

038  
001

# 无线电材料与器件

西安交通大学

## TN04 緒 論

## 3.1

## 一、无线电元件在无线电设备及无线电发展中的地位

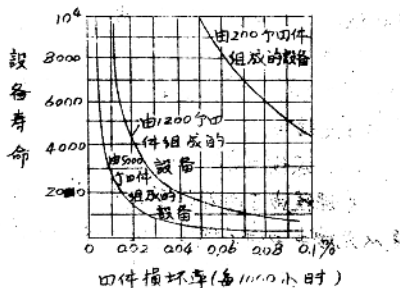
随着各种科学技术的迅速发展,无线电设备已在各种不同的领域中并得到了广泛的应用。这:显示了通讯设备的范围已进入了(例如有的是运动的,也有固定的,有的潮湿条件下,也有用在高温度的条件下,高温或低温等)由于应用范围极广,再加上应用的条件有很大差异,因此当然对无线电的设备应用条件也越来越苛刻,也必须相应地符合以上的一些条件才能在这样的条件下发挥其应有的作用。

一般我们说的设备众所周知是指有独立运用意义的组合体如一般经常应用的接收机, Q表等,它们是一组组合体,我们用它们来可完成信号的接收,线圈 Q 值和 L 的测量等,当然至于所以称为组合体,也就是既它们不是单独一个另件所组成,而是由许多另件和各种材料所组成,这些组成可以包括绝热材料;电阻,电容量,磁性材料,电感线圈,变压器,除这些外还有电子管或晶体管等。这些元件和材料相互结合就完成了一个整机,就能完成我们希望完成的动作。

由于整机是由各种材料与元件所组成,由此对于整机提出的各种要求,实际上也是对制成整机的各种材料与元件提出的要求,不仅如此,因一般整机是由许多元件组成,虽然它的损坏率要比元件大得多,为了降低整机的损坏率必须降

低元件的损坏率,所以对于元件的要求更高才能满足整机的要求。

另外整机的不少特性在很大程度上决定于所采用的材料与元件和上叙的整机工作条件,工作电压,可靠性,灵敏度,频率稳定性等。故要提高整机的性能



必须首先提高无线电设备的基础—材料与元件才有可能获得满意的结果。

改进组成整机的元件一般来讲有二个方向。一改进组成元件的材料(绝热材料, 导电材料, 磁性材料等)。二改进元件的结构, 使其使用在不同的条件下更加合理化。

除此之外目前对于无线电小型化的问题提出了新的要求, 那么当然组成整机的元素——元件必须首先小型化, 这种元件的小型化发展的整个过程可分为三个阶段: 小型化, 超小型化, 微小型化。在小型化的发展时最重要是在原来无线电元件的结构的基础上缩小体积, 这使可达  $300 \text{ 件}/1000 \text{ cm}^3$ , 而后由于印制电路及晶体管采用组件形式使发展超小型化的阶段  $2000 \text{ 件}/1000 \text{ cm}^3$ , 在最近由于薄膜技术的应用使元件的结构发生了根本改革, 而发展到微小型化。 $10^5 \text{ 件}/1000 \text{ cm}^3$ 。

所以目前要使无线电技术得到迅速发展, 对无线电材料与元件部分必须特别加以重视。事实工目前一些先进国家中对于无线电工业的基础—材料与元件给予很大的重视, 而且也发现了一些新的材料与元件, 对无线电技术的发展起着相当大的作用。

解放以前, 由于我国是一个半封建半殖民地的国家, 这也就决定了我国的无线电工业不可能得到建立, 当然更谈不上发展。即使仅有一些无线电修配工场, 也是技术水平低, 产品质量甚差。而且使用的材料与元件几乎全都是从国外进口的, 而这些工场只不过是作装配工作。那时根本没有我国自己的无线电材料与元件工业。

