

CARACTERIZAÇÃO DE DIELÉTRICOS PARA SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ALTA ENERGIA E DE GERAÇÃO DE RF EM APLICAÇÕES AEROESPACIAIS

Silva Neto, Lauro Paulo¹ e Rossi, José Osvaldo²

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais,
Laboratório Associado de Plasma,
Curso de Sistemas Espaciais (CSE), São José dos Campos, SP, 12227-010
¹silvaneto007@yahoo.com.br e ²Rossi@plasma.inpe.br

Resumo: Atualmente é encontrada uma vasta variedade de dielétricos utilizados para a manufatura de capacitores, onde as cerâmicas a base de titanato de bário ou estrôncio são as mais usadas. O estudo trata das cerâmicas dielétricas ou de capacitores comerciais cerâmicos para uso em capacitores de alta tensão em sistemas de armazenamento de alta energia para aplicações espaciais, e na geração de ondas de sólitons de alta frequência (RF). Para caracterizar os materiais estes foram submetidos à variação de tensão e temperatura, verificando seu comportamento em função da constante dielétrica, o qual é um dos parâmetros que determina a capacitância. Os resultados obtidos verificaram que o capacitor apresenta um comportamento não linear, ou seja, diminui a sua constante dielétrica com o aumento da temperatura e da tensão.

Palavra Chave: Capacitor, constante dielétrica, titanato de bário.

1. Introdução

Cerâmicas dielétricas (titanatos de bário ou estrôncio) têm sido usadas como meios dielétricos em dispositivos armazenadores de energia, tais como em capacitores de alta tensão, devido à elevada constante dielétrica e alta rigidez dielétrica apresentada por estes materiais. O projeto trata primariamente do estudo de cerâmicas dielétricas ou de capacitores comerciais cerâmicos para uso em capacitores de alta tensão em sistemas de armazenamento de alta energia para aplicações espaciais. Devido às características não-lineares das cerâmicas, elas podem ser usadas também na construção de linhas de transmissão não-lineares (LTNLS) para a geração de ondas de sólitons de alta frequência (RF). Com a geração das ondas de sólitons vislumbra-se futuramente a construção de geradores compactos de RF de alta potência a base de componentes cerâmicos para uso em lasers ou radares em aplicações nas plataformas móveis de sistemas de defesa, e também nos veículos espaciais (satélites) para comunicação, onde tubos de propagação de ondas são utilizados para amplificação do RF, (Smith, 2002).

Capacitores cerâmicos a base de titanato de bário são misturados a dopantes (estrôncio ou zirconato de cálcio) com o objetivo de alterar sua tensão de Curie T_C para baixo da temperatura ambiente T_A . Neste fenômeno ocorre a mudança da estrutura cristalina passando da fase ferroelétrica (estrutura tetragonal) para a fase paraelétrica (estrutura cúbica), cujo deslocamento da temperatura de Curie abaixo de T_A é desejado, uma vez que em T_C o material apresenta a maior constante dielétrica, e com isso maior capacitância. A concentração de dopantes determina uma forte ou fraca dependência da constante dielétrica ϵ do material, em função da temperatura (T) (Roberts, 1947). Outra característica importante é que cerâmicas a base de titanatos apresentam variação de ϵ em função da tensão aplicada para um determinado valor de temperatura.

