dễ dàng gây nên phóng điện bề mặt, gây nên sự cố trong các thiết bị điện (xem chương V, mục "phóng điện bề mặt điện môi rắn").

Để hạn chế sự tác động của độ ẩm đối với vật liệu cách điện người ta đã dùng các biện pháp sau đây:

- Sấy khô và sấy trong chân không để hơi ẩm thoát ra bên ngoài.
- Tẩm các loại vật liệu xốp bằng sơn cách điện.
- Quét lên bề mặt điện môi lớp sơn phủ nhằm ngăn chặn sự xâm nhập hơi ẩm vào bên trong điện môi.
- Để nâng cao điện áp phóng điện bề mặt phải tăng cường chiều dài dò điện bằng cách đặt thêm các gờ, tán như ở các sứ cách điện ... Trong điều kiện cho phép làm vệ sinh tẩy rửa bụi bẩn bám trên bề mặt điện môi.

## 6.2. TÍNH CHẤT CƠ HỌC CỦA ĐIỆN MÔI

Các chi tiết bằng vật liệu cách điện trong các thiết bị điện khi vận hành ngoài sự tác động của điện trường còn phải chịu tác động của các phụ tải cơ học nhất định. Vì vậy, khi chọn vật liệu cần phải xem xét tới độ bền cơ học của các vật liệu và khả năng chịu đựng của chúng mà không bị biến dạng.

### 6.2.1. Độ bền chịu nén, chịu kéo và uốn

Các dạng đơn giản nhất của phụ tải tĩnh cơ học - nén, kéo và uốn được nghiên cứu trên cơ sở quy luật cơ bản ở giáo trình sức bền vật liệu.

Trị số của độ bền chịu kéo ( $\sigma_k$ ), chịu nén ( $\sigma_n$ ) và uốn ( $\sigma_u$ ) được đo bằng KG/cm<sup>2</sup> hoặc trong hệ SI bằng N/m<sup>2</sup>, ( $1 \text{ N/m}^2 \approx 10^{-5} \text{ KG/cm}^2$ ). Các vật liệu có kết cấu không đẳng hướng (vật liệu có nhiều lớp, sợi v.v...) thì độ bền cơ học phụ thuộc vào phương tác dụng của tải trọng, theo các hướng không gian khác nhau thì có trị số độ bền khác nhau. Đối với các vật liệu như: thủy tinh, sứ, chất dẻo, v.v... độ bền uốn có trị số bé. Ví dụ ở thủy tinh thạch anh độ bền chịu nén  $\sigma_n = 20.000 \text{ KG/cm}^2$  còn khi kéo đứt chưa đến  $500 \text{ KG/cm}^2$ , chính vì vậy người ta thường sử dụng nó ở vị trí đỡ. Ngoài ra độ bền cơ của nhiều điện môi phụ thuộc vào diện tích tiết diện ngang của mẫu, phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ và thường giảm khi nhiệt độ tăng. Những vật liệu hút ẩm có độ bền phụ thuộc vào độ ẩm ...

Trong nhiều trường hợp tính giòn, độ rắn và một số đặc tính cơ học khác của vật liệu cách điện có ý nghĩa thực tế rất lớn.

\* **Tính giòn:** Nhiều vật liệu giòn tức là trong khi có độ bền tương đối cao đối với phụ tải tĩnh thì lại dễ bị phá hủy bởi lực động bất ngờ đặt vào. Để đánh giá khả

năng của vật liệu chống lại tác động của phụ tải động người ta xác định ứng suất dai va đập.

Ứng suất dai va đập  $\sigma_{vd}$  của vật liệu tìm được bằng cách chia năng lượng A tiêu tốn để bẻ gãy vật mẫu có tiết diện ngang S cho tiết diện này. Ứng suất dai va đập đo bằng  $\text{kG.cm/cm}^2$  hoặc trong hệ SI bằng  $\text{J/m}^2$ ;  $1\text{J/m}^2 \approx 10^{-3} \text{kG.cm/cm}^2$ . Vì thế để chuyển đổi ứng suất dai va đập sang  $\text{KG cm/cm}^2$ , cần phải nhân nó với  $10^3$ .

Polietylen có ứng suất dai va đập rất cao,  $\sigma_{vd} > 100 \text{kG.cm/cm}^2$ , còn với vật liệu gốm và mica chỉ khoảng  $2 \div 5 \text{kG cm/cm}^2$ . Trong nhiều trường hợp người ta kiểm tra khả năng vật liệu cách điện chịu đựng được tác động rung lâu dài, tức là những dao động lặp lại có tần số và biên độ nhất định. Cách kiểm tra này thường tiến hành cho các thành phẩm, vật để kiểm tra được lắp trên giá thử rung theo chế độ định trước bởi cơ cấu truyền động tương ứng. Việc xác định độ bền rung là rất quan trọng đối với vật liệu cách điện trong trang bị điện của máy bay.