只有解放后, 在党的正确领导下, 根本改变了我国在无线电工业的一穷二白的面貌, 迅速地建立了我国自己的无线电材料与元件工业, 使整个无线电工业有了很大地发展。

## 二、课程内容提要

本课程由于内容较多, 而学时数有限, 所以有关内容方面的安排是以无线电元件为纲适当地讲述一些常用无线电材料, 在为讲这些内

容包含必要的有关的基本理论知识,以便能进一步了解材料与元件的物理本质打下基础。

内容共分成六篇:一、电介质基本理论;二、绝缘材料;三、电阻元件;四、磁性的基本理论;五、磁性材料;六、磁性元件。



# 第一篇 电介质的基本理论

## 概 說

一切物质从电的角度来看可以分成导体、半导体和绝缘体，而在电工技术上常有时用电阻率的概念来粗略划分这三者之间的差别：

一. 导体  $\rho = 10^{-6} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$

二. 半导体  $\rho = 10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$

三. 绝缘体  $\rho = 10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$  以上

但也可用物质的能带理论来分，由能带理论可知物质中电子可能占有空带和满带，但是不能占有禁区。

对金属导体来讲满带与空带相交或相毗连，半导体是在这二者之间相隔不大的一个禁区，大约几电子伏，绝缘体在这二者之间具有较宽的禁区约 5~10 电子伏以上，如各 1-1 所示。

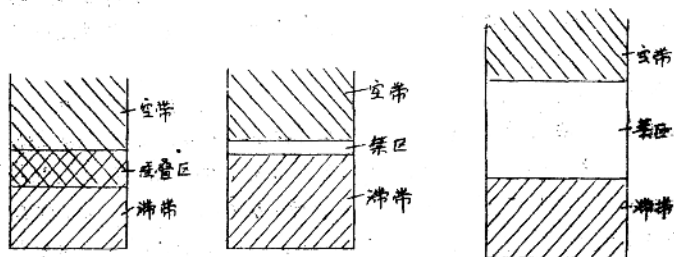


图 1-1.1

但不受用什么方法来分，不可能把这三者之间绝对分开，因为在不同的条件下物质可互相转变，如金属在常温下是导体，但当金属变成金属蒸汽时就成为半导体或绝缘体，又如陶瓷在常温下是绝缘体，而在非常高的温度下是一种半导体。所以在导体、半导体与绝缘体之间并无严格的界线存在。

而本篇主要讨论一些电介质在外电场作用下的一些宏观现象与微

观本质之间的联系。将讨论介质的四个基本参数。

一、介质的介电系数  $\epsilon = \frac{C}{C_0}$ 。  $C_0$  — 真空中的电容， $C$  为放介质后的电容。

二、介质的电导率  $\gamma$   $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

三、介质的损耗  $\tan \delta = \frac{W_r}{W_c}$ 。  $W_r$  — 有功功率， $W_c$  — 无功功率。

四、介质的击穿场强  $E_{\text{exp}} \text{ kV/nm}$

介质这四个参数之间并不是没有联系的，他们是相互影响的，这主要是通过物质的内在联系。

## 第一章 电介质的分子结构

众所周知物质的分子是由若干种元素的原子组成，但这些原子之间的相互结合时可以有各种不同的方法；而对于介质的分子来说一般有三种结合形式。

### (一) 离子键结合

其是发生在金属元素的原子与非金属元素之间的作用，而相互结合成稳定状态，由于相互作用时金属元素成为正离子而非金属元素成为负离子，而这异性离子相互依靠这种静电引力而结合在一起，但在这一离子相互作用除此力外，当二者间的距离达到一定时就同时要产生推力，当这二力达到平衡后就相对平衡

由此可看：

一、离子键的键能很大（几百千卡/克分子）。

二、离子键没有方向性。

三、只要配位数可在每一个离子周围可以排列到不同数目的离子。

### (二) 共价键结合

非金属原子相互结合的键一般是共价键，其是利用使结合原子外

石的共用价电子来相互结合如  $O_2$ ,  $Cl_2$  等；就是如此，而采用这种能结合在一起可用量子力学得到很好地解释。

若组成的分子是由二个原子（指双原子组成的分子）对价电子的吸引能力是相同的，则其构成的分子的外层价电子的电子云的分布是对称的如  $O_2$ ,  $Cl_2$  等；即是如此，∴这种情况形成中性分子若组成的二原子对价电子的作用力不同，则电子的分布就要偏向于对电子吸引力比较大的原子，由于电子云的不对称，因此就引起一偶极矩（即正负电荷的中心不在重合若距离为  $l$ ，正、负电荷各为  $q$  则  $m = q \cdot l$ ）这样就形成极性共价键例如  $H-O-O-C$

由于  $H$  对价电子的吸引力大于  $C$  的作用，因此是极性共价键，但极性共价键所组合而成的分子不一定是极性分子。

### (三) 剩余键

这键原子结合成为分子后剩余的对外电场所引起的，最典型的的就是极性分子之间的相互作用，只是以上所叙述的一些主价键的外的分子间的作用力都称为剩余键，此种键的结合能较低，

