

ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA DE FONTE DOPANTE PARA LÂMINAS DE SILÍCIO

JONATAS SILVA DOS SANTOS¹, GABRIEL O. RAGAZZI¹, VINICIUS F. SILVA¹,

CARLOS TAKEO AKAMINE², LUIS DA SILVA ZAMBOM³

¹ Aluno do curso de MICROELETRÔNICA da FATEC-SP

² Prof. Me do curso de MICROELETRÔNICA da FATEC-SP

³ Prof. Dr. do curso de MICROELETRÔNICA da FATEC-SP

jonatassilva_sto@hotmail.com, carlos.akamine@fatecsp.br, zambom@fatecsp.br

Resumo

O presente trabalho utiliza as técnicas de confiabilidade para analisar o tempo de vida da solução spin-on glass, tipo n, produzida no Laboratório de Processos e Dispositivos (LPD) da FATEC-SP. O trabalho emprega teste de vida acelerado na solução usando como variável de estresse a temperatura. O modelo de Arrhenius é utilizado para avaliar como a temperatura influencia o tempo de vida da solução além do fator de aceleração.

Os resultados experimentais indicam que a energia de ativação do mecanismo de falha é de 1,194 eV e a 35 °C (condição de estresse) o fator de aceleração foi de 16,5 comparado à temperatura de 17,2 °C. O modelo de confiabilidade utilizado foi o Log-normal e a estimativa de tempo de vida à 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C foram respectivamente de 50, 20, 8, 4 e 2 dias.

1. Introdução

O silício puro, principal material utilizado na indústria de semicondutores, não é um bom condutor de eletricidade, mas ao adicionar outro elemento químico em sua estrutura como o fósforo ou boro (dopantes) em locais específicos torna-se bom condutor nessas regiões.

Existem dois tipos de dopantes. O dopante tipo N é um elemento pentavalente como por exemplo o fósforo, que quando é acrescido ao silício, os quatro elétrons do silício formam ligações químicas com os quatro elétrons do fósforo, restando um elétron (carga negativa) e tem-se a dopagem tipo N.

Na dopagem tipo P, um elemento trivalente como boro é acrescido ao silício e, com isso os quatro elétrons do silício formam ligações químicas com os três elétrons do dopante, de sobra uma lacuna de carga positiva.

Para síntese das fontes dopantes tipo P e tipo N, também chamadas de SOG (*spin-on glass*), utiliza-se o processo sol-gel, no qual um organossilicato, por exemplo, o tetraetilortossilicato (TEOS) reage com solução aquosa de ácido fosfórico (H₃PO₄), para a fonte dopante N, ou solução alcoólica de ácido bórico (H₃BO₃), para fonte dopante P.

A degradação corresponde ao aumento de sua viscosidade que impossibilita o espalhamento uniforme da solução sobre a lâmina de silício [1].

O conhecimento da durabilidade e a condição para conservar a solução SOG tipo N é um fator importante

na produção dos componentes eletrônicos. A técnica estatística que estuda o tempo de vida é conhecida como análise de sobrevivência ou de confiabilidade. Um dos objetivos desta técnica é a identificação do modelo (Log-normal, Weibull entre outros) que melhor se ajuste aos dados experimentais. Essa identificação permite obter as estimativas de tempo de vida e os riscos de falha ao longo do tempo. Uma característica que distingue de outras técnicas é a presença de dados censurados, isto é, observação parcial do tempo de falha.

2. Confiabilidade

A confiabilidade estuda a probabilidade de um produto ou sistema realizar adequadamente suas funções previamente estabelecidas num determinado tempo. O tempo T é a variável aleatória utilizada neste estudo e é medido a partir do início de sua operação até a sua falha. A falha é o estado anormal do componente ou sistema que não permite mais realizar o seu propósito [2].

A definição de confiabilidade é dada pela equação 1, onde f(t) corresponde à sua função densidade de probabilidade e é interpretada como a probabilidade de não falhar até o instante t.

$$R(t) = P(T \geq t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1)$$

A medida de risco é determinada pela função h(t) e é denominada de *hazard*. A medida de risco é dada pela equação 2, onde a expressão descreve a taxa de falha instantânea num intervalo infinitesimal [t, t+h) com t ≥ 0 e h → 0.

$$h(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P(t \leq T < t+h | T > t)}{P(T > t) \cdot h} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2)$$

A função de risco acumulado, H(t) descreve a taxa de falha acumulada e é dada pela equação 3.

$$H(t) = \int_0^t h(u) du \quad (3)$$

Dentre as várias funções densidade de probabilidade f(t), as mais utilizadas são a Weibull e a Log-normal e, seu uso decorre pela alta variabilidade em suas formas. Os dados de tempo de vida experimentalmente obtidos são utilizados para indicar o melhor modelo que se ajusta a eles e, com isso, as medidas de confiabilidade,

