

4.4 Dielétricos

O fabricante de capacitores precisa colocar as placas do capacitor muito próximas para fabricar um capacitor com grande capacitância. Mas surge um problema: como se pode evitar que uma placa encoste na outra com alguma vibração? Bem fácil; coloque-se um isolante sólido entre as placas. Mas a colocação de um isolante entre as placas modifica as características do capacitor de forma interessante.

Façamos uma experiência. Tenho aqui um capacitor de placas paralelas. Neste caso as placas não têm uma distância pequena porque eu quero poder colocar um isolante entre as placas e tirá-lo depois e tudo de forma tal que os objetos fiquem bem visíveis até para um aluno sentado na última fileira de bancadas. As placas do capacitor são duas formas de pizza e uma destas placas está montada em cima de um eletroscópio.

O eletroscópio é um instrumento que pode indicar presença de campo elétrico de forma qualitativa. Aqui ele pode ser considerado um voltímetro qualitativo. Este instrumento consiste de um palito condutor móvel que se apoia na beirada de um furo numa plataforma horizontal condutora por meio de uma lâmina afiada. A plataforma é presa num parafuso vertical comprido que liga este instrumento à placa do capacitor. Quando o instrumento está carregado, o palito móvel se inclina para ficar mais longe das cargas do mesmo sinal. A figura 4.4.1 mostra um esquema do eletroscópio, e este instrumento aparece também na fotografia (Fig. 4.4.2).

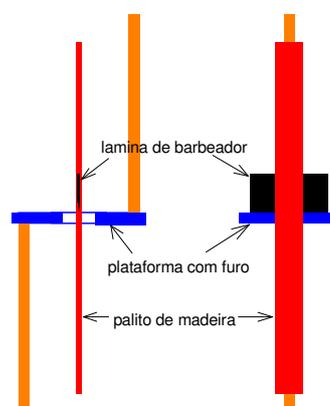


Fig. 4.4.1 Esquema de um eletroscópio. A paleta móvel foi feita de madeira balsa e nesta experiência a madeira pode ser considerada como um condutor. Uma lâmina de barbeador descartável foi enfiada na madeira e o palito se apoia nela.

A segunda placa do capacitor está aterrada, ou seja, eletricamente ligada à mesa, ao chão e às paredes da sala. Carrego este capacitor esfregando um tubo de PVC previamente atritado com algodão na placa que está ligada no eletroscópio. A figura 4.4.2 mostra o equipamento com o capacitor já carregado. A alta diferença de potencial entre as placas está sendo indicada pelo palito inclinado do eletroscópio.

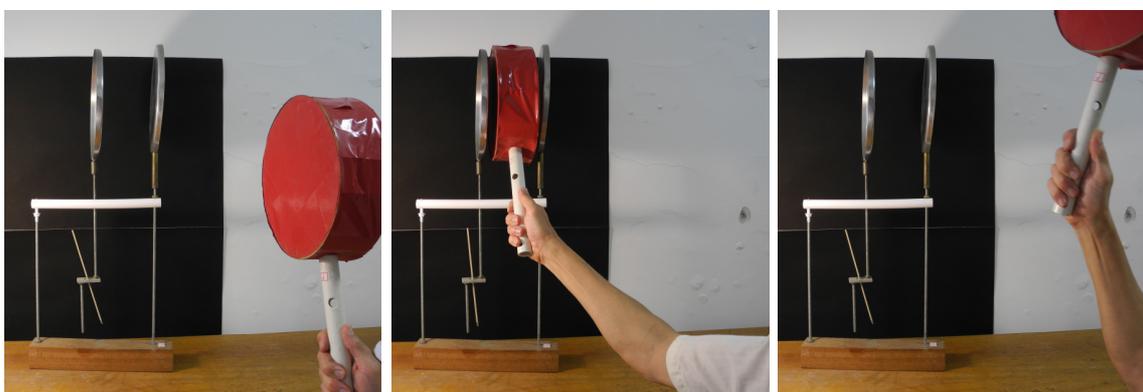


Fig. 4.4.2 Capacitor carregado, o palito do eletroscópio está bem inclinado.