Dependendo da aplicação, pode-se priorizar uma leve dependência da constante dielétrica em função da temperatura bem como da tensão aplicada, como por exemplo, em aplicações lineares onde o uso de capacitores cerâmicos para a formação de pulsos retangulares via redes LC ou em sistemas de armazenamento de energia de alta potência. Em sistemas de armazenamento de alta potência operando numa taxa de repetição elevada, onde a remoção do calor é ineficiente, capacitores cerâmicos com dielétricos apresentando baixa dependência de ϵ com a temperatura seria ideal para esta aplicação. Por outro lado, em relação aos sistemas LC de geração de pulsos (empregados na alimentação de tubos de RF), a variação da constante dielétrica levaria a distorções no pulso de saída. Para esta aplicação, o projetista deve-se atentar em fornecer uma ventilação adequada ao circuito, para que não haja alteração da constante dielétrica, passando a preocupar-se na busca de capacitores com pequena variação da constante dielétrica com a temperatura. De qualquer forma utilizando capacitores cerâmicos, o projetista deve estar ciente de que haverá uma pequena variação da capacitância em função da temperatura bem como da tensão aplicada, pois estes componentes empregam materiais dielétricos não-lineares (Wilson *et al.*, 1991).

Outro foco do estudo é a tensão de ruptura (Breakdown) dos materiais dielétricos cerâmicos que constituem os capacitores cerâmicos comerciais e das cerâmicas piezoelétricas (PZT–titanato zirconato de chumbo), utilizadas geralmente em transdutores ou em geradores piezoelétricos de alta tensão (Holt *et al.*, 2005). No caso de PZTs,

utilizaremos amostras despolarizadas (remoção do efeito piezoelétrico) para evitar perdas ou danos aos dielétricos quando usados em sistemas de armazenamento de energia (por ex. em capacitores ou em linhas de transmissão).

2. Metodologia

O experimento contou com três capacitores comerciais de capacitâncias diferentes apresentados na Tabela1, onde foram feitas medidas estáticas da medida da variação da capacitância em função da tensão aplicada (DC) e da temperatura. Para a variação da temperatura os capacitores foram colocados sob um suporte de alumínio em contato com uma placa de aquecimento com temperatura controlada (hot plate). A temperatura foi monitorada por um sensor de temperatura (termopar tipo k) fixado a superfície do capacitor. A Figura 1 mostra o circuito para medir a capacitância do componente sob teste variando-se a tensão de carregamento DC.

Tabela1. Características e Dimensões dos capacitores utilizados

Capacitor	Voltagem (KV)	Capacitância (nF)	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
1	3	2	15	1,5
2	1	4,7	7,5	0,5
3	2	10	12	1,0

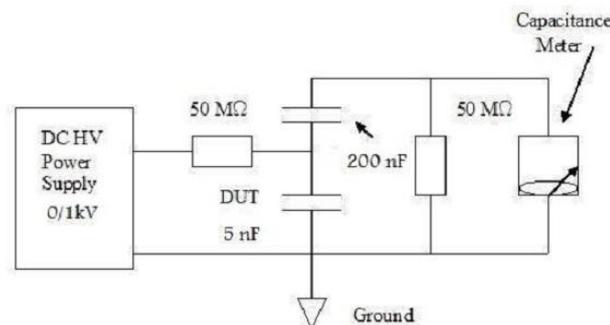


Fig. 1. Circuito medidor da capacitância em função da tensão aplicada.

No circuito da Fig. 1, o capacitor ou a amostra PZT sob testes é carregada por uma fonte DC de alta tensão via uma resistência de $50\text{M}\Omega$ para limitar a corrente de entrada e uma capacitância linear da ordem de 200nF é utilizado para isolar o capacitômetro da fonte de alta tensão. Por último, a resistência de $50\text{M}\Omega$ na saída é usada para descarregar o ambos os capacitores após o desligamento da fonte. A capacitância sob carga da amostra ou do capacitor é medida de zero até 1KV , aumentando-se gradativamente a tensão da fonte. Por outro lado, a capacitância na descarga do circuito é medida diminuindo-se gradativamente a tensão de carga da fonte até zero.

A respectiva constante dielétrica relativa k do dielétrico do capacitor ou da amostra sob testes é obtida através de:

$$k = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (1)$$

Onde C é a capacitância do amostra ou do capacitor sob testes, d a distância entre os eletrodos condutores, A área da placa condutora e ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo, definida como $8,85 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$.

