

doi <https://doi.org/10.18265/2447-9187a2022id8062>

ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 08/10/2023

APROVADO 15/12/2023

PUBLICADO ON-LINE 29/12/2024

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 28/07/2025

EDITORA ASSOCIADA

Profa. Dra. Mariana Amorim Fraga

# Cristalização de filmes finos de silício amorfo depositados por RF magnetron sputtering após difusão de dopantes

 Luís da Silva Zambom <sup>[1]</sup> \*  
 Igor Yamamoto Abe <sup>[2]</sup>  
 Nelson Ordóñez <sup>[3]</sup>  
 Ricardo Cardoso Rangel <sup>[4]</sup>  
 Ronaldo Domingues Mansano <sup>[5]</sup>

[1] zambom@fatecsp.br  
[4] rrangel@fatecsp.br  
Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATECSP), São Paulo, São Paulo, Brasil

[2] igor.abe@usp.br  
[3] nordonez@lsi.usp.br  
[5] mansano@usp.br  
Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil

\* Autor para correspondência.

**RESUMO:** Filmes finos de silício foram depositados usando a técnica de pulverização catódica por magnetron RF (*RF magnetron sputtering*), com potência elétrica variando de 300 W a 400 W e tempos de processamento de 40 a 90 minutos, a temperatura intrínseca de 100 °C. O objetivo foi investigar a potencial substituição de filmes de silício policristalino, obtidos por deposição química de vapor de baixa pressão, para fabricar transistores MOSFET. Em uma atmosfera de nitrogênio, os filmes foram submetidos à difusão dopante tipo n (fósforo) a 1150 °C por 60 minutos. As características cristalográficas dos filmes de silício foram analisadas usando difração de raios X e espectroscopia Raman. Sob todas as condições de deposição, os filmes exibiram uma fase amorfa. Os difratogramas permitiram o cálculo do tamanho médio de grão, que variou entre 13 nm e 25 nm, distribuídos dentro de uma matriz amorfa. A microscopia de força atômica revelou baixos níveis de rugosidade nos filmes amorfos depositados e naqueles submetidos à etapa de difusão de dopante. A resistência da folha dos filmes de silício, medida antes e após o processo de difusão do dopante, foi determinada usando a técnica *Four-Point Probe*. Os resultados demonstraram uma correlação direta entre o aumento da condução elétrica e o crescimento do tamanho médio dos grãos.

**Palavras-chave:** cristalização; difusão térmica; filmes finos; silício amorfo.

## *Crystallization of amorphous silicon thin films deposited by RF magnetron sputtering after dopant diffusion*

**ABSTRACT:** Silicon thin films were deposited using the RF magnetron sputtering technique, with electric power ranging from 300 W to 400 W and processing times from 40 to 90 minutes, at an intrinsic temperature of 100 °C. The objective was to investigate the potential replacement of polycrystalline silicon films, obtained by low-pressure chemical vapor deposition, in the fabrication of MOSFET transistors.



OPEN ACCESS

The films underwent n-type dopant (phosphorus) diffusion at 1150 °C for 60 minutes in a nitrogen atmosphere. The crystallographic characteristics of the silicon films were analyzed using X-ray diffraction and Raman spectroscopy. Under all deposition conditions, the films exhibited an amorphous phase. The diffractograms enabled the calculation of the average grain size, which ranged from 13 nm to 25 nm, distributed within an amorphous matrix. Atomic force microscopy revealed low roughness levels in the amorphous deposited films and those subjected to the dopant diffusion step. The sheet resistance of the silicon films, measured before and after the dopant diffusion process, was determined using the Four-Point Probe technique. The results demonstrated a direct correlation between increased electrical conductivity and the growth of the average grain size.

**Keywords:** amorphous silicon; crystallization; thermal diffusion; thin films.

## 1 Introdução

Os circuitos integrados (CI), comumente conhecidos como “chips” semicondutores, são fundamentais para diversas indústrias, como a automotiva, por exemplo (Penteado, 2023). O dispositivo central da produção de CIs é o MOSFET (transistor de efeito de campo do tipo metal-óxido-semicondutor), considerado essencial para a indústria de semicondutores nos próximos anos, especialmente com a introdução da geometria de porta toda ao redor do canal (GAA, *gate all around*) (Bhol; Jena; Nanda, 2022). O potencial elétrico aplicado ao eletrodo de porta controla o funcionamento do transistor (Martino; Pavanello; Verdonck, 2003; Swart, 2008), tornando a obtenção do eletrodo de porta um aspecto crucial na fabricação dos “chips” semicondutores.