Fig. 4.4.3 Com um dielétrico no capacitor o palito inclina menos com a mesma carga.

Fig. 4.4.4 Tirando o dielétrico a inclinação do palito volta ao valor inicial.

Em seguida introduzo um corpo isolante entre as placas do capacitor. A figura 4.4.3 mostra que isto diminui a inclinação do palito do eletroscópio consideravelmente. Mas eu não descarreguei o capacitor com a introdução do material isolante. Quando agora tiro este corpo fora, a inclinação do palito do eletroscópio volta ao antigo valor como mostrado na figura 4.4.4.

Veremos qual é o significado da introdução do corpo isolante para o valor da capacitância. Lembrem-se da definição de capacitância:

$$C \stackrel{\text{def.}}{=} \frac{q^A}{V^A - V^B} \quad \text{com } q^A = -q^B.$$

A introdução do corpo isolante não pode ter mudado o valor de q^A ; de fato nem toquei nas placas do capacitor. Observamos qualitativamente que o valor da diferença de potencial diminuiu. Então o valor da capacitância aumentou. Isto é uma boa notícia para os fabricantes de capacitores. Além de resolver o problema mecânico de fixar os condutores, a introdução de um isolante entre os condutores aumenta a capacitância do capacitor.

O fato de que a introdução de um dielétrico entre os condutores de um capacitor altera os valores da capacitância sugere naturalmente duas perguntas: como podemos descrever a mudança dos valores de capacitâncias quantitativamente e qual é a explicação destas mudanças?

A primeira pergunta pode ser respondida de forma fenomenológica fazendo experimentos. Podemos inserir um determinado material isolante em diversos capacitores de diferentes geometrias e medir as alterações dos valores das capacitâncias. Naturalmente precisamos saber como um valor de capacitância pode ser medido. Em princípio, uma prescrição de medida sai da própria definição de capacitância. Deve-se carregar o capacitor com um valor de carga conhecida e depois medir a diferença de potencial entre os condutores. Isto soa simples, mas na prática a medida de uma quantidade de carga pode ser um pouco complicada. Numa seção futura, em que trataremos de circuitos com capacitores, conheceremos um método muito simples de medir capacitâncias de forma bem precisa.

Fazendo este tipo de experiência se chega ao seguinte resultado: para uma determinada substância dielétrica, usada sempre na mesma temperatura e preenchendo todo o espaço entre os condutores do capacitor, o quociente da capacitância com dielétrico e sem dielétrico tem sempre o mesmo valor, independente da geometria do capacitor,

$$\frac{C_{\text{com dielétrico}}}{C_{\text{sem dielétrico}}} = \kappa \quad \text{com } \kappa \text{ independente da geometria do capacitor} \quad (4.4.1).$$

Então este quociente é uma propriedade da substância dielétrica, mas que pode depender da temperatura. Chama-se este quociente de *constante dielétrica*.

Este resultado experimental significa que podemos modificar as nossas fórmulas de capacitância simplesmente substituindo o ϵ_0 por um $\epsilon = \kappa\epsilon_0$ e temos a fórmula da capacitância de um capacitor com dielétrico. Por exemplo, no caso do capacitor de placas paralelas temos

$$C = \kappa\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4.4.2),$$

para o capacitor esférico temos

$$C = 4\pi\kappa\epsilon_0 \frac{ab}{b-a} \quad (4.4.3)$$

e para o cilíndrico (do exercício 4.2.2) temos

$$C = \frac{2\pi\kappa\epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (4.4.4).$$

A tabela 4.4.1 mostra alguns valores de constantes dielétricas.

