

Figura de Mérito

Everson Mattos, Henrique Figueira, Felipe Fernandes

Acadêmicos da disciplina de Conversores Estáticos, PPGEE, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, Brasil
everson.mattos@gmail.com, hhfigueira@gmail.com, fleipetfernandes83@gmail.com

10 de Abril de 2014

Resumo

Neste trabalho apresentam-se algumas figuras de mérito encontradas na bibliografia, enumera-se a principal finalidade de cada uma delas, bem como sua contribuição no desenvolvimento ou acompanhamento da evolução tecnológica dos materiais empregados em dispositivos eletrônicos de potência. Por fim, faz-se uma breve explanação da figura de mérito de densidade de potência, a qual é aplicada para avaliar o desempenho de dispositivos eletrônicos de potência frente a minimização da área e maximização da potência de trabalho.

Palavras chave

Semicondutores de Potência, Figuras de Mérito

1 Introdução

Um dos problemas que enfrentam os projetistas é a escolha do dispositivo eletrônico ou do material para projetar um dispositivo novo. Para tentar resolver esse problema surgiram as figuras de mérito, que tratam os diversos dispositivos levando em consideração vários fatores comuns para os diferentes tipos de materiais. Assim, as figuras de mérito acompanham a evolução de determinadas características de componentes, por exemplo perdas no chaveamento, dissipação de calor, perdas com relação a frequência, desempenho em relação a tamanho da estrutura, etc. além disso, são usadas para comparar desempenho de componentes com diferentes tecnologias de fabricação [1]. A figura 1 mostra a evolução da tecnologia dos materiais semicondutores, a frequência e a potência de operação. A tabela 1 mostra o mercado consumidor das tecnologia dos materiais semicondutores por área de atuação [2] Algumas figuras de mérito são úteis para acompanhar a evolução da tecnologia de fabricação, como mostra a figura 2, segundo [3]

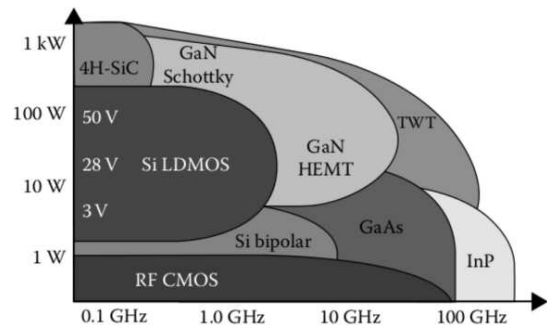


Figura 1: Materiais, potência e frequência de operação

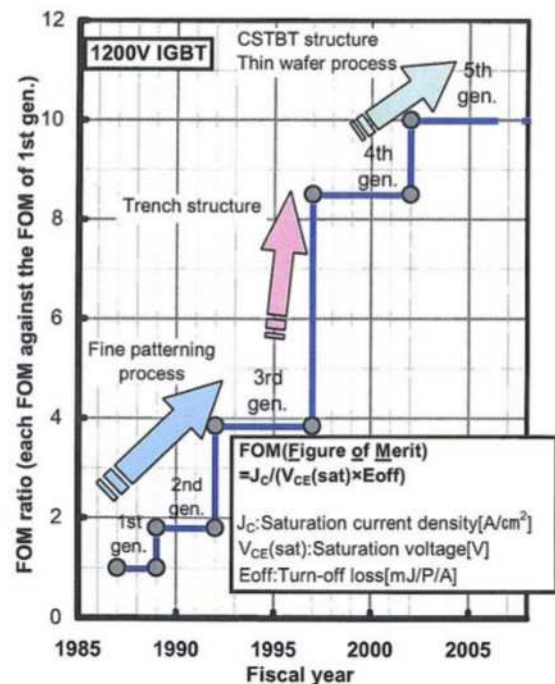


Figura 2: Materiais, potência e frequência de operação

2 Figuras de Mérito

Segundo [4] existem várias figuras de méritos na literatura. Em 1965, Johnson criou uma figura de mérito para diferenciar materiais semicondutores