### (四) 氢键

在主价键和剩余键之间的化学键，因为氢原子电子壳层上只有一

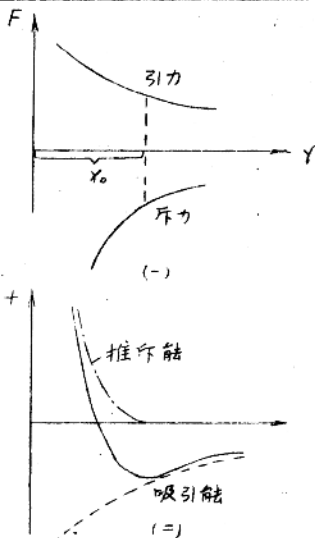


图 1.1-2

(-) 双原子分子的力曲线

(=) 双原子分子的势能曲线



个电子，当与其它原子组成共价键后，则带正电荷的氢原子就可  
能直接与外界发生作用，这样的电荷作用称为氢键。如水能依靠氢键  
相互结合缔合成  $nH_2O$ ，纤维素，也都有氢键的作用。

## 第二章 介质的电特性

### §1. 介质的极化

#### §1-1. 介质的极化现象

在二电极之间若不改变其距离与面积的情况下, 用介质来代替中间的空气, 则可以看到其电容将会增大, 这一现象的发生是由于介质发生极化所致。

在电极间无介质时 (即真空或空气), 二极之间所加的电压为  $U$  则在极板上的电荷  $Q_0 = C_0 U$   
 $C_0$ ——真空或空气为介质时的电容。

若  $U$  不变中间用其它介质代替真空, 那么可知由于介质极化使极板上的一部分自由电荷变成束缚电荷  $Q_n$  因为外界  $U$  不变很显然自由  $Q_0$  也不变, 故极板上的电荷为  $Q = Q_0 + Q_n = \epsilon Q_0$ 。

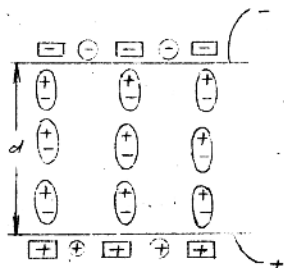
$$\text{或 } \epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_n}{Q_0} = 1 + \frac{Q_n}{Q_0} = \frac{C}{C_0}$$

由此可知介质的  $\epsilon > 1$ , 只有真空才  $\epsilon = 1$ 。

介质极化强弱的表示 (极化强度)  $P$ : 单位体积中总偶极矩的数目。 $\therefore p = n \bar{m}$   $n$ ——单位体积中的分子数,  $\bar{m}$ ——一分子所产生的平均偶极矩。 $\therefore \bar{m} \propto E$ ,  $E$  是分子所在点的电场强度,  $\therefore \bar{m} = \alpha E$   
 $\alpha$ ——极化率。

$\alpha$  与  $\epsilon$  之间的关系可用克劳修斯——莫索蒂方程表示

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{4\pi}{3} n \alpha$$



$\square \square$  分别为束缚负、正电荷

$\ominus, \oplus$  分别为自由负、正电荷

$\oplus \ominus$  为偶极矩

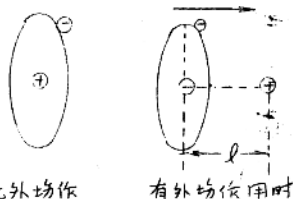
图 2.1-1

## §1-2 几种介质极化的类型

前叙介质分子可分成极性与非极性分子：众所周知，各种不同的物质具有各种不同的结构，基于以上的原因，故在介质中存在着不同的极化形式：

## (一) 电子式极化

各种极化是由于束缚在原子或离子周围的电子在外电场的作用下发生偏移所致。例如最简单的氦原子，假定外电子环绕运动是圆周运动，则有外场作用时的情况如图 2.1-2。



无外场作用时情况

有外场作用时

图 2.1-2

这种极化存在于任何物质只要其处在外部电场的作用下都有。故是普遍存在的。其极化所需的时间也极短约需  $10^{-15}$

$\sim 10^{-14}$  秒，在任何无线电频

率下均会发生。通过计算可知  $\alpha_e$  (电子式极化系数)  $\propto r^3$  (原子半径)，对氦原子通过严格计算可得  $\alpha_{He} = \frac{9}{2} r^3$ 。  $\alpha_e$  与材料所处的温度无关，由于电子云在外场的作用下发生偏移所受之力是弹性力，故在极化过程中并不会产生损耗能量。