\* **Độ cứng:** Độ cứng của vật liệu là khả năng của bề mặt vật liệu chống lại biến dạng gây nên bởi lực nén truyền từ vật có kích thước nhỏ vào nó. Độ cứng được xác định theo nhiều phương pháp. Đối với vật liệu vô cơ, độ cứng được xác định theo thang khoáng vật, còn vật liệu hữu cơ - theo phương pháp Brinel và phương pháp con lăn của Cuznaxóp.

Thang khoáng vật hay là thang thập phân quy ước của độ cứng. Nếu ta quy ước hoạt thạch là 1 đơn vị thì thạch cao có độ cứng là 1,4, apatít - 44, thạch anh - 1500, hoàng ngọc (topa) - 5500, kim cương - 5.000.000.

Phương pháp Brinel thường được dùng nhất là sử dụng hòn bi bằng thép đã tôi có đường kính D được ép vào mẫu bởi một lực nhất định P. Sau khi loại bỏ phụ tải người ta đo chiều sâu h của vết lõm hòn bi trên bề mặt vật liệu hoặc đường kính d của vết lõm. Độ cứng theo Brinel  $T_B$  tìm được bằng cách chia lực P cho diện tích vết lõm:

$$T_B = \frac{P}{\pi Dh} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ kG / mm}^2 \quad (6-4)$$

\* **Độ nhớt:** Đối với vật liệu cách điện thể lỏng hoặc nửa lỏng như dầu, sơn, hỗn hợp tráng, tẩm, dầu MBA v.v... thì độ nhớt là một đặc tính cơ học quan trọng. Có ba khái niệm về độ nhớt của chất lỏng.

+ **Độ nhớt động lực học  $\eta$**  hay còn gọi là hệ số ma sát bên trong của chất lỏng. Tốc độ chuyển động của hòn bi rắn, bán kính r trong môi trường không giới hạn có độ nhớt động lực học  $\eta$  dưới ảnh hưởng của lực F không lớn tác động liên tục lên hòn bi là không đổi và có trị số xác định theo định luật Stóc:

$$v = \frac{l}{\eta} \cdot \frac{F}{6 \cdot \pi \cdot r} \quad (6-5)$$

+ **Độ nhớt động học**  $v$  bằng tỷ số độ nhớt động lực học của chất lỏng và mật độ của nó:

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (6-6)$$

Tất cả các chất lỏng không bị biến đổi hoá học khi nung nóng có độ nhớt giảm nhiều khi nhiệt độ tăng (hình 6-5). Thường thường quy luật biến đổi độ nhớt theo nhiệt độ tương ứng với phương trình hàm số mũ:

$$\eta = A \cdot e^{\frac{w}{KT}} \quad (6-7)$$

Trong đó: A - hằng số đặc trưng cho chất lỏng đang xét; w - năng lượng kích thích bằng công chuyển phân tử từ trạng thái ổn định này sang trạng thái ổn định khác. Hằng số A có liên quan tới hằng số phân tử chất lỏng:

$$A = \frac{6KT}{fl^3}$$

f - tần số giao động nhiệt của phân tử, bằng  $10^{12} \div 10^{13}$  1/giây;

l - khoảng cách giữa các phân tử.

+ **Độ nhớt tương đối theo Angle**: Đây là độ nhớt đo bằng tỷ số giữa thời gian chảy từ nhớt kế Angle của 200ml chất lỏng (ở nhiệt độ thí nghiệm cho trước) với thời gian chảy của 200ml nước cất ở 20°C (khoảng 51-52 giây).

$$\eta = \frac{\tau_t}{\tau_{H_2O}} \cdot E^0 \quad (6-8)$$

### 6.3. TÍNH CHẤT NHIỆT CỦA ĐIỆN MÔI

Những tính chất nhiệt quan trọng nhất của điện môi là: độ bền chịu nóng (độ bền nhiệt), độ bền chịu lạnh, độ dẫn nhiệt và giãn nở nhiệt.



### 6.3.1. Tính chịu nóng (độ bền nhiệt)

Khả năng của vật liệu cách điện và các chi tiết chịu đựng không bị hư hỏng trong thời gian ngắn cũng như lâu dài dưới tác động của nhiệt độ cao và sự thay đổi đột ngột nhiệt độ được gọi là độ bền chịu nóng hay còn gọi là độ bền nhiệt.