Realizou-se uma micro-análise da composição química do dielétrico sob testes, no microscópio eletrônico de varredura (MEV – Jeol modelo JSM 5310) equipado com detectores de energia dispersiva de raios X (EDS). A preparação do capacitor para análise em EDS consistiu em retirar a sua camada polimérica externa dos eletrodos dos capacitores através de lixas de SiC com granulação grossa e fina. Após lixar, as amostras foram limpas em banho ultrassônico com álcool isopropílico por aproximadamente 15 minutos.

Foi montado e projetado um sistema pulsador de alta tensão com sistema de segurança para realizar os testes de *breakdown* para obter a quantidade de energia máxima que pode ser armazenada em J/cm^3 no dielétrico. O sistema consiste em duas fases no qual a primeira parte é constituída de uma fonte carregadora DC de média tensão, com fundo de escala em 750volts. A segunda parte é composta pelo pulsador de alta tensão que emprega bobinas de ignição (modelo Bosch KW 12V) para produzir pulsos de tensão de aproximadamente 60KV (pico a pico). O circuito carregador encontra-se mostrado na Figura 2.

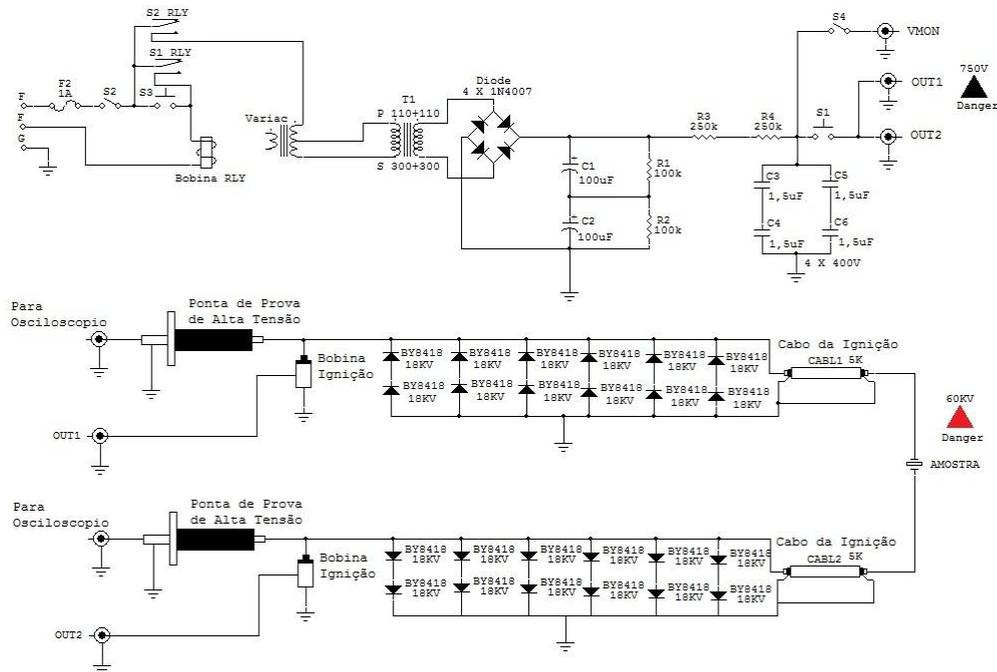


Fig. 2. Circuito da fonte de Alta Tensão do circuito de breakdown.