Um dos materiais mais utilizados para formar o eletrodo de porta de MOSFETs é o filme fino de silício policristalino altamente dopado. A principal técnica empregada na sua obtenção é a deposição química em fase vapor (CVD – *Chemical Vapor Deposition*), utilizando fontes gasosas (Kern; Ban, 1978). Entre os métodos de decomposição térmica de fontes gasosas, destacam-se o CVD à pressão atmosférica (APCVD – *Atmospheric Pressure CVD*) (Mousumi *et al.*, 2021), a pressão reduzida (LPCVD – *Low Pressure CVD*) (Rosler, 1977), a decomposição assistida por plasma (PECVD – *Plasma Enhanced CVD*) (Grübel *et al.*, 2021) e a ultra alto vácuo (UHVCVD – *Ultra High Vacuum CVD*) (Peng *et al.*, 2002).

Entre essas técnicas, o processo LPCVD destaca-se como o principal método para deposição de silício policristalino, inclusive em aplicações industriais, devido às suas vantagens, como elevada capacidade de produção em larga escala, maior tamanho de grão e simplicidade tecnológica. Contudo, a deposição de silício amorfo via LPCVD, seguida de cristalização térmica, emergiu como uma alternativa interessante na fabricação de transistores de filmes finos (TFTs – *Thin Films Transistors*) (Mimura *et al.*, 2000; Stewart *et al.*, 2001) e células solares (Meier *et al.*, 2002; Nasuno; Kondo; Matsuda, 2002).

Além dos filmes de silício policristalino, materiais com óxido de silício (Ivanda *et al.*, 2007), nitreto de silício (Zambom, 1994) e oxinitreto de silício (Souza, 2003) são amplamente utilizados na indústria de semicondutores. Recentemente, a técnica CVD tem sido empregada na síntese de diversos materiais, como grafeno (Feijó, 2017), carbono diamante (Brandão, 2014), nanotubos de carbono (Isoldi; Ozono; Mansano, 2023), nitreto de boro (Seravalli; Bosi, 2021) e, principalmente, materiais bidimensionais (2D) da

família dos dicalcogenetos de metais de transição (DMT), incluindo MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub> (An *et al.*, 2022; Cai *et al.*, 2018; Daminelli, 2019; Sun *et al.*, 2021), devido às suas propriedades óticas e eletrônicas.

Apesar das muitas vantagens e ampla aplicação na microeletrônica, as técnicas CVD apresentam limitações que devem ser consideradas. Entre elas, destaca-se o uso de gases extremamente tóxicos e altamente inflamáveis, além do elevado custo desses gases e da complexidade associada à importação e ao transporte especializado. Essas características tornam esses processos onerosos e, por vezes, inacessíveis a laboratórios universitários.

Este estudo propõe uma alternativa para a obtenção de filmes de silício policristalino, normalmente produzidos pela técnica LPCVD, por meio de um método que elimina o uso de gases tóxicos e inflamáveis, viabilizando sua produção em laboratórios universitários. O processo consiste na deposição de filmes amorfos de silício via *sputtering* utilizando argônio, seguida de tratamento térmico para cristalização parcial dos filmes.

Assim, o restante do trabalho apresenta uma sucinta fundamentação teórica (seção 2) e a descrição dos materiais e métodos utilizados (seção 3); em seguida, são apresentados os resultados obtidos (seção 4), bem como as conclusões (seção 5).

## 2 Breve fundamentação teórica

Nesta seção, são apresentados os fundamentos descritos na literatura especializada sobre a obtenção de filmes finos de silício policristalino por LPCVD, técnica amplamente utilizada para essa finalidade, além da técnica de deposição por *sputtering* e da cristalização do silício amorfo, alternativas exploradas neste estudo.

### 2.1 LPCVD

O processo LPCVD é uma técnica versátil que possibilita a deposição de diferentes materiais, como silício (Grübel *et al.*, 2021; Mousumi *et al.*, 2021; Rosler, 1977), nitreto de silício (Yang; Gaspar; Paul, 2008; Zambom, 1994), óxido de silício (Ivanda *et al.*, 2007; Morales *et al.*, 2007), oxinitreto de silício (Halova *et al.*, 2005; Modreanu *et al.*, 1999), entre outros, utilizando variados gases. No caso do silício, o gás mais empregado é o silano (SiH<sub>4</sub>) diluído em nitrogênio.