Tabela 1: Materiais, aplicações e mercados

Componentes	Material	Aplicações	Mercado em Bilhões U\$
Foto Célula	CuGeSe,	dispositivos para satélite e	0,5
<i>LEDs</i>	GaAs, GaInP GaN, GaP	aterramento de alta eficiência Luz de iluminação branca, display, <i>backlighting</i> , indica- dores luminosos	8,5
<i>Lasers</i>	GaAs, GaN, InP	dico ótico de armazena- mento, comunicação de dados, comunicações chaveadas	2,5
<i>Wireless</i>	GaAs, InP, GaN	Comunicações moveis e estação radio base	8

dada pela equação 1

$$JFON = \frac{E_c v_s}{2\pi} \quad (1)$$

onde E_c é o máximo campo elétrico suportado; v_s é a velocidade de deriva dos portadores na saturação. A figura de mérito de Johnson faz uso da frequência de *cut-off* do transistor e a máxima tensão aplicável. Ela pode ser usada para comparar dispositivos usados como amplificadores.

Em 1983, Baliga propôs uma nova figura de mérito segundo a equação 2

$$BFOM = \varepsilon \mu E_c^3 \quad (2)$$

onde ε é a constante dielétrica do material; μ é a mobilidade dos portadores majoritários; E_c é o campo elétrico critico para o semiconductor. Essa figura de mérito pode ser usada para comparar as perdas de condução de dispositivos unipolares. Em 1989, Baliga propôs uma figura de mérito para comparar as perdas no chaveamento, dada pela equação 3

$$BHFFOM = \frac{1}{R_{on,sp} C_{in,sp}} \quad (3)$$

onde $R_{on,sp}$ é a resistência específica de condução; $C_{in,sp}$ é a capacitância específica de entrada. Entretanto, essa figura de mérito não é usada, pois as perdas no chaveamento não estão diretamente relacionadas com $C_{in,sp}$, além disso não é possível o uso dessa figura de mérito para comparar materiais, pois nem todos os dispositivos são conhecidos $R_{on,sp}$ e $C_{in,sp}$. Em 1995, Kim propôs uma nova figura de mérito dada pela equação 4

$$NHFFOM = \frac{1}{R_{on,sp} C_{oss,sp}} \quad (4)$$

onde $C_{oss,sp}$ é a capacitância específica de saída. Novamente, essa figura de mérito não pode ser usada diretamente para comparar materiais e

considera as perdas no chaveamento relacionadas somente a $C_{oss,sp}$. Enquanto as quatro primeiras *Figure-of-Merit* (FOM) apresentam o dispositivo de um ponto de vista de perdas com relação ao tipo de material, há outras que consideram as características elétricas e construtivas do dispositivo. Ohmi e Takeuchi proporam a FOM (O) dada pela equação 5 para semicondutores de potência, a qual é independente dos níveis de potência, pois apresenta a performance elétrica do chip semiconductor.

$$FOM(O) = \frac{V_c I_c}{V_{on} t_{off} S} \quad (5)$$

A FOM(F) dada na equação 6 foi proposta por Shigekane, e leva em consideração os parâmetros térmicos e estruturais do encapsulamento.

$$FOM(F) = \frac{V_c I_c}{V_{on} t_{off} S R_{th} L_s} \quad (6)$$

Shigekane indica que mesmo que a FOM(O) do IGBT seja maior que a do GTO, o que significa que a performance do IGBT é superior ao GTO, a FOM(F) do IGBT é menor que do GTO. Isso é atribuído a diferenças na estrutura do encapsulamento entre os dois dispositivos. O GTO é montado em um encapsulamento plano com baixos R_{th} e L_s , quando comparado ao encapsulamento do IGBT.

Dispositivos com *wide-bandgap* aplicados a conversores de potência receberam recentemente atenção devido a capacidade de operação em altas frequências e níveis de potência. Para melhor entender o impacto desses dispositivos, algumas FOMs foram desenvolvidas por Huang, que estava interessado na comparação entre materiais semicondutores. A figura 3 mostra um gráfico típico para as perdas no chaveamento de dispositivos semicondutores.

