DESENVOLVIMENTO DE STRAIN GAUGES SEMICONDUTORES PARA APLICAÇÕES EM ALTAS TEMPERATURAS

Humber Furlan¹, Mariana Amorim Fraga² ¹ Prof. Dr. do Curso de Mecânica de Precisão da FATEC-SP ² Pesquisadora Dra. do Laboratório de Plasmas e Processos do ITA e-mails: <u>humber@fatecsp.br; mafraga@ita.br</u>

Resumo

A principal limitação dos strain gauges baseados em silício ou em metais é a influência da temperatura sobre o GF (Gauge Factor) desses materiais. Neste contexto, alguns estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de caracterizar o efeito piezoresistivo em materiais semicondutores com boa estabilidade térmica e química, como o SiC e o SOI (Silicon-On-Insulator), para o desenvolvimento de strain gauges capazes de apresentar bom desempenho em altas temperaturas.

Este trabalho descreve a fabricação e caracterização de strain gauges baseados em filmes finos de carbeto de silício (SiC) e em substratos SOI. A estrutura dos strain gauges consiste de um resistor de SiC ou SOI com contatos elétricos de Ti/Au. Um arranjo experimental foi desenvolvido para determinar a variação da resistência elétrica do resistor em função da tensão mecânica aplicada. Este experimento possibilitou determinar o GF e a deformação (strain) dos strain gauges. Além disso, foi determinado o coeficiente térmico de resistência (TCR) para avaliar a influência da temperatura sobre o desempenho dos strain gauges fabricados.

1. Introdução

Os strain gauges são sensores de deformação mecânica amplamente utilizados em diferentes aplicações devido à simplicidade de sua estrutura e de seu funcionamento. O princípio de funcionamento desses sensores é baseado no efeito piezoresistivo.

Piezoresistividade é a propriedade do material de alterar sua resistividade elétrica quando submetido a uma tensão mecânica (stress), ou seja, é a variação da resistividade em função da deformação (strain) sofrida pelo material [1]. Em 1856, essa propriedade foi observada em metais e só em 1954 foi publicado o primeiro artigo sobre as propriedades piezoresistivas de materiais semicondutores [2].

As propriedades piezoresistivas de um material são avaliadas a partir do GF (Gauge Factor) que é definido por:

$$GF = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\varepsilon}$$
(1)

em que $\Delta R/R$ é a variação da resistência elétrica e ϵ é a deformação.

A Tabela I compara o GF à temperatura ambiente dos metais com o de materiais semicondutores como o Si e o Ge. Observa-se que os metais apresentam GF muito inferiores ao do Si. Em altas temperaturas, o GF dos metais é menor que 2 e o do Si a 150°C é em torno de 30% menor que à temperatura ambiente [3].

Tabela I. GF de alguns materiais a 25° C [3]

Material	GF	
Pt	4,8	
Pd	6,6	
Ag	2,9	
Si tipo p	100 a 175	
Ge	48 a 102	

Essa influência direta da temperatura sobre as propriedades piezoresistivas dos metais e do Si limita a aplicação de strain gauges baseados nesses materiais em sistemas aeroespaciais, aeronáuticos, automotivos e industriais.

Diante disso, atualmente existe um crescente interesse pelo estudo das propriedades piezoresistivas de materiais semicondutores alternativos, com boa estabilidade térmica e química, para o desenvolvimento de sensores MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) para atender aplicações onde o uso do Si é limitado como em altas temperaturas, sob radiação intensa e em ambientes corrosivos. Entre esses materiais, destacam-se o carbeto de silício (SiC), o DLC (Diamond like-carbon) e o SOI (Silicon-On-Insulator) [4-5].

2. Materiais e Métodos

Os filmes de carbeto de silício (SiC) utilizados na fabricação dos strain gauges deste trabalho foram produzidos pela técnica de PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition).

O sistema de PECVD utilizado é constituído por uma câmara de deposição de aço inoxidável em forma cilíndrica com volume total de 25 litros. O sistema de vácuo é composto por duas bombas, uma difusora e uma mecânica, que estão acopladas à câmara de deposição. Para deposição dos filmes de SiC sobre substratos de Si (100) oxidados termicamente, foi utilizada uma mistura dos gases $SiH_4 + CH_4 + Ar$. Os fluxos dos gases são regulados por controladores de fluxo de massa devidamente calibrados. Como parte deste sistema de deposição, também são utilizados medidores de pressão do tipo Pirani e de membrana capacitiva, geradores de rádio freqüência (RF) e um amplificador de RF. Os substratos são colocados sobre um catodo de aço inoxidável de 65 mm de diâmetro, refrigerado com água. Isto permite que a deposição dos filmes ocorra praticamente à temperatura ambiente.

A lâmina SOI (Silicon-On-Insulator) utilizada tem uma camada de silício superficial de 0,2µm e uma camada de óxido enterrado de 0,5µm sobre 250µm de silício monocristalino.

Para fabricar os strain gauges, foram desenvolvidas duas máscaras fotolitográficas: uma para o resistor de SiC ou SOI e outra para os contatos elétricos (pads) de Ti/Au. Na Figura 1, está ilustrado esquematicamente o processo de fabricação dos strain gauges SOI.