De forma geral, a deposição de filmes finos por LPCVD é realizada em condições de pressão reduzida, variando entre 0,25 Torr e 2,0 Torr, e em temperaturas que oscilam entre 500 °C e 900 °C. Para o silício, a temperatura de processo situa-se entre 550 °C e 650 °C (Rosler, 1977; Sharma; Hooda; Sharma, 2014); para o nitreto de silício, entre 700 °C e 900 °C (Sharma; Hooda; Sharma, 2014; Yang; Gaspar; Paul, 2008; Zambom, 1994); e para o óxido de silício, entre 400 °C e 900 °C (Ivanda *et al.*, 2007; Zambom *et al.*, 2004).

A técnica de deposição por LPCVD apresenta, independentemente do material depositado, as seguintes características, segundo Zambom (1994): a) capacidade de processar um grande número de lâminas por corrida; b) baixa contaminação por particulados; c) boa uniformidade de espessura axial e radial; d) cobertura eficiente de degraus; e) baixa contaminação dos filmes por impurezas.

No caso de deposição de silício policristalino, independentemente da qualidade intrínseca do filme, é necessário considerar os seguintes aspectos (Airgas, 2023;

López; Bergueiro; Fidalgo, 2014): a) o gás silano é extremamente tóxico, apresentando um TLV (valor limite, *Threshold Limit Value*) – ou seja, a concentração máxima à qual uma pessoa pode ser exposta sem risco à vida – de 5 ppm; b) o gás silano é pirofórico, apresentando combustão espontânea ao entrar em contato com o ar, sem necessidade de uma fonte de ignição; c) é necessária a neutralização do gás não reagido durante a reação química de deposição; d) é imprescindível manter todo o sistema da linha gasosa, após o uso, sob atmosfera de nitrogênio (N<sub>2</sub>), para evitar reações químicas entre o gás silano e o oxigênio residual (advindo do ar e presente na tubulação), que resultariam na formação de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), causando obstrução da linha gasosa e do controlador de fluxo e massa (*Mass Flow Controller*, MFC); e) a decomposição do gás silano não reagido durante o processo de deposição pode gerar particulados no óleo da bomba de vácuo.

## 2.2 Silício policristalino LPCVD

A deposição de silício policristalino ocorre pela pirólise, ou seja, pela decomposição térmica do gás silano, mantendo-se a pressão do processo entre 0,2 Torr e 1,0 Torr. Esse controle de pressão visa evitar reações químicas homogêneas e favorecer as reações químicas heterogêneas, cujo produto é um material sólido caracterizado por alta densidade, baixa densidade de defeitos e excelente aderência.

É importante destacar que a formação do filme de silício policristalino não ocorre diretamente sobre a lâmina de silício. Para evitar a deposição epitaxial de silício, a lâmina deve estar previamente recoberta com um filme de óxido de silício.

A reação de decomposição do silano ocorre conforme representado na Equação 1, à temperatura de 650 °C (Pereira, 2008).



O silício policristalino pode ser dopado durante o processo de deposição ou após a deposição, utilizando técnicas como implantação iônica ou difusão de dopantes.

## 2.3 Processo *sputtering*

O processo *sputtering*, também conhecido como pulverização catódica, é uma técnica de deposição que faz parte dos processos conhecidos como PVD (*Physical Vapor Deposition*), ou deposição física por vapor. Nesse método, átomos são removidos da superfície de um material, denominado alvo, por meio de transferência de energia provocada pelo impacto de partículas, especificamente íons positivos, acelerados em um campo elétrico. Em seguida, o material removido condensa na superfície de um substrato, em condições de pressão reduzida entre 10 mTorr e 500 mTorr.

As partículas que atingem o alvo são geradas pela ionização de um gás inerte, geralmente argônio, devido à sua alta seção de choque. Além dos íons positivos, o plasma gerado contém elétrons, radicais e espécies neutras, formando um ambiente altamente reativo.