Onde Q_{th} é a carga da capacitância de entrada de gate para a tensão de *threshold*; Q_{gs1} é carga

Tabela 2: Figuras de Mérito para Dispositivos Eletrônicos de Potência

Figura de Mérito	Definição	Aplicação
JFOM	$\frac{E_c v_s}{2\pi}$	Comparação entre diferentes materiais
BFOM	$\varepsilon \mu E_c^3$	Comparação das perdas de condução
BHFFOM	$\frac{1}{R_{on,sp} C_{in,sp}}$	Perdas de condução levando em consideração a capacitância de entrada
NHFFOM	$\frac{1}{R_{on,sp} C_{oss,sp}}$	Perdas de condução levando em consideração a capacitância de saída
FOM(O)	$\frac{V_c I_c}{V_{on} t_{off} S}$	Perda de condução considerando a área do <i>chip</i>
FOM(F)	$\frac{V_c I_c}{V_{on} t_{off} S R_{th} L_s}$	Perda de condução considerando a área do <i>chip</i> e característica térmica
HMFOM	$E_c \sqrt{\mu}$	Perdas de condução para diferentes tipos de materiais
HCAFOM	$\varepsilon E_c^2 \sqrt{\mu}$	comparação de área do <i>chip</i> para diferentes materiais
HTFOM	$\frac{\sigma_{th}}{\varepsilon E_c}$	Comparação térmica para diferentes materiais

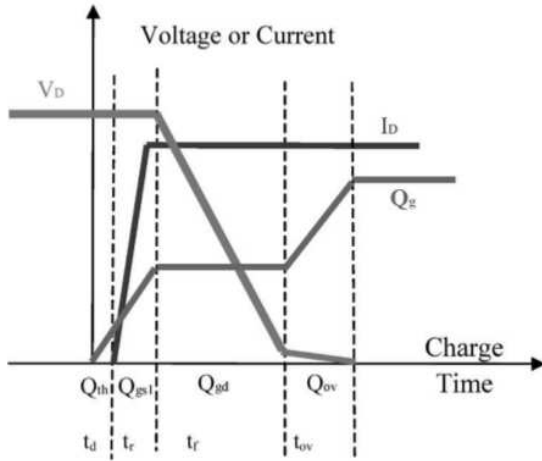


Figura 3: Forma de onda típica do transiente no chaveamento de um MOSFET de potência

da capacitância de entrada até I_D atingir seu valor nominal; Q_{gd} também chamada carga Miller, é a capacitância que drena portadores de carga para que a tensão de Dreno chegue ao seu valor mínimo; Q_{ov} é a sobrecarga na capacitância de entrada que resulta na redução da resistência *on* da chave. A tabela 2 apresenta algumas figuras de mérito retiradas de [4] e [1]. Uma figura mérito proposta por [1], leva em consideração as FOMs existentes, com o intuito de estabelecer um critério para seleção de dispositivos eletrônicos de potência, utilizando para tanto a densidade de potência do componente. Essa FOM recebe o nome de PDFOM e é dada na equação 7.

$$PDFOM = \frac{1}{\sqrt{R_{on} Q_{gd} A_{pack} R_{th}}} \quad (7)$$

Onde A_{pack} é a área do encapsulamento do componente. A partir da tensão e corrente de *turn-*

on, a perda de comutação (*turn-on/off*) gerada durante o intervalo de carga de Q_{gs} e Q_{gd} pode ser derivada. Durante o período de comutação, só a contribuição do Q_{gd} é dominante para a perda de comutação. Além disso, para os dispositivos comerciais de potência, deve-se considerar a área de embalagem do dispositivo A_{pack} . O principal objetivo da PDFOM é o estudo da densidade de potência para os dispositivos eletrônicos.

3 Conclusão

O grande desafio das figuras de mérito é o de minimizar funções, ou seja, encontrar um ponto que minimize o que é indesejável no dispositivo ou material e maximize o que é benéfico e desejável. Muitas vezes isso não é possível de imediato, e tampouco simples de se encontrar uma formula analítica. Esse é o grande mérito e o desafio da FOM, nesse sentido, a PDFOM é uma ferramenta poderosa para o projeto de conversores de potência, ou seja, ela indica os impactos da densidade de potência dos diferentes componentes no projeto eletrônico.

Referências

- [1] H. Wang, F. Wang, and J. Zhang, "Power semiconductor device figure of merit for high-power-density converter design applications," vol. 55, no. 1, pp. 466–470, 2008.
- [2] T. Li, M. Mastro, and A. Dadgar, *III–V Compound Semiconductors: Integration with Silicon-Based Microelectronics*. Taylor & Francis, 2010.
- [3] J. F. Donlon, E. R. Motto, T. Takahashi, H. Fujii, and K. Satoh, "Chip improvements

for future IGBT modules,” in *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE*, pp. 1–7, 2008.

- [4] A. Q. Huang, “New unipolar switching power device figures of merit,” vol. 25, no. 5, pp. 298–301, 2004.