## (二) 离子式位移极化

这种极化形式发生在离子晶体中在外电场的作用下，正负离子发生弹性位移所引起，其情况如图 2.1-3。

由于这种极化是离子位移，因此这种极化所需的时间要比电子式极化长约  $10^{-13}$



无外场时

有外场时

图 2.1-3

$\sim 10^{-14}$  秒，并有极微量的能量损耗。通过计算可知  $\alpha_i$  (离子式位移极化系数)  $= \frac{2q^2}{K}$  其中  $q$  为离子电荷， $K$  是离子间的弹性系数。

这种极化的  $P$  是随着  $t^{\circ}\text{C}$  的上升会发生二种作用。(一) 当  $t^{\circ}\text{C}$  增高时, 使正负离子间的作用减弱, 因此在同样外  $E$  的情况下, 极化的程度就比较大, 所以要使  $P$  随着  $t^{\circ}\text{C}$  增高而升高。(二) 当  $t^{\circ}\text{C}$  增高时由于体积的膨胀使单位体积中的分子数  $n$  下降, 故要使  $P$  下降, 但由于前者的作用大于后者, 总的结果  $P$  随着  $t^{\circ}\text{C}$  的增加而增加,  $P$  的增加即意味着  $\epsilon$  的增加。

### (三). 偶极式极化

极性分子在外电场的作用下使极性分子的偶极矩趋向于外电场的方向所引起的。其各 2.1-4 所示



各 2.1-4

我们知道要使极性分子的偶极矩由不在电场方向而要使大致与电场方向一致, 那么必须要发生转动, 这种转动所需的时间显然是要比上几种极化来得长 ( $10^{-2} \sim 10^{-10}$ ) 以至于使介质的  $P$  或  $\epsilon$  在无线电频率下发生变化, 并且极化强度  $P$  也随着  $t^{\circ}\text{C}$  的变化发生很大的变化,  $\epsilon$  随  $f$  及  $t^{\circ}\text{C}$  的变化曲线如各 2.1-5。

由于极性分子之间的作用, 因此在极性分子发生转动过程中就要消耗较大的能量。

$$\text{其极化系数通过计算得 } \alpha_p = \frac{m^2}{3KT}$$

$K$  —— 波尔兹曼常数,  $m$  —— 偶极矩。

### (四). 自列式极化

存在: 居里温度以下 (对于一个居里温度) 或在二居里点之间 (对于有二个居里温度) 的强性介质中, 因为在这温度范围内, 这种介

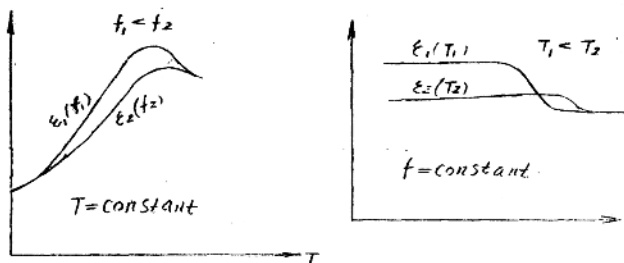


图 2.1-5

质中存在电畴。

这种每一个电畴具有一个偶极矩，但在整块材料中，往往具有很多的电畴，由于电畴在无外场的情况下是杂乱的，所以整块材料并不呈现有偶极矩。但当外场的作用下使各电畴的偶极矩大致趋向电场方向如左图 2.1-6。

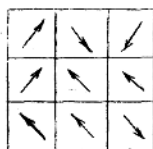
此极化过程要消耗大量的能量，且极化时间很长，当外界频率在  $10^8$  赫后就会使其极化能力减弱，这种极化产生的  $\epsilon$  与

$t^\circ\text{C}$  及  $E$  具有极大的关系，并具有电滞回线（图 2.1-7）。

这种强性介质的性能相似于铁磁材料，但从物理本质来讲是完全不相同的。

#### (五) 热离子松弛极化

某些结构不紧的无机离子晶体中，



无外场作用



在外场作用下

图 2.1-6

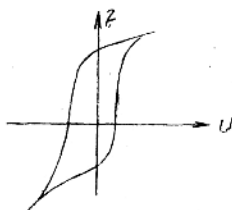


图 2.1-7 电滞回线

存在这种极化形式，在这些物质中联系比较弱的离子能在热运动的帮助下产生位移，但在无外场的情况下这种位移是杂乱的，故无极化现象，但在外电场的作用下能使晶体位垒形成离子越过晶体位垒的数目在一开始时间电场方向的位移数