🚺 SiO2 🔲 Si 🦳 Ti 📗 Au 🚺 Fotoresiste

Figura 1 – Etapas de fabricação dos strain gauges em substratos SOI.

O processo iniciou-se pela aplicação de uma camada de fotorresiste sobre o substrato SOI (Fig. 1 (b)). Em seguida, foi realizada a litografia para definir a geometria e as dimensões dos contatos elétricos.

Para obter os contatos elétricos, uma camada de 20 nm de Ti foi depositada e, em seguida, 250 nm de Au. Subseqüentemente, foi realizado o "lift-off" que consiste na remoção dos metais das áreas indesejadas (Fig. 1 (e)).

Uma nova camada de fotorresiste foi aplicada e a segunda litografia foi realizada para definir a geometria e o tamanho dos resistores. O silício das regiões não protegidas por fotorresiste foi corroído por plasma de $SF_6 + O_2$ (Fig. 1 (g)) para obter a estrutura final do strain gauge (Fig. 1 (h)).

Um processo semelhante foi utilizado para fabricar os strain gauges de SiC.

A caracterização dos strain gauges fabricados foi realizada pelo método da viga em balanço ilustrado na Figura 2.

Um strain gauge foi colado, utilizando uma camada de epóxi, próximo à extremidade engastada de uma viga de aço e, sobre a extremidade livre, foram aplicadas diferentes forças, entre 0,2 N e 1,0 N (ver figura 2). A resistência elétrica do strain gauge foi medida para cada força aplicada, o que possibilitou determinar a variação da resistência elétrica em função da força aplicada e conseqüentemente foi possível determinar o GF.



Figura 2 – Desenho esquemático do arranjo experimental montado para caracterização do strain gauge.

2. Resultados e Discussões

Na Figura 3, estão mostradas fotografias dos strain gauges fabricados. Cada strain gauge é constituído por um resistor com 2,95mm x 0,6mm. A espessura do resistor de SiC é igual à espessura do filme (0,48 μ m) e a do SOI é igual à espessura da camada superficial de silício (0,2 μ m).



Figura 3 – Fotografias dos strain gauges fabricados: (a) SiC e (b) SOI.

A Tabela II mostra a resistividade e o módulo de elasticidade dos materiais utilizados. Observa-se que o filme de SiC tem maior resistividade e menor módulo de elasticidade que o substrato SOI.

Tabela II. Características dos materiais utilizados e dimensões dos strain gauges.

	Resistividade	Módulo de	Dimensões
	$(\Omega.cm)$	Elasticidade	dos strain
		(GPa)	gauges
Filme de			
SiC	12,5	65	L= 2,95mm
			W= 0,6mm
			t = 0,0048
			mm
Substrato			
SOI	3	150	L= 2,95mm
			W= 0,6mm
			t = 0,002
			mm

Na Figura 4, está mostrada a variação da resistência elétrica dos strain gauges de SiC e dos SOI em função da força aplicada sobre a viga. Observa-se que a resistência do SiC varia mais que a do SOI, o que mostra que esse material é mais sensível à deformação.

O GF dos strain gauges foi determinado pelas inclinações das retas da Figura 5 que mostram a variação da resistência elétrica em função da deformação. Um GF de 22 foi obtido para o SOI e de 48, para o SiC.

O TCR dos strain gauges até temperaturas de 250°C é mostrado na Figura 6. Foi comprovada a estabilidade térmica dos materiais, tendo em vista que o TCRs permaneceram praticamente constantes com o aumento da temperatura. Além disso, observou-se que o TCR do SiC é quatro vezes menor que o do SOI.



Figura 4 – Variação da resistência elétrica do strain gauge em função da força aplicada sobre a viga.



Figura 5 – Variação da resistência elétrica do strain gauge em função da deformação.



Figura 6 – Coeficiente térmico de resistencia (TCR) dos strain gauges para temperaturas de até 250°C.

4. Conclusões

Neste trabalho, foram fabricados e caracterizados strain gauges baseados em dois tipos de materiais semicondutores: filmes de carbeto de silício (SiC) e substratos SOI (Silicon-On-Insulator). Observou-se que os strain gauges de SiC apresentaram um GF= 48 e TCR= 31 ppm/°C, enquanto que os SOI apresentaram GF= 22 e TCR= 140 ppm/°C. Ambos materiais possuem TCR consideravelmente menores que o do silício (> 1.000 ppm/°C) o que mostra que são boas alternativas para o desenvolvimento de strain gauges para aplicações em altas temperaturas.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Microfabricação do LNLS pelo auxílio nas etapas de fabricação dos strain gauges.

Ao Laboratório Associado de Sensores do INPE por ter disponibilizado o sistema de deposição por PECVD. Ao CNPq, CAPES e FAPESP pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

[1] J.W. Dally, **Experimental Stress Analysis**, McGraw-Hill Book Company, 1978.

[2] C. S. Smith, **Physical Review**, Vol. 94, p.42-49, 1954.

[3] M. A. Fraga, **Desenvolvimento de Sensores Piezoresistivos Visando Aplicação em Sistemas Aeroespaciais**, Tese de Doutorado apresentada ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2009.

[4] M. A. Fraga, H. Furlan, I. C. Oliveira, M. Massi, Journal Microsystem Technologies, 2010.

[5] M. Willander et al., Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2006.