

Questão

- 1 . O nitreto de alumínio (AlN) é um composto cerâmico semicondutor que pode ser empregado, por exemplo, na fabricação de LEDs que emitem luz na região do ultravioleta (tipicamente por volta de 245 nm). Nestas aplicações o AlN, que tem a estrutura da Würtzita (hexagonal) é crescido de forma epitaxial com o plano basal (0001) paralelo ao plano (111) de um substrato de silício, sendo que a deposição é realizada a 700°C. Tsubouchi *et al.*¹ reportaram as propriedades elásticas do AlN na forma da seguinte matriz de rigidez:

$$C_{i,j} = \begin{vmatrix} 3,45 & 1,25 & 1,20 & 0 & 0 & 0 \\ 1,25 & 3,45 & 1,20 & 0 & 0 & 0 \\ 1,20 & 1,20 & 3,95 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,18 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,10 \end{vmatrix} \times 10^{11} \text{Nm}^{-2} \quad (1)$$

Suponha agora que, durante a operação, a camada de AlN no dispositivo eletrônico estará sujeito a um estado de deformação dado por:

$$\varepsilon_{i,j} = (\alpha_{\text{Si}} - \alpha_{\text{AlN}}) \Delta T \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x \end{vmatrix} \quad (2)$$

onde as direções x_1 e x_2 estão contidas no plano do filme, x_3 é perpendicular os plano do filme, $\alpha_{\text{Si}} = 2,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ e $\alpha_{\text{AlN}} = 4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ são os coeficientes de expansão térmica lineares do silício e do AlN, respectivamente, ΔT é o intervalo de temperaturas entre a temperatura de operação e a temperatura ambiente e x , por hora desconhecido, é determinado *a posteriori* pelas condições de contorno do problema. Considere ainda que o AlN apresenta os seguintes valores tabelados: $K_{\text{Ic}} = 2,6 \text{ MPa m}^{0,5}$, resistência à compressão de 2100 MPa e resistência à tração de 390 MPa e que a camada de AlN em um LED típico tem 5 μm de espessura. Com base nestas informações:

- reescreva a equação 1 na forma de uma tabela compacta contendo apenas as constantes elásticas que são necessárias à completa caracterização das propriedades elásticas do material, expressando os valores destas constantes elásticas em GPa,
- suponha que, em qualquer situação, o filme de AlN irá operar em um estado plano de tensão (EPT) e, usando esta hipótese, estime o valor de x ,

¹K. Tsubouchi, K. Sugai, N. Mikoshiba, "AlN material constants evaluation and SAW properties on AlN/Al₂O₃ and AlN/Si" *1981 Ultrasonics Symposium Proceedings* IEEE:New York (1981) pp. 375 - 380, disponível em <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=10281>, acesso em 05/04/2012.

- c . represente, usando as variáveis que julgar mais conveniente, os estados de tensão e de deformação do filme na forma de círculos de Mohr, identificando as tensões e deformações principais e as máximas tensões de cisalhamento e deformação angular,
- d . considerando que, no seu projeto, o máximo ΔT a que o dispositivo será sujeito está limitado a 25°C e usando a máxima tensão de tração desenvolvida no estado de tensão do filme como critério de falha, determine o tamanho do defeito crítico a_c do filme de AlN,
- e . supondo que o defeito crítico corresponda a microtrincas perpendiculares à superfície do filme, você espera, ou não, que a falha do dispositivo seja controlada pela mecânica da fratura? Justifique sua resposta.

1 Resposta

- a. A resposta solicitada encontra-se ena Tabela 1.

Tabela 1: Constantes elásticas od AlN (hexagonal).

Constante	Valor [GPa]
C_{11}	345
C_{12}	125
C_{13}	120
C_{33}	395
C_{44}	118
C_{66}	110

- b. No EPT temos $\sigma_3 = 0$, mas, considerando o estado de doformação imposto e a matriz de rigidez temos:

$$0 = [(\alpha_{Si} - \alpha_{AlN}) \Delta T] \times (120 + 120 + 395x) \Rightarrow 0 = 240 + 395x \Rightarrow x = -\frac{240}{395} = -0,6076 \quad (3)$$

- c. Com o resultado do item anterior podemos calcular as tensões principais em MPa:

$$\begin{cases} \sigma_1 = -1,9 \times 10^{-6} \times \Delta T \times (345000 + 125000 - 0,6076 \times 120000) = -0,7545 \times \Delta T \\ \sigma_2 = -1,9 \times 10^{-6} \times \Delta T \times (125000 + 345000 - 0,6076 \times 120000) = -0,7545 \times \Delta T \\ \sigma_3 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

As deformações principais são:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = -1,9 \times 10^{-6} \times \Delta T \\ \varepsilon_2 = -1,9 \times 10^{-6} \times \Delta T \\ \varepsilon_3 = +1,15 \times 10^{-6} \times \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

Com esses resultados obtemos os círculos de Mohr reproduzidos na Figura 1.

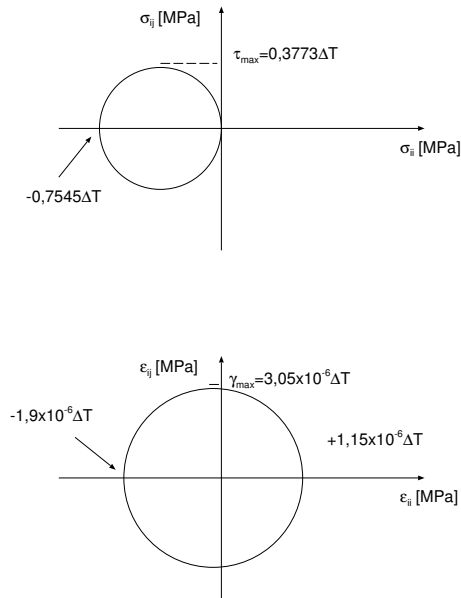


Figura 1: Círculos de Mohr das tensões e das deformações para o AIN depositado sobre Si.

- d. Substituindo $\Delta T = -425 \text{ }^\circ\text{C}$ nas equações 4 obtemos um máximo valor de tensão normal correspondente a $\sigma_{max} = 320,7 \text{ MPa}$. O defeito crítico será, portanto:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \times \left(\frac{K_{Ic}}{1,12 \times \sigma_{max}} \right)^2 = 1,66 \times 10^{-5} \text{ m} \quad (6)$$

ou ainda $17 \text{ } \mu\text{m}$, que é superior à espessura do filme, portanto não há risco de falha do ponto de vista da mecânica da fratura.