Độ bền chịu nóng của điện môi vô cơ thường được xác định theo điểm bắt đầu biến đổi tính chất điện, ví dụ, tgδ tăng rõ rệt hay điện trở suất giảm. Đại lượng độ bền chịu nóng được đánh giá bằng trị số nhiệt độ (đo bằng °C) xuất hiện sự biến đổi các tính chất.

Độ bền chịu nóng của điện môi hữu cơ thường được xác định theo điểm bắt đầu biến dạng cơ học kéo hoặc uốn, hoặc theo độ lún sâu của kim loại dưới áp lực khi nung nóng điện môi. Với các điện môi khác có thể xác định độ bền chịu nóng theo các đặc tính điện.

Đối với điện môi lỏng có đưa ra hai khái niệm là nhiệt độ chớp cháy và nhiệt độ cháy.

Nhiệt độ chớp cháy được gọi là nhiệt độ của chất lỏng mà khi nung nóng đến nhiệt độ đó hỗn hợp hơi của nó với không khí sẽ bốc cháy khi đưa lửa vào gần. Còn nhiệt độ cháy là nhiệt độ cao hơn mà ở đó khi đưa ngọn lửa lại gần, bản thân chất lỏng thử nghiệm bắt đầu cháy. Các đặc tính này cần lưu ý đặc biệt khi đánh giá chất lượng của dầu biến áp và các dung môi dùng để sản xuất sơn cách điện.

Vấn đề nhiệt độ làm việc cao nhất cho phép được giải quyết trên cơ sở nghiên cứu kỹ độ bền chịu nóng ngắn hạn hay lâu dài của vật liệu, cần có chú ý đến hệ số dự trữ. Hệ số này phụ thuộc vào điều kiện làm việc, mức độ an toàn cần thiết và tuổi thọ của chất cách điện.

Để kiểm tra độ bền của vật liệu cách điện về mặt hoá già nhiệt, mẫu vật liệu được giữ lâu dài ở nhiệt độ tương đối cao nhưng chưa làm cho vật liệu bị phá huỷ nhanh chóng. Tính chất của mẫu đã hoá già sau khoảng thời gian nhất định được đo và so sánh với tính chất của vật liệu lúc ban đầu. Ngoài nhiệt độ, tốc độ hoá già còn chịu ảnh hưởng đáng kể của áp suất không khí, nồng độ ôxy, sự có mặt của ôzôn, các chất phản ứng hoá học khác làm nhanh hay chậm sự hoá già. Sự hoá già nhiệt độ tăng nhanh khi chiếu mẫu bằng các tia cực tím, khi có điện trường, phụ tải cơ học v.v... tác động.

Khả năng nâng cao nhiệt độ làm việc của chất cách điện rất quan trọng. Trong các nhà máy điện và thiết bị điện nâng cao nhiệt độ cho phép nhận được công suất cao hơn khi kích thước không đổi hoặc nếu giữ nguyên công suất thì có thể giảm kích thước, trọng lượng và giá thành của thiết bị ...

Theo quy định của IEC (Hội kỹ thuật điện quốc tế) các vật liệu cách điện được phân tích theo các cấp chịu nhiệt - độ bền chịu nóng (bảng 6.1). Đây là nhiệt

độ làm việc lớn nhất cho phép khi sử dụng các vật liệu đó trong các thiết bị điện làm việc lâu dài ở điều kiện bình thường. Ở nhiệt độ này thời gian phục vụ định trước theo yêu cầu kinh tế kỹ thuật của thiết bị điện được bảo đảm. Trong những trường hợp đặc biệt có thể nâng cao nhiệt độ làm việc so với các trị số nêu ra trong bảng 6.1 của vật liệu cách điện tương ứng, song thiết bị điện có thời gian phục vụ rất ngắn.

**Bảng 6.1: Phân cấp vật liệu cách điện theo độ bền chịu nóng**

Ký hiệu cấp chịu nhiệt	Nhiệt độ làm việc lớn nhất cho phép °C	Ký hiệu cấp chịu nhiệt	Nhiệt độ làm việc lớn nhất cho phép °C
Y	90	B	130
A	105	F	155
E	120	H	180
		C	> 180

\* **Cấp Y:** Bao gồm các vật liệu sợi gốc xenlulô và tơ (sợi, vải, băng dai, giấy, catton, gỗ v.v...) nếu chúng không được tẩm và ngâm trong vật liệu cách điện lỏng.