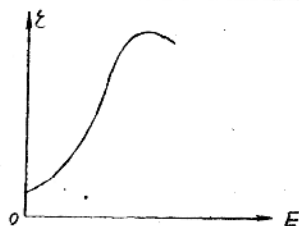


图 2.1-8  $P$  与  $E$  的关系

大于反方向的位移数（此地是指正离子方向，负离子方向相反），这样就使位垒两边做成一偶极矩（如图 2.1-9、2.1-10）

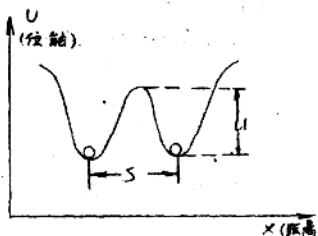


图 2.1-9 无外场时的晶体势垒分布

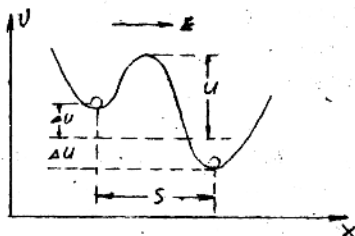


图 2.1-10 有外场时的晶体势垒分布

这种极化所需的时间很长，并也要损耗很大的能量， $x^\circ C$  对它有很大的影响。统计规律  $\alpha_{up} = \frac{q^2 \delta^2}{12KT}$

$q$  —— 离子电荷数， $K$  —— 波尔兹曼常数， $\delta$  —— 离子在两个可能位置间的距离。

这是在介质中的几种主要极化形式，但必须要指出在实际的介质中是有可能同时存在几种介质极化，但不受什么介电材料电子式极化总是存在的。

若有一个介质同时具有几种极化形式，利用下列的等效电路，可把

各种极化效应很好地区分。

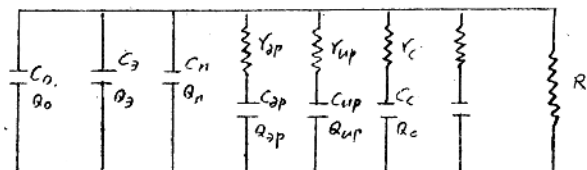


图 2.1-11 同时具有几种极化的电介质等效电路

$C_0, R_0$ —真空,  $C_3, R_3$ —电子式极化,  $C_n, R_n$ —离子式位移极化,  $C_{dp}, R_{dp}$ —偶极式极化,  $C_{up}, R_{up}$ —离子式极化式极化,  $C_c, R_c$ —自发式极化,  $R$ —介质的漏导。

其中  $Y_{dp}, Y_{up}, Y_c$  表示这几种极化相应的损耗等效电路,  $R$  为漏导电阻。

§1-3. 影响介质介电系数因素,

一. 频率对  $\epsilon$  影响

因为各种极化形式所需的极化时间不同, 因此各种极化是在不同频率下出现。

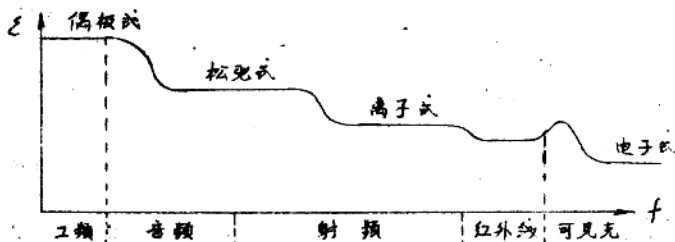


图 2.1-12  $\epsilon$  与  $f$  的关系

二. 温度  $t^\circ\text{C}$  对  $\epsilon$  影响

(a) 气体克—莫方程可得 ( $\because \epsilon = 1$ )  $\epsilon_g = 1 + 4\pi n \alpha_g$

$\epsilon_{\text{极}} = 1 + 4\pi n(\alpha_2 + \frac{n_2^2}{3KT})$  中性气体介质因为  $t^\circ\text{C}$  升高时,  $n$