3. Primeiros Resultados e Discussões

As primeiras medidas obtidas através da relação $C \times V$ em condições estáticas, foram realizadas em temperatura ambiente para os capacitores 1 e 2 conforme ilustrado pelas linhas vermelhas, dos gráficos das Figs. 3 e 4 os valores respectivos da constante dielétrica relativa também são apresentados nos mesmos gráficos pelas linhas azuis, onde se pode observar um comportamento semelhante ao da respectiva variação da capacitância em função de V . Normalmente, para capacitores com dielétricos cerâmicos espera-se uma diminuição da capacitância com o aumento da tensão, como apresentado na Fig. 4 devido à saturação do alinhamento dos dipolos a partir de um determinado valor de campo elétrico. No caso da Fig. 3 é observado um leve aumento da capacitância em função da tensão, pois neste caso ocorreu apenas o alinhamento inicial linear dos dipolos do dielétrico, não atingindo o ponto de saturação. Isto pode ser explicado levando-se em conta a tensão de ruptura do componente (3 kV) muito superior a tensão máxima aplicada de 1 kV devido às limitações da fonte DC. Ainda, para a medida de $C \times V$ do capacitor 3, conforme mostra a Fig. 5, fez-se o mesmo procedimento tanto na carga (linha azul) como na descarga (linha vermelha) para ambas as polarizações (negativa e positiva). Ambas as curvas demonstram que os valores da capacitância são iguais tanto na carga quanto na descarga e independe se a tensão de polarização é positiva ou negativa. Portanto, esta análise mostra que o dielétrico não apresenta histerese, pois já se encontra na fase paralelérica na temperatura ambiente.

De maneira semelhante às medidas $C \times V$, nos testes em condições estáticas dos capacitores com perturbação externa de temperatura, a capacitância diminui com o incremento de T , conforme mostra os gráficos de $C \times T$ Figs. 6 & 7 para os capacitores 2 & 3. Isto está de acordo com o esperado na fase paralelérica desde que neste caso, a permissividade elétrica relativa do material segue a lei de Curie-Wiess:

$$k = \frac{H}{T - T_c} \tag{2}$$

Onde T_c é a temperatura de Curier, H é uma constante que depende do material dielétrico e T a temperatura do material. Por outro lado, variando-se a tensão de polarização do capacitor 3 de zero até 1000 V com temperatura estabilizada em 150 °C, conforme mostra a linha de baixo em preto na Fig. 5, obtém-se um decréscimo de C com

V bem pequeno quando comparado com a condição em temperatura ambiente (ver linha azul na Fig. 5). Isto pode ser explicado considerando que em temperatura elevada (no caso em 155 °C) a capacitância já se encontra próxima de região de saturação em torno de 2 nF.

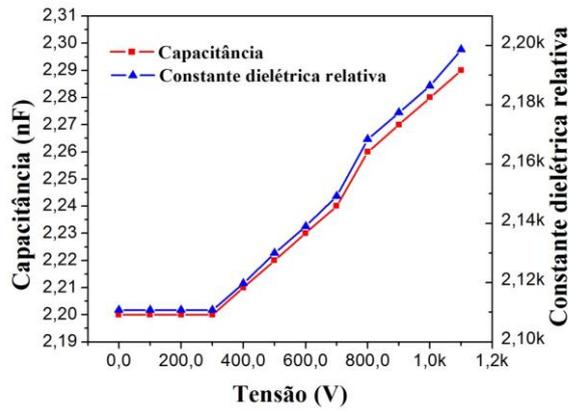


Fig. 3. Variação da capacitância e da constante dielétrica em função da tensão para o capacitor 1

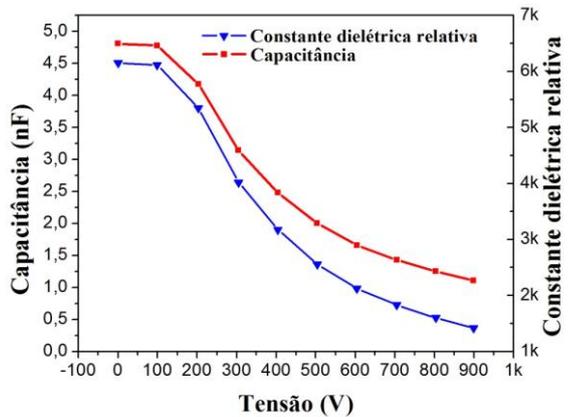


Fig. 4. Variação da capacitância e da constante dielétrica em função da tensão para o capacitor 2