\* **Cấp A:** Là các vật liệu của cấp Y khi đã được ngâm hay tẩm bất kỳ chất cách điện khác. Ví dụ: giấy tẩm hay ngâm trong dầu biến áp, vải bông tẩm dầu, tơ có dầu hay sơn. Trong cấp A gồm có axetyl butirát xenlulô, triaxêtyl xenlulô và nhựa poliamít, êmay gốc sơn nhựa dầu, tẩm gỗ dán v.v...

\* **Cấp E:** Gồm các chất dẻo có chất độn hữu cơ và lớp nhựa liên kết chịu nhiệt loại fenol focmalđêhít và các loại tương tự khác (hêtinác, téctôlít, bột nén có độn bột gỗ v.v...), nhựa epôc xi và hỗn hợp không có độn, chất cách điện của dây êmay gốc sơn polivinyl axêtal v.v...

Như vậy, các cấp Y, A, E gồm chủ yếu là các vật liệu cách điện thuần túy hữu cơ. Một số vật liệu cách điện hữu cơ khác (cao su, polistyrol, v...) có độ bền chịu nóng thậm chí còn thấp hơn cấp Y và không được đưa vào phân loại theo tiêu chuẩn.

\* **Cấp B:** Bao gồm mica vụn, các vật liệu sợi amian và thủy tinh kết hợp với các vật liệu liên kết và tẩm hữu cơ như: các micamít (trong đó có đệm giấy hoặc vải hữu cơ), vải sơn thủy tinh, téctôlít thủy tinh dựa trên nhựa phenol focmaldehyt chịu nhiệt, hỗn hợp epôcxi với lớp độn vô cơ v.v...

\* **Cấp F:** Bao gồm micanít, các vật liệu trên cơ sở sợi thủy tinh không có lớp đệm hoặc có lớp đệm vô cơ, chất liên kết và tẩm là vật liệu hữu cơ có độ bền chịu nóng cao, epôcxi poliête chịu nhiệt, silic hữu cơ.

\* **Cấp H:** tương tự với cấp F, nhưng chất liên kết là loại nhựa silic hữu cơ có độ bền nhiệt đặc biệt cao.

\* **Cấp C:** Gồm các vật liệu vô cơ thuần túy, hoàn toàn không có thành phần kết dính hay tẩm. Đó là chất cách điện ôxít nhôm và florua nhôm, mica, thủy tinh và vật liệu sợi thủy tinh, thạch anh, amiăng, mica léch, xi măng amiăng không tẩm, mi ca nhít chịu nóng (chất liên kết vô cơ) v.v... Trong tất cả các vật liệu cách điện hữu cơ chỉ có polytêtrafloêtylen (teflon - 4) thuộc cấp chịu nhiệt C.

Việc phân cấp chịu nhiệt các vật liệu cách điện hoặc hỗn hợp của chúng đòi hỏi phải thử nghiệm rất công phu và lâu dài đối với các vật mẫu về sự hoá già do nhiệt trong những điều kiện gần nhất với các điều kiện làm việc thực tế của vật liệu đó.

Đối với các vật liệu cách điện đặc biệt giòn, dễ vỡ (thủy tinh, vật liệu gốm v.v...) cần phải thử nghiệm độ bền xung nhiệt.

Để xác định độ bền chịu nóng của vật liệu theo tính chất điện, có thể dùng đường cong quan hệ góc tổn hao điện môi theo nhiệt độ  $\tan \delta = f(t^0)$ , quan hệ  $E_{đi} = f(t^0)$  hay các quan hệ khác với nhiệt độ. Khi thí nghiệm về tác động của nhiệt độ tới các tính chất cách điện của vật liệu cần phải gắn liền đồng thời với tác động của độ ẩm không khí (điều kiện nhiệt đới) và tác động của điện trường, khi đó mới đạt kết quả chính xác và sát với điều kiện thực tế vận hành.

### 6.3.2. Tính chịu băng giá

Ở các nước có băng tuyết, thiết bị thường làm việc ở ngoài trời và phải chịu tác động của nhiệt độ thấp, do vậy cần phải chú ý đến khả năng chịu băng giá (chịu lạnh) của vật liệu. Tính chịu băng giá hay độ bền chịu lạnh là khả năng của chất cách điện làm việc không bị suy giảm độ tin cậy vận hành ở nhiệt độ thấp (khoảng  $-60$  đến  $-70^0\text{C}$ ).