Existem diferentes variações do processo *sputtering*. A formação do plasma pode ocorrer por excitação em campo elétrico contínuo (d.c.) ou alternado (a.c.). O método

com campo contínuo é amplamente utilizado para deposição a partir de alvos metálicos, enquanto o segundo permite a utilização de alvos constituídos por materiais isolantes ou semicondutores.

Neste trabalho, foi utilizado um sistema de *magnetron sputtering* acoplado a um gerador de radiofrequência com frequência de 13,56 MHz para a deposição de silício.

## 2.4 Cristalização do silício amorfo

A transformação de um material amorfo para um material cristalino em fase sólida requer energia de ativação, que geralmente é fornecida por meio de energia térmica. No caso do silício, essa transformação ocorre em temperaturas superiores a 600 °C (Pangal, 1999; Subramanian *et al.*, 1997).

A cristalização é comumente realizada em fornos convencionais, que operam com aquecimento lento (Marcins *et al.*, 2011; Swart, 2008). Alternativamente, pode ser empregada a técnica de recozimento térmico rápido, na qual o aquecimento ocorre em poucos segundos ou minutos (Li, 2013). O tamanho dos grãos formados pode variar de algumas dezenas de nanômetros a cerca de 5 micrômetros, dependendo das condições de deposição e tratamento térmico (Pereira, 2008).

Neste trabalho, o filme de silício policristalino depositado por LPCVD foi substituído por filme de silício obtido via *sputtering*, método que dispensa o uso de gás silano. Avaliou-se a estrutura cristalina e a condutividade elétrica dos filmes depositados antes e após a etapa de difusão térmica de dopantes, dado que a cristalinidade e a dopagem são essenciais para a condução elétrica dos filmes de silício, viabilizando sua aplicação como porta em transistores MOSFET.

## 3 Materiais e métodos

Nesta seção, são descritos os procedimentos utilizados para a preparação das lâminas de silício e a deposição dos filmes de silício.

### 3.1 Limpeza de lâmina de silício

As lâminas de silício, com plano cristalino (100), tipo p, e resistividade entre 1Ω.cm e 10 Ω.cm, passaram pelas etapas de limpeza descritas na Tabela 1. Após a aplicação de cada solução química, foi realizado enxague com água deionizada de resistividade 18,2 MΩ.cm.

**Tabela 1** ►

Sequência de soluções químicas utilizadas na limpeza completa.  
Fonte: dados da pesquisa

Solução química	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
4 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 1 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	120	10
100 HF + 1 H <sub>2</sub> O	Ambiente	1
1 NH <sub>4</sub> OH + 1 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + 5 H <sub>2</sub> O	70	10
1 HCl + 1 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + 4 H <sub>2</sub> O	70	10
100 HF + 1 H <sub>2</sub> O	Ambiente	1

### 3.2 Oxidação térmica seca do silício

A oxidação térmica do silício foi conduzida imediatamente após o processo de limpeza, em ambiente de O<sub>2</sub> (fluxo de 2 L/min), a uma temperatura de 1150 °C, durante 40 minutos. Nessa condição, obteve-se uma espessura média do óxido de silício de 110,0 nm. A presença do óxido de silício é indispensável para separar o silício da lâmina do filme depositado.

### 3.3 Deposição de filme de silício por LPCVD

As condições de deposição de silício por LPCVD utilizadas como referência estão descritas na Tabela 2. Nessas condições, foi obtida uma espessura média de 550 nm para o filme de silício policristalino.

**Tabela 2** ►

Condições de deposição do silício por LPCVD.

Fonte: dados da pesquisa

Parâmetros	Valores
Vazão de SiH <sub>4</sub> (sccm)	49,5
Vazão de N <sub>2</sub> (sccm)	280
Pressão (mTorr)	500
Temperatura (°C)	630
Tempo do processo (minutos)	60

### 3.4 Deposição de filme de silício por sputtering

A deposição dos filmes de silício foi realizada utilizando um reator *magnetron sputtering* RF do tipo diodo, operando na frequência de 13,56 MHz. As condições de deposição estão detalhadas na Tabela 3.

**Tabela 3** ►

Condições de deposição do silício por sputtering.