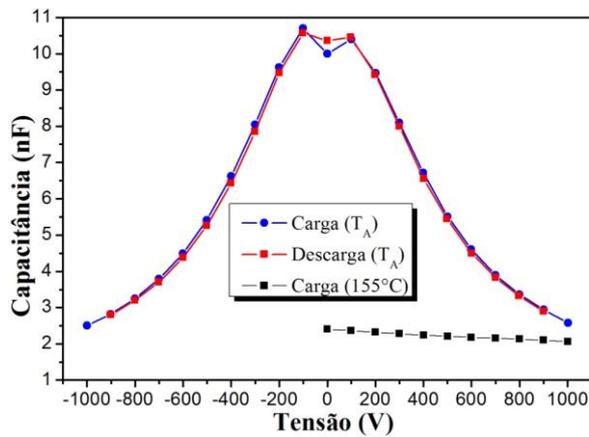


Fig. 5. Variação da Capacitância em função da tensão para carga e descarga do capacitor 3.

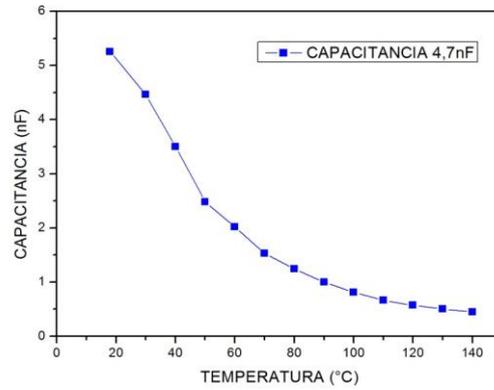


Fig. 6. Variação da capacitância em função da temperatura para o capacitor 2.

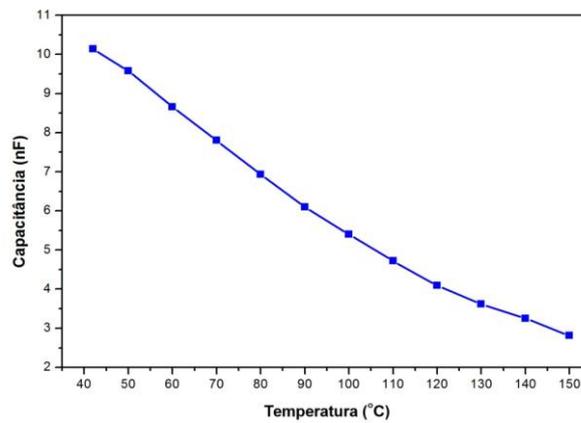


Fig. 7. Variação da capacitância em função da temperatura para o capacitor 3.

As análises de EDS revelam a composição química dos capacitores testados 1, 2 e 3. A Fig. 8 ilustra o espectro EDS do dielétrico do capacitor 1 e a Fig. 9 do capacitor 3. O EDS do dielétrico do capacitor 2 não foi mostrado, mas é bastante semelhante ao do capacitor 3. A análise espectroscópica dos três dielétricos mostra que os capacitores são compostos de óxidos a base de titanato de Bário ($BaTiO_3$), onde o Estrôncio (Sr) e o cálcio são os agentes dopantes para deslocar a temperatura de Curier do material para baixo da temperatura ambiente. Como os dielétricos testados apresentam constante dielétrica extremamente elevada, pode-se inferir que se trata do composto $BaTiO_3$, (Rossi *et al*, 2010). Esta propriedade de elevado ϵ apresentada pelas cerâmicas comerciais as torna especialmente úteis para algumas aplicações em capacitores de alta tensão devido à redução de tamanho. O elemento Chumbo (Pb) encontrado no dielétrico do capacitor 1, na forma de Óxido de Chumbo (PbO), melhora as propriedades dielétricas do Bário. Já o elemento Carbono (C) encontrado no espectro do capacitor deve-se provavelmente a impurezas encontradas nos óxidos.