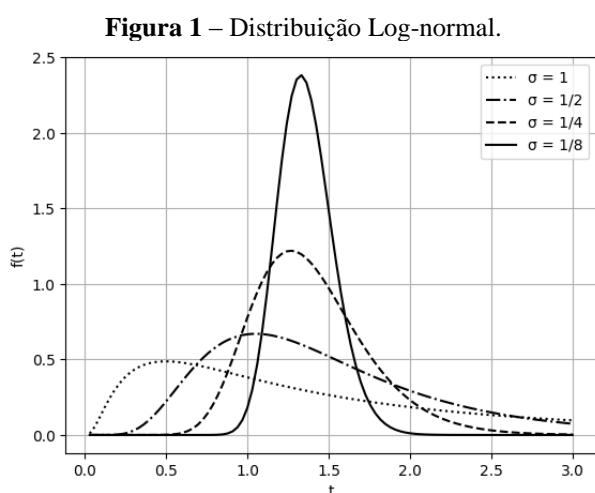
risco e risco acumulado podem ser obtidas e utilizadas [3, 4].

3. Distribuição Log-normal

A distribuição log-normal é um dos modelos de confiabilidade dito paramétrico e, seus parâmetros são representados por μ e σ , estes parâmetros controlam a forma da distribuição, ou seja, a localização e a assimetria da distribuição. A função densidade de probabilidade deste modelo é dada pela equação 4 [3][4].

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (4)$$

A forma da distribuição log-normal é ilustrada na Figura 1, e os parâmetros utilizados para a montagem das curvas de densidade de probabilidade foram de $\mu = 0,3$ e σ com diferentes níveis.



A confiabilidade é dada pela equação 5 e a função hazard é o quociente entre as equações 4 e 5 (equação 6).

$$R(t) = F \left(-\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right) \quad (5)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6)$$

4. Teste de Vida Acelerado

No estudo da durabilidade, é comum encontrar itens com tempo de vida muito longo que inviabilizam os testes de vida no campo. Nessas situações é necessário que seja realizado ensaios experimentais com condições mais severas ou sob condição de estresse.

O intuito do teste de vida acelerado é obter dados de tempo de vida num curto espaço de tempo para posteriormente projetar o tempo de vida em outras condições de operação menos severas como na condição normal de uso.

À medida que indica o nível de aceleração do tempo vida é o fator de aceleração (A_c) que considera uma estimativa da vida útil do produto, relacionando o tempo de vida esperada em condições normais de uso e sob condições de estresse, descrito na equação 7. Nesta expressão, L_0 é o tempo de vida em condição normal de uso e L_S é o tempo de vida em condição sob estresse.

$$A_c = \frac{L_0}{L_S} \quad (7)$$

Os parâmetros dos modelos de confiabilidade também devem ser ajustados de acordo com o fator de aceleração. Se o fator A_c e os parâmetros σ_a e μ_a do modelo Log-normal são conhecidos numa condição de temperatura T_a o ajuste do primeiro parâmetro é realizado por $\mu = \mu_a + \ln(A_c)$ e o segundo pode ser considerado igual, isto é, $\sigma = \sigma_a$ [3].

5. Modelo de Arrhenius

No estudo de cinética química a lei de Arrhenius descreve a taxa de reação química em função da temperatura de acordo com a equação 8. Nesta equação r é a taxa de reação, A é uma constante de reação, k é a constante de Boltzmann ($8,623 \times 10^{-5}$ eV/K), E_a é a energia de ativação (eV) e T é a temperatura em Kelvin.

$$r = A e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (8)$$

Rearranjando a equação 8, através do inverso da taxa de reação, é possível de obter uma relação do tempo (L) em função da Temperatura conforme a equação 9.

$$L = A e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (9)$$

Aplicando a transformação logarítmica é possível obter uma equação na forma linear (equação 10).

$$\ln L = \ln A + \left(\frac{E_a}{k} \right) \left(\frac{1}{T} \right) \quad (10)$$

Ao obter o tempo de vida em várias temperaturas distintas e usando a técnica estatística de regressão é possível estimar o valor da energia de ativação do mecanismo de falha do estudo [3].

6. Procedimento Experimental

A Tabela 1 mostra os reagentes utilizados na síntese das soluções dopantes SOG tipo N.

Tabela 1 – Composição das soluções dopantes.