Fonte: dados da pesquisa

Parâmetros	Valores
Gás do plasma	Argônio
Vazão de argônio (sccm)	70
Potência (W)	300 / 350 / 400
Alvo	Silício
Pressão (Torr)	9,5.10 <sup>-3</sup>
Temperatura (°C)	100
Tempo do processo (minutos)	40 / 60 / 90
Espessura (µm)	0,60 – 1,60

### 3.5 Difusão de dopantes tipo n

A fonte dopante tipo n foi sintetizada em laboratório a partir da mistura de 3 mL de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 1 mL de H<sub>2</sub>O, 10 mL de tetraetilortosilicato, 23,5 mL de álcool isopropílico e

10 mL de acetona, que atua na redução da degradação da solução química (Kawaguti, 2015). O produto obtido foi um composto líquido de composição química  $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ .

A aplicação da fonte dopante sobre as amostras foi realizada conforme as condições descritas na Tabela 4.

**Tabela 4** ►  
Condições de difusão  
do fósforo.  
Fonte: dados da pesquisa

Parâmetros	Valores
Volume dopante	1 mL
Rotação do <i>spinner</i>	1000 rpm
Cura do filme	200 °C/10 minutos
Temperatura de difusão	1150 °C
Tempo de difusão	60 minutos
Ambiente $\text{N}_2$	2 L/min

### 3.6 Análises realizadas

Nesta subseção, são descritas as técnicas empregadas para a caracterização dos filmes de silício depositados e dos filmes de óxido de silício. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Sistemas Integráveis (PSI) da Escola Politécnica da USP (EPUSP).

#### 3.6.1 Interferometria óptica

A interferometria óptica é uma técnica que permite medir diferenças de caminhos ópticos para determinar a espessura de filmes finos. Para sua aplicação, é necessário que o filme a ser analisado seja transparente ao comprimento de onda utilizado. Essa técnica foi empregada para determinar a espessura de filmes de óxido de silício.

Os valores de espessura dos filmes de óxido de silício foram obtidos com o Analisador de Espessura de Filme Fino, modelo F20 (Filmetrics Inc.), utilizando interferência por meio de luz branca.

#### 3.6.2 Perfilometria

A perfilometria é uma técnica utilizada para medir o perfil de superfícies e quantificar parâmetros como desníveis, alturas de patamares e rugosidade. Diferentemente da interferometria óptica, a perfilometria não requer que os filmes sejam transparentes, sendo, portanto, adequada para determinar a espessura dos filmes de silício depositados por *sputtering*.

As espessuras dos filmes de silício depositados por LPCVD e *sputtering* foram medidas utilizando o equipamento Profilometer Dektak 6M Stylus Profiler (Veeco).

### 3.6.3 Difração de raios X

A difração de raios X é o fenômeno de espalhamento da radiação eletromagnética que ocorre devido à interação do feixe de raios X incidente com os elétrons dos átomos em materiais cristalinos. A análise de difração de raios X dos filmes de silício foi realizada utilizando o difratômetro Empyrean (Malvern Panalytical), equipado com uma fonte de Cu com tensão de 60 kV e corrente elétrica de 100 mA.

### 3.6.4 Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman é utilizada para obter informações sobre a constituição de materiais, especialmente materiais transparentes. Nesse método, uma amostra é iluminada por luz monocromática, cujos fótons interagem com o material, resultando em espalhamento inelástico. A diferença entre os fótons espalhados e os não espalhados, conhecida como deslocamento Raman, fornece informações sobre as ligações atômicas no material.

O deslocamento Raman, associado às ligações Si-Si, foi analisado por meio de Espectroscopia Raman utilizando o Microscópio Raman Cofocal ALPHA 300R (WITEC), acoplado a uma fonte de laser verde com comprimento de onda de 532 nm e potência elétrica de 45 mW.

### 3.6.5 Microscopia de força atômica

A microscopia de força atômica foi utilizada para avaliar a qualidade superficial dos filmes de silício, permitindo determinar a rugosidade com precisão nanométrica.

A rugosidade superficial dos filmes de silício, antes e após o processo de difusão de dopantes, foi medida com o equipamento AFM Nanosurf easyScan 2.

### 3.6.6 Resistência de folha

A resistência de folha é uma medida de resistência elétrica de camadas finas de materiais, amplamente utilizada na área de semicondutores. Esse parâmetro é definido como a razão entre a resistividade do material e sua espessura, sendo expressa em unidades de  $\Omega$ /quadrado.

A resistência de folha dos filmes foi medida utilizando o medidor Quatro Pontas (FPP500 Four Point Probe, Veeco).

## 4 Resultados obtidos