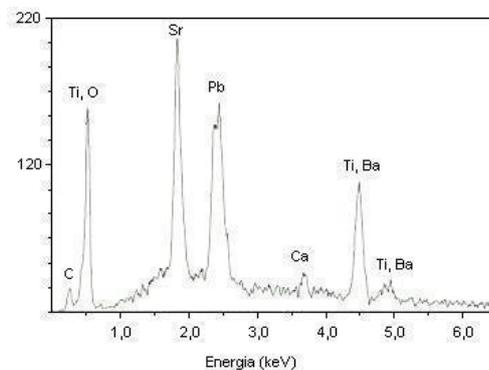


Figura8. Espectro do EDS do dielétrico para capacitor 1

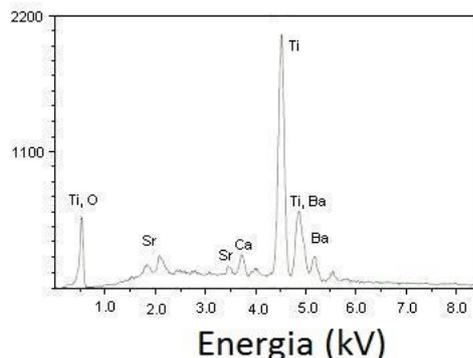


Fig. 9. Espectro do EDS do dielétrico para capacitor 3.

4. Conclusão

Os resultados obtidos até o momento indicam que os capacitores cerâmicos comerciais possuem uma forte dependência da constante dielétrica em função da tensão e da temperatura, onde para ambas as situações a capacitância diminui com o incremento de T ou V. Esta não-linearidade não é desejável para projetos eletrônicos que consideram a capacitância como sendo uma propriedade linear, podendo trazer mal funcionamento ou resultados não satisfatórios aos circuitos, devido à utilização de capacitores cerâmicos comerciais à base de titanato de bário. Por outro lado, este efeito de não-linearidade pode ser de interesse para projetos de redes LC (indutores e capacitores) não-lineares a serem usadas na geração de sinal de rádio-frequência em substituição aos tubos eletrônicos. A continuação do trabalho consiste em realizar a caracterização do material cerâmico PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) utilizado em sensores, transdutores, e geradores piezoelétricos em função da tensão e temperatura, bem como das medidas de rigidez dielétrica (testes de breakdown) para avaliação da máxima energia a ser armazenada. Dependendo dos resultados a serem obtidos, cerâmicas PZT sem polarização poderão ser aplicadas em sistemas de armazenamento de energia ou em circuitos não-lineares como elementos capacitivos.

5. Agradecimentos

Trabalho apoiado com recursos fornecidos pela agência americana SOARD (US Air Force) através da Fundação FUNCATE, São José dos Campos, SP e pelo CNPq via financiamento da bolsa de estudos de Mestrado.

6. Referências

- Holt, S; Dickens, J; Walter, J. Design of Explosive-Driven Ferroelectric Pulse Generators With Outputs Exceeding 200kV, Proc. of the 2005 IEEE Pulsed Power Conference, Monterey, CA, pp.449-452.
- Roberts, S. Dielectric and Piezoelectric Properties of Barium Titanate. Physical Review, vol. 71, no. 12, pp. 890-895, 1947.
- Rossi, J.O; Siqueira, R. H. M and Silva, L. P; Estudo da dependência da capacitância de capacitores cerâmicos comerciais com a tensão e temperatura. Anais do 19º CBECiMat, Campos do Jordão, Nov. 2010, pp 1082-1089.
- Smith, P. W. Transient Electronics – Pulsed Circuit Technology, West Sussex, England: John Wiley & Sons, pp.245-249, 2002.
- Wilson, C.R et al. Pulse Sharpening in a Uniform LC Ladder Network Containing Nonlinear Ferroelectric Capacitors. IEEE Trans. Electron Dev., vol. 38, pp. 767-771, 1991.