Substância	Constante dielétrica	Rigidez dielétrica [kV/mm]
Vácuo	1	10^{12}
Ar	1,00059	3
Polietileno	2,25	19 - 160
Poliestireno	2,4 - 2,7	19,7
Papel	3,85	16
Dióxido de Silício (amorfo)	3,81	25 - 40
Teflon	2,1	60
Óxido de alumínio Al_2O_3	9,6	710
Silício	11,68	
Germânio	16,6	
Fenolite FR-2 ¹	4,5	29
Metanol	30	
Água	88,0 (0°C), 80,1 (20°C), 55,3 (100°C)	65 - 70
Gelo (0°C - -55°C)	≈ 90 - 150	
Titanato de estrôncio	310	8
Titanato de bário	1200 (20°C) 10.000 (120°C)	
Titanato de cálcio-cobre	> 250.000	

A grande maioria das substâncias comuns isolantes, como os plásticos, tem constantes dielétricas menores que 10. A água chama atenção com um valor muito maior e este depende da temperatura. No fim da tabela há ainda algumas substâncias exóticas com constantes dielétricas gigantes.

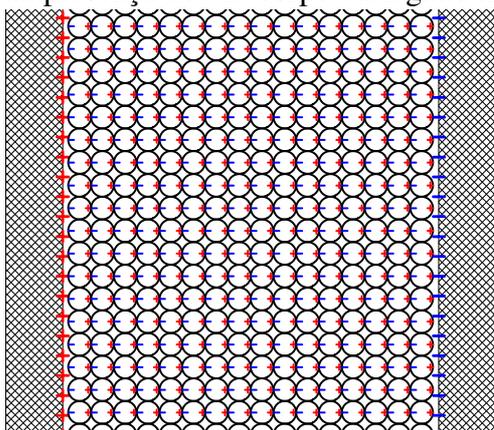
A tabela tem uma terceira coluna que mostra mais uma propriedade relevante dos materiais; a *rigidez dielétrica*. O valor da rigidez dielétrica informa o campo máximo

¹ Material base das placas de circuitos impressos.

que se pode aplicar no material sem ter risco de criar faíscas que possam destruir o material. Campos muito intensos podem arrancar cargas de uma molécula da substância e isto pode dar início a uma faísca. Quando isto acontece dentro de um capacitor, o capacitor é destruído. Então cada capacitor tem uma tensão máxima que é informada pelo fabricante e o engenheiro que projeta um circuito com capacitores deve tomar o cuidado de escolher os capacitores de tal forma que as tensões aplicadas nunca ultrapassem este limite. Para pequenos valores de distância entre os condutores do capacitor, o campo elétrico e a capacitância são ambos inversamente proporcionais a esta distância, qualquer que seja a geometria do capacitor. Consequentemente há a tendência de capacitores de grandes valores de capacitância terem limitações de voltagem mais restritivas. Por exemplo, na experiência do estouro (Fig. 4.1.8 e 4.1.9) usei capacitores de $4700\mu\text{F}$ e este é um valor muito grande. Consequentemente a limitação de voltagem é severa; estes capacitores não devem ser usados acima de 50 V. Como usei 180 V tive que colocar quatro capacitores em série, de tal forma que a tensão em cada capacitor fosse menor do que 50 V. Mais tarde trataremos deste tipo de associações de capacitores.

Incluí na tabela o vácuo, que não é uma substância; é o “nada”. Para o vácuo a constante dielétrica é exatamente 1, por definição. O curioso é que este “nada” também tem uma rigidez dielétrica. Ou seja, o vácuo pode ser destruído por um campo elétrico extremamente forte. Destruir o nada significa criar algo. Isto é um efeito da física moderna que veremos na Física IV. Um campo elétrico extremamente forte pode criar uma partícula junto com sua antipartícula. Vale mencionar que o valor elevado da rigidez dielétrica do vácuo não significa que podemos construir capacitores com limitações de voltagem fantásticamente altas sem uso de um dielétrico. Muito antes do valor do campo chegar aos 10^{12} kV/mm teríamos emissão de elétrons nas superfícies dos condutores e este efeito também iria destruir o capacitor.