Thường thường ở nhiệt độ thấp tính chất của vật liệu cách điện của điện môi thường tốt hơn, nhưng nhiều vật liệu dẻo và đàn hồi ở trong điều kiện bình thường sẽ trở nên rất giòn và cứng khi ở nhiệt độ thấp, gây khó khăn cho sự làm việc của chất cách điện.

Thí nghiệm vật liệu cách điện và những thiết bị được chế tạo từ chúng theo tác động của nhiệt độ thấp thường được tiến hành đồng thời với tác động rung cơ học tần số cao. Đối với nước ta có thời tiết nóng ẩm của vùng nhiệt đới nên có thể không quan tâm nhiều đến tính chất chịu băng giá của vật liệu.

### 6.3.3. Độ dẫn nhiệt

Độ dẫn nhiệt có ý nghĩa quan trọng là vì nhiệt toả ra do tổn thất công suất trong dây dẫn bọc cách điện trong lõi thép của máy biến áp và tổn hao điện môi trong các chất cách điện được truyền ra môi trường xung quanh qua nhiều lớp vật liệu khác nhau. Độ dẫn nhiệt ảnh hưởng tới độ bền điện khi đánh thủng nhiệt và

ảnh hưởng đến độ bền của vật liệu đối với xung nhiệt. Độ dẫn nhiệt của vật liệu được đặc trưng bởi nhiệt dẫn suất  $\gamma_N$  trong phương trình Furiê:

$$\Delta P_N = \gamma_N \cdot \frac{dT}{dl} \cdot \Delta S \quad (6-9)$$

Trong đó:  $\Delta P_N$  - công suất của dòng nhiệt qua diện tích vuông góc với dòng năng lượng;  $\frac{dT}{dl}$  - gradien nhiệt độ.

So với kim loại thì trị số  $\gamma_N$  của các vật liệu cách điện rất nhỏ. Các vật liệu cách điện xốp có lẫn tạp chất không khí có  $\gamma_N$  nhỏ nhất. Khi tẩm và cả khi làm đặc vật liệu bằng áp lực bên ngoài thì  $\gamma_N$  tăng lên. Trong bảng 6.2 đưa ra trị số nhiệt dẫn suất của một số điện môi.

**Bảng 6.2. Nhiệt dẫn suất của một số điện môi**

Tên gọi vật liệu	$\gamma_N$ ( w/cm. độ )
Không khí (trong khe hở nhỏ )	0,00025
Nhựa đường	0,0007
Giấy	0,0010
Vải sơn	0,0013
Hêtinắc	0,0035
Nước	0,0058
Thạch anh nóng chảy	0,0125
Sứ	0,016
Steatit	0,022
Thạch anh kết tinh	0,125
Ôxít nhôm	0,300

#### 6.3.4. Sự giãn nở nhiệt

Sự dẫn nở nhiệt của điện môi cũng như của các vật liệu khác được đánh giá bằng hệ số dẫn nở chiều dài theo nhiệt độ.

$$TK_L = \alpha_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} \quad (\text{độ}^{-1}) \quad (6-10)$$

Những vật liệu mà hệ số dẫn nở dài nhỏ thường có độ bền chịu nóng cao hơn và ngược lại. Để xác định  $\alpha_L$  theo đồ thị đường cong quan hệ  $L = f(t^0)$ , có thể dùng phương pháp tương tự với phương pháp xác định  $TK_\epsilon$  ở trong chương III.

Trong bảng 6.3 đưa ra hệ số giãn nở nhiệt của một số điện môi thường dùng.

**Bảng 6.3. Hệ số dẫn nở dài theo nhiệt độ của một số điện môi**

Tên vật liệu	$\alpha_L \cdot 10^6$ (độ <sup>-1</sup> )	Ghi chú
Thuỷ tinh thạch anh	0,55	Chất vô cơ
Sứ cao tần	4,5	
Steatit	7	
Phênolfómaldêlit và các chất dẻo có độn khác	25 - 70	Chất hữu cơ
Tấm chất dẻo clorua polivinyli	70	
Polistirol	60 - 80	
Poliêtilen	100	

Các điện môi vô cơ có hệ số dẫn nở dài bé nên các chi tiết chế tạo từ vật liệu vô cơ có kích thước ổn định khi nhiệt độ thay đổi. Ngược lại ở các điện môi hữu cơ hệ số dẫn nở dài có trị số lớn gấp hàng trăm lần so với điện môi vô cơ. Khi sử dụng trong điều kiện nhiệt độ thay đổi cần chú ý đến tính chất này của vật liệu để tránh các trường hợp xấu xảy ra.