下降, 故使  $\epsilon \downarrow$

极性气体介质  $t^\circ\text{C}$  对  $\epsilon$  有二个作用, 一  $t^\circ\text{C}$  升高时使  $n$  下降, 故使  $\epsilon$  下降, 二  $t^\circ\text{C}$  升高时使  $\frac{n_2^2}{3KT}$  项增加,  $\epsilon$  要增加, 所以极性气体介

质随这二因素那一个来决定。

但一般气体所产生的  $TKE$  (介电系数的温度系数) 是很小的。

### (b) 液体电介质

中性液体的情况与中性气体可同样讨论, 不再赘叙。

对于极性液体  $\epsilon = 2\pi n \frac{m(\epsilon_\infty + 2)^2}{9KT}$   $\therefore$  可得  $TKE = -\frac{m(\epsilon_\infty + 2)}{2KT} = -\frac{1}{T}$

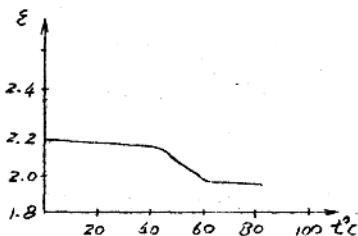
### (c) 固体电介质

1. 非极性或仅有电子或极化的物质。

这种物质的  $\epsilon$  是随着  $t^\circ\text{C}$  的升高而下降 (由于体膨胀)  $\therefore TKE < 0$   
例如石蜡 (参 2-1-13)。

2. 结晶离子性的物质

这类物质的  $TKE > 0$  并且变化的范围不大 (除强极性介质外) 例如  $Al_2O_3$   $TKE = +100 \times 10^{-6}$  而对于强极性介质如钛酸钙  $TKE = +1500 \times 10^{-6}$ 。



| 材料名称 | $TKE$ |
|------|-------|
|      |       |
|      |       |
|      |       |
|      |       |

参 2-1-13 石蜡的  $\epsilon$  与  $t^\circ\text{C}$  关系

3. 非结晶离子性介质

由于这种介质中具有热离子松弛极化, 而这种极化是随着  $t^\circ\text{C}$



的升高而加强, 所以其  $\text{TK}\varepsilon > 0$ , 例如一般的玻璃就是属于此种类型。

4. 极性分子组成的固态电介质的极化理论没有很严格地建立起来, 此类物质的  $\varepsilon$  受  $t^\circ\text{C}$  的影响甚大, 属于这类物质的由有极分子组成的晶体 (例如氧化石蜡、葡萄糖等), 无定形体 (如虫胶、纤维素等)。

5. 强性电介质。前已提及这种自发式极化的  $\text{TK}\varepsilon$  甚大, 所以具有这种极化机理的强性电介质当然也必如此。

### (三). 压力影响

对固体或液体的可压缩性极小, 而压力变化对于气体介质的  $\varepsilon$  有一定的变化, 因为压力增加时,  $n$  增加所以  $\varepsilon$  就随其增加。

### (四). 温度影响

当一般电绝缘材料中吸收水分后就会使  $\varepsilon$  增加, 这主要是由于水的介电系数  $\varepsilon = 81$ , 而一般电绝缘材料的  $\varepsilon < 81$  所致。

### § 1-4. $\varepsilon$ 在工程应用上的意义

$\varepsilon$  是电绝缘材料中的很主要参数之一, 尤其使用在比较高的频率下更要考虑这一因素的影响。

(1) 在把电绝缘材料作为电容量介质时希望其  $\varepsilon$  尽可能大, 而在作为装置利用的材料希望  $\varepsilon$  尽可能小, 而  $\text{TK}\varepsilon$  都要求愈小愈好。

(2)  $\varepsilon$  值对于复合材料的分配作用

假定在复合介质上 (二种不同材料, 相同厚度) 加一电压,

这电压加上一开始可知由于  $\varepsilon_1$  及  $\varepsilon_2$  组成的二个电容  $C_1$  及  $C_2$  上的电荷必相等, 所以此时  $C_1 U_1 = C_2 U_2 = Q$ 。

显然可得  $\frac{E_1}{\varepsilon_2} = \frac{E_2}{\varepsilon_1}$ 。所以在油中若含有气体则使  $E_{np}$  (去

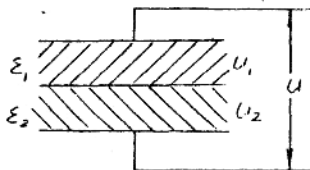


图 2-1-14