Reagentes (mL)	Solução 1	Solução 2
Álcool isopropílico	23,5	23,5
TEOS (Tetraetilortosilicato)	10,0	10,0
H ₃ PO ₄ P.A.	1,0	1,5
H ₂ O destilada	3,0	2,5
Acetona (diluente)	10,0	10,0

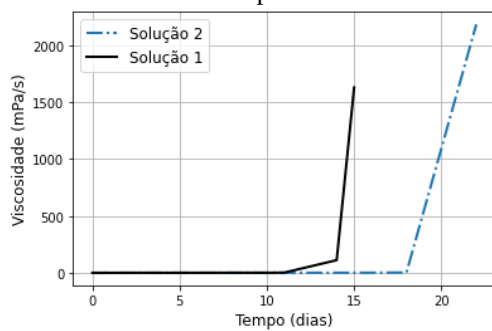
Três níveis de temperatura foram utilizados para o estudo: 8 °C, 17 °C e 35 °C.

Para cada solução, as amostras 1, 2, e 3 foram armazenadas a 8 °C, as amostras 4, 5 e 6 a 17 °C e as amostras 7, 8 e 9 a 35 °C.

7. Resultados

Inicialmente, avaliou-se diariamente o tempo de vida para as amostras mantidas a 17 °C, considerando-se as medidas da viscosidade de cada solução. A viscosidade é baixa no início e, com o passar do tempo aumenta lentamente até atingir valores próximos a 2,3 mPa/s. A partir deste ponto a viscosidade aumenta drasticamente, Figura 2.

Figura 2 – Viscosidade das soluções em função do tempo.



A Tabela 2 mostra os resultados dos parâmetros do modelo log-normal.

Tabela 2 – Resultados dos parâmetros da log-normal.

	Solução 1	Solução 2
Tempo de vida (Dias)	9,7	16,6
μ	2,21	2,81
σ	0,08	0,05

Em função dos resultados obtidos na Figura 2 e Tabela 2, em que a solução 1 apresentou menor durabilidade, essa solução não foi utilizada nos estudos de 8 °C e 35 °C.

O Quadro 1 mostra os tempos de vida de cada amostra e o sinal (+) é a indicação de dado censurado nos ensaios, isto é, o seu tempo de vida é maior que o indicado e o ensaio foi interrompido. No caso da amostra 1 o suporte danificou e, no caso das amostras 3 e 6 os ensaios foram interrompidos antes da ocorrência da falha.

Quadro 1 – Tempo de vida das amostras.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tempo (dias)	14+	74	90+	16	17	50+	1	1	1

Usando a Equação 10 e os valores do Quadro 1 a energia de ativação do mecanismo de falha é de 1,194 eV.

Ao considerar a temperatura de 35 °C como nível de estresse o fator de aceleração é 16,5, isto é, o tempo de

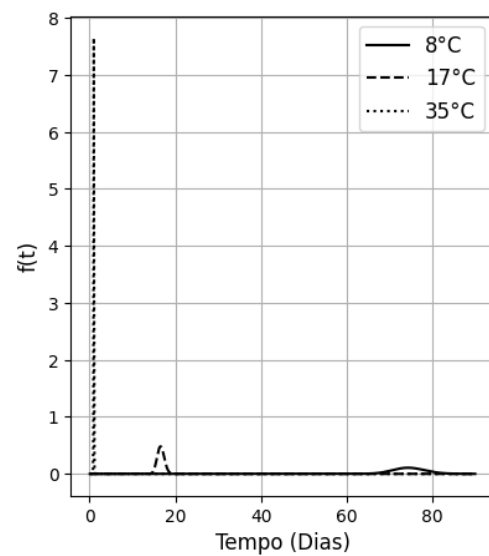
vida fica em 16,5 menor comparado quando na temperatura de 17 °C. O Quadro 2 mostra os parâmetros ajustados do modelo Log-normal da Solução 2.

Quadro 2 – Fator de aceleração e parâmetros da Log-normal.

	8 °C	17,2 °C	35 °C
Ac	0,234	1,000	16,500
μ	4,264	2,810	16,500
σ	0,050	0,050	0,050

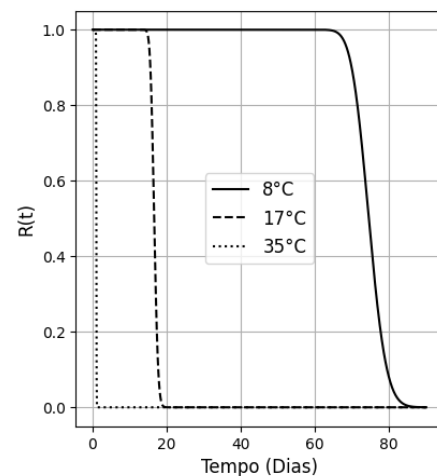
A Figura 3 mostra o formato da função densidade de probabilidade do tempo de vida nas três temperaturas estudadas.

Figura 3 – Função densidade de probabilidade.