Depois desta digressão pela rigidez dielétrica, voltamos às duas perguntas feitas a respeito da mudança de capacitância. A pergunta pela descrição quantitativa dos efeitos dos dielétricos está devidamente respondida. Agora veremos qual mecanismo é responsável pelo aumento da capacitância. Já consideramos as reações de um dielétrico na presença de um corpo carregado na seção 1.2. Mais especificamente a figura 1.2.10



mostra a redistribuição de cargas em pequenas regiões do material. Naquela seção ainda não usamos o conceito de campo elétrico. Agora vamos atribuir a redistribuição das cargas ao campo elétrico. A figura 4.4.5 mostra esta redistribuição das cargas dentro das moléculas de um dielétrico entre as placas de um capacitor carregado.

Fig. 4.4.5 Capacitor carregado com dielétrico visto numa escala microscópica. As bolinhas podem ser moléculas e os sinais - e + indicam um estado de polarização.

Percebemos que o interior do dielétrico continua perfeitamente neutro. Mas a redistribuição das cargas dentro das moléculas resulta numa camada de carga negativa adjacente à superfície positiva do condutor e uma camada de carga positiva adjacente dá superfície negativa do capacitor. Então uma parte da carga na placa do capacitor é compensada ou cancelada pela carga na superfície do dielétrico. Com a lei de Gauss

aplicada numa superfície como aquela indicada na figura 4.4.6, entendemos que o campo elétrico fica enfraquecido pelas cargas na superfície do dielétrico.

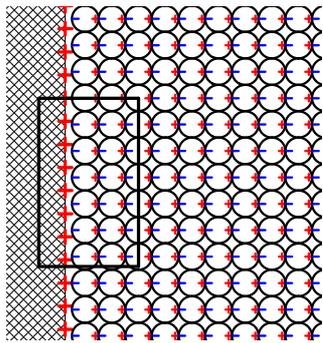


Fig. 4.4.6 Superfície Gaussiana na interface metal-dielétrico de um capacitor carregado.

Então o papel do dielétrico é enfraquecer o campo elétrico e num capacitor isto resulta numa diminuição da voltagem e consequentemente num aumento da capacitância.

Mesmo com o aumento da capacitância provocada pela presença de um dielétrico é preciso realizar distâncias extremamente pequenas entre as placas de um capacitor para poder construir um capacitor de centenas ou até milhares de microfarad. Há uma técnica interessante de criar camadas isolantes extremamente finas entre dois condutores. Nesta técnica um dos condutores é um metal, muitas vezes alumínio, e o outro condutor é um eletrólito, isto é, uma solução contendo íons móveis. O condutor metálico fica mergulhado no eletrólito, e o fabricante aplica uma tensão entre estes condutores. Passa uma corrente e esta provoca uma reação química que transforma uma fina camada superficial do alumínio em óxido de alumínio. Esta fina camada é o dielétrico que separa os dois condutores. A camada isolante pode ter apenas poucos nanômetros de espessura. Com esta técnica pode-se fabricar capacitores de alguns milifarad. Mas há uma desvantagem destes *capacitores eletrolíticos*: eles podem ser usados somente com uma polaridade. A inversão da polaridade inverte o processo químico e destrói a camada isolante.

Exercícios:

E 4.4.1: Os capacitores eletrolíticos mais comuns usam como placas condutores um filme de alumínio e um eletrólito. Estas duas placas são separadas por uma fina camada de óxido de alumínio Al_2O_3 que é formado na superfície do filme de alumínio eletroliticamente. O Al_2O_3 possui uma constante dielétrica de 9,6 e suporta campos elétricos até $7 \times 10^8 \text{ V/m}$. A) Calcule qual deve ser a espessura mínima da camada de Al_2O_3 para fazer um capacitor que possa ser usado para tensões até 50 V. B) Qual deve ser a área das placas para que este capacitor tenha uma capacitância de $1000 \mu\text{F}$?

E 4.4.2: Escreva os pontos de destaque desta seção.