## 6.4. TÍNH CHẤT HOÁ HỌC CỦA ĐIỆN MÔI VÀ TÍNH NĂNG CỦA NÓ DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA PHÁT XẠ CÓ NĂNG LƯỢNG CAO

### 6.4.1. Tính chất hoá học của điện môi

Chúng ta phải nghiên cứu tính chất hoá học của điện môi vì hai nguyên nhân:

*a) Độ tin cậy của vật liệu* phải được bảo đảm khi làm việc lâu dài nghĩa là không bị phân huỷ để giải thoát ra các sản phẩm phụ và không ăn mòn kim loại tiếp xúc với nó, không phản ứng với các chất khác (ví dụ: khí, nước, axit, kiềm, dung dịch muối, ...). Độ bền đối với tác động của các chất này ở các điện môi khác nhau thì rất khác nhau.

*b) Khi sản xuất các chi tiết* có thể gia công vật liệu bằng những phương pháp hoá công khác nhau - dính được, hoà tan trong dung dịch tạo thành sơn.

Độ hoà tan của vật liệu rắn có thể đánh giá bằng khối lượng vật liệu chuyển sang dung dịch trong một đơn vị thời gian từ một đơn vị diện tích tiếp xúc giữa vật liệu với dung môi. Ngoài ra người ta còn hay đánh giá độ hoà tan theo khối lượng lớn nhất của chất có thể hoà tan trong dung dịch (tức là theo nồng độ của dung dịch bão hoà).

Dễ hoà tan nhất là các chất có bản chất hoá học gần với dung môi và chứa các nhóm nguyên tử giống nhau trong phân tử. Các chất lưỡng cực dễ hoà tan hơn trong chất lỏng lưỡng cực, các chất trung tính - trong chất lỏng trung tính. Ví dụ,

hydro cacbon không cực tính hay cực tính yếu (parafin, cao su) dễ hoà tan trong hydro cacbon lỏng như: xăng, nhựa lỏng cực chứa nhóm hydroxít (fênolformaldêhít và các nhựa khác) hoà tan dễ dàng trong rượu và các dung môi lỏng cực khác.

Khi tăng mức trùng hợp thì độ hoà tan giảm. Các chất cao phân tử có cấu trúc mạch thẳng dễ hoà tan hơn so với cấu trúc không gian. Khi tăng nhiệt độ thì độ hoà tan tăng lên.

#### 6.4.2. Tác động của bức xạ năng lượng cao

Trong thực tế kỹ thuật các thiết bị điện có thể làm việc lâu dài hay ngắn hạn trong môi trường có bức xạ hạt hoặc sóng năng lượng cao. Khi đó điều quan trọng là cần phải biết mức độ bền vững của vật liệu dưới tác động của bức xạ, mức độ duy trì tính chất điện và cơ của chúng - tức là độ bền bức xạ.

Bức xạ năng lượng cao có thể sử dụng trong quá trình công nghệ để tạo ra vật liệu mới với những tính chất đặc biệt tốt, có thể tạo ra những vật liệu mới có những tính chất mà trước đây không thể nào có được. Trong một số trường hợp còn yêu cầu vật liệu thực hiện chức năng màng hút bức xạ bên cạnh việc sử dụng các tính chất điện và cơ chủ yếu của chúng.

Các hạt neutron nhanh và chậm, các mảnh hạt nhân, hạt  $\alpha$  và tia  $\beta$  - các điện tử có tốc độ khác nhau, thuộc loại bức xạ hạt. Còn tia  $\gamma$ , tia phóng xạ ronghen cứng và mềm thuộc loại bức xạ sóng.

Khi gặp bề mặt vật liệu, năng lượng phóng xạ giảm theo mức độ thâm vào chiều sâu theo định luật:

$$P_x = P_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (6-11)$$

Trong đó;  $P_0$  - công suất của liều lượng vật lý trong không khí ở bề mặt vật liệu;  $x$  - chiều sâu;  $\mu$  - hệ số hiệu quả làm yếu tia phóng xạ trong vật liệu.

Hệ số hiệu quả làm yếu đối với các chất đơn giản:

$$\mu \approx K \cdot \lambda^3 \cdot Z^3 \cdot \rho \quad (6-12)$$

Trong đó:  $\lambda$  - chiều dài sóng phát xạ;  $Z$  - số thứ tự của nguyên tố trong bảng tuần hoàn Mendêlêép;  $\rho$  - nồng độ;  $K$  - hệ số tỷ lệ.

Như vậy, sự hấp thụ phóng xạ trong vật liệu từ biểu thức (6-12) phụ thuộc vào bản chất vật liệu và chất lượng của chính phóng xạ. Sự khuếch tán năng lượng phóng xạ xảy ra chủ yếu do ion hoá (hiệu ứng quang bên trong và kích thích các nguyên tử, hiệu ứng Comtôn và khi năng lượng rất lớn do sự biến đổi hạt nhân).

Một phần năng lượng tiêu tốn để tách nguyên tử hoặc ion ở giữa các nút, khi đó xuất hiện "lỗ khuyết" và các trung tâm khuyết tật.

Sự ion hoá có thể là nhiều cấp tạo nên nguyên tử thứ cấp và thậm chí nguyên tử tam cấp. Quá trình tương tự sẽ diễn ra nếu bắn phá các hạt tích điện vào vật chất.

Tác động của bức xạ có thể dẫn đến hàng loạt biến đổi phân tử và phản ứng hoá học. Quá trình ion hoá gây nên dòng điện tử tức thời, phá huỷ hoặc chuyển dịch các mối liên kết hoá học và tạo nên các gốc tự do. Điện tử được tích lũy trong các chỗ khuyết tật. Các phản ứng hoá học khác nhau được kích thích. Đặc biệt nếu là chất trùng hợp hữu cơ thì sẽ có khí thoát ra và xảy ra quá trình hình thành và mất đi các mối liên kết kép, trùng hợp hoá, tạo thành mạch ngang, lưu hoá v.v... Khi bức xạ lâu dài hoặc với cường độ rất mạnh, cuối cùng các chất bị bức xạ đều bị phân huỷ.

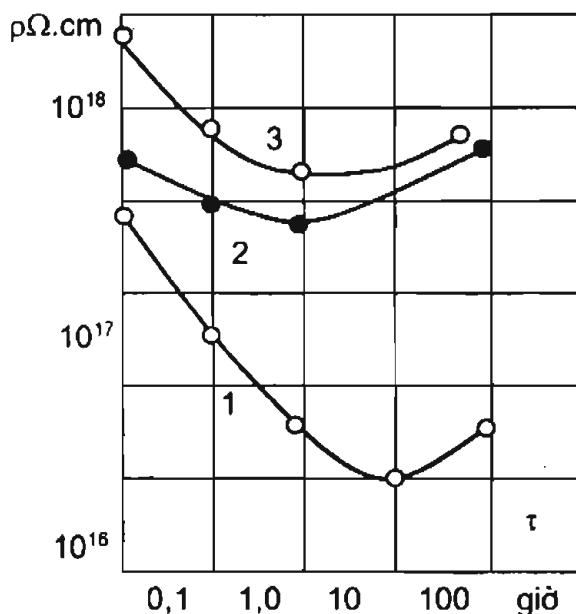
**Các vật liệu bền vững đối với bức xạ phải có hai thuộc tính:**

- Khả năng hấp thụ năng lượng mà không bị ion hoá lớn.
- Khả năng tạo mối liên kết kép với mức độ lớn hơn sự phá huỷ liên kết đó.

Dưới tác dụng của bức xạ chất trùng hợp có thể chuyển từ trạng thái này sang trạng thái cấu trúc khác.

Ảnh hưởng của bức xạ đối với điện môi vô cơ như thạch anh, mica, ôxít nhôm, xilicôn, ôxít berili và vật liệu mica có liên kết dạng thuỷ tinh ít hơn so với các chất hữu cơ. Khi xét các quá trình gây nên bởi bức xạ cho ta thấy tất cả các tính chất điện, hoá, lý, cơ đều có thể bị biến đổi so với khi chưa bị bức xạ trong các vật liệu cách điện. Điều này xảy ra đối với các vật liệu khác nhau ở mức độ khác nhau. Ví dụ: trên hình 6-6 nêu ra các đường cong biến đổi điện trở suất khối của những điện môi hữu cơ tốt nhất theo thời gian tác động của phóng xạ  $\gamma$ .

Theo hình vẽ ta thấy điện trở suất của polietilen giảm nhiều, trong khi đó polistirol và politetrafloêtilen có điện trở suất biến đổi không đáng kể. Khi liều lượng bức xạ lớn, ở tất cả các vật liệu đều có xu hướng tăng điện trở suất. Mức độ biến đổi điện trở suất khối của chất trùng hợp khi bức xạ còn phụ thuộc vào nhiệt



**Hình 6-6. Điện trở suất khối của các chất (đo ở nhiệt độ 20°C) theo thời gian tác động phóng xạ  $\gamma$  với cường độ 200R/h.**

1- polietilen; 2- politetrafloêtilen; 3- polistirol.