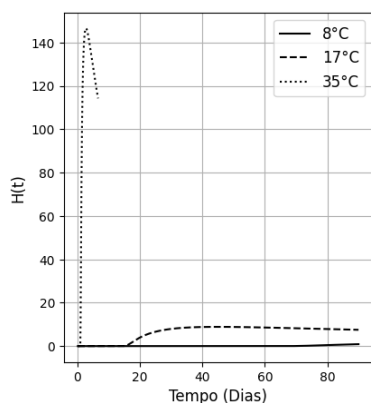
A Figura 4 mostra o gráfico de confiabilidade dos três modelos obtidos e percebe-se uma queda abrupta de confiabilidade em pontos específicos.

Figura 4 – Gráfico da confiabilidade R(t).



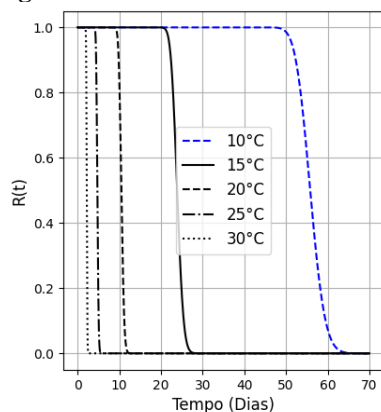
Na temperatura de 35 °C o tempo de vida é menor que um dia, a 17 °C próximo ao decimo quinto dia e a 8 °C um pouco acima do sexagésimo dia. As mesmas conclusões podem ser obtidas pelo gráfico do risco acumulado H(t) da Figura 5.

Figura 5 – Gráfico do risco acumulado $H(t)$.



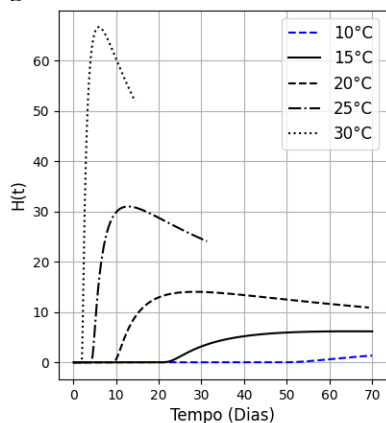
Uma vez obtido a energia de ativação e os parâmetros numa determinada temperatura é possível estimar os tempos de vida em outras condições. A Figura 6 mostra a curva de confiabilidade em cinco temperaturas: 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C. A Figura 7 mostra as curvas do risco acumulado $H(t)$ em cada uma das temperaturas citadas.

Figura 6 – Gráfico da Confiabilidade.



As Figuras 6 e 7 permitem estimar o tempo de vida em 50, 20, 8, 4 e 2 dias a 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C, respectivamente.

Figura 7 – Gráfico do risco acumulado.



Quadro 3 – Resultados descritos nas Figuras 6 e 7.

Temperatura (°C)	Confiabilidade		Taxa de falha
	Alta (1)	Baixa (0)	
10	49	63	49
15	21	27	22
20	9	12	9
25	5	6	5
30	2	2	2

8. Conclusões

Este trabalho quantificou o grau de relação entre a variável temperatura e o tempo de vida da solução SOG tipo N. Foi criado um procedimento experimental para caracterizar a confiabilidade de uma solução que a falha pode ser identificada pela sua viscosidade.

A energia de ativação do mecanismo de falha é de 1,194 eV e, a 35 °C (condição de estresse), o fator de aceleração foi de 16,5 comparado à temperatura de 17,2 °C.

O modelo de confiabilidade utilizado foi o Log-normal e a estimativa de tempo de vida a 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C foram, respectivamente, de 50, 20, 8, 4 e 2 dias.

Os resultados deste trabalho permitem que os usuários da solução SOG tipo N possam planejar a condição de armazenamento para o período de seu uso.

Agradecimentos

Ao técnico Filipe de Oliveira Pereira Delboni do Laboratório de Processos e Dispositivos da FATEC-SP e à FATEC-SP pela oportunidade do uso dos equipamentos.

Referências Bibliográficas

- [1] HERNANDES, Cristiane S. “Difusão de Estanho e Implantação Iônica de Magnésio em AsGa”. 1993.
- [2] CONTAR, T. de S. (2011). Influência dos Valores Censurados na Determinação da Concentração Média de Variáveis de Qualidade da Água. 81p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.
- [3] FOGLIATTO, Flávio S. e RIBEIRO, José Luis D. Confiabilidade e Manutenção Industrial. 2009.
- [4] COLOSIMO, Enrico A. e GIOLO, Suely R. Análise de Sobrevivência Aplicada. Ed. Blucher. São Paulo, 1ª edição, 2006.