độ của điện môi, do vậy khi sử dụng vật liệu cần phải thí nghiệm để có số liệu chính xác.

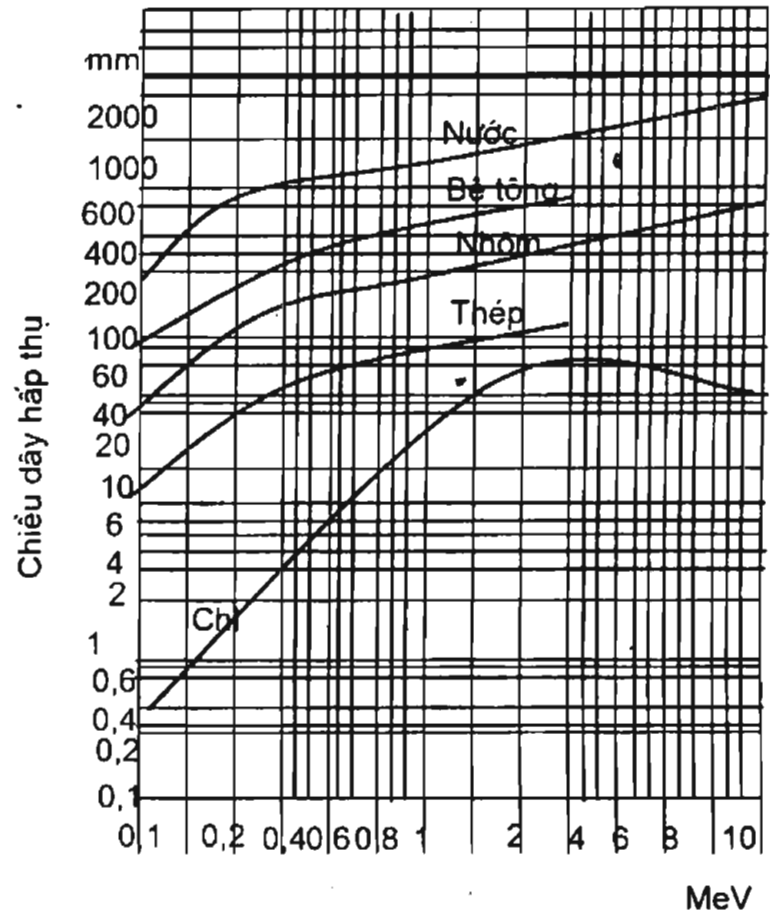
Độ bền điện của điện môi dưới tác động của bức xạ có thể tăng hoặc giảm tùy thuộc vào các quá trình diễn ra trong vật liệu. Hiện nay việc nghiên cứu độ bền điện của điện môi đối với bức xạ hạt và sóng có năng lượng cao còn chưa nhiều và tính năng của những vật liệu nghiên cứu chưa rõ ràng, đòi hỏi phải thí nghiệm và kiểm tra cho chính xác thêm.

Hiện nay đang tiến hành việc ứng dụng phóng xạ trong quá trình sản xuất điện môi. Khi bức xạ poliêtilen bằng liều lượng khoảng 5MR có thể nâng độ bền chịu nóng của nó từ  $105^{\circ}\text{C}$  lên đến  $200^{\circ}\text{C}$ . Mạch phân tử của poliêtilen đã bị bức xạ dài hơn phân tử bình thường 4-5 lần. Do đó độ bền cơ học của vật liệu tăng lên, trong khi đó tính chất điện của nó không bị suy giảm vì tgđ vẫn nhỏ hơn  $5.10^{-4}$ .

Có thể đặc trưng khả năng bảo vệ của các vật liệu bằng lớp suy giảm mười lần, tức là chiều dày lớp vật liệu mà sau khi đi qua nó cường độ phóng xạ giảm 10 lần. Đặc tính này giúp cho việc tính toán bảo vệ vật liệu cách điện dễ dàng hơn khi thiết bị làm việc trong môi trường phóng xạ.

Trên hình 6-7 cho các đường cong quan hệ chiều dày của lớp suy giảm mười lần đối với nước và bê ton bari để so sánh với một số kim loại theo năng lượng của lượng tử phóng xạ.

Từ hình vẽ ta thấy sự hấp thụ tăng theo mật độ của vật liệu và phụ thuộc vào năng lượng lượng tử.



Hình 6-7. Sự biến đổi chiều dày của lớp suy giảm, 10 lần theo năng lượng của lượng tử phóng xạ của các vật liệu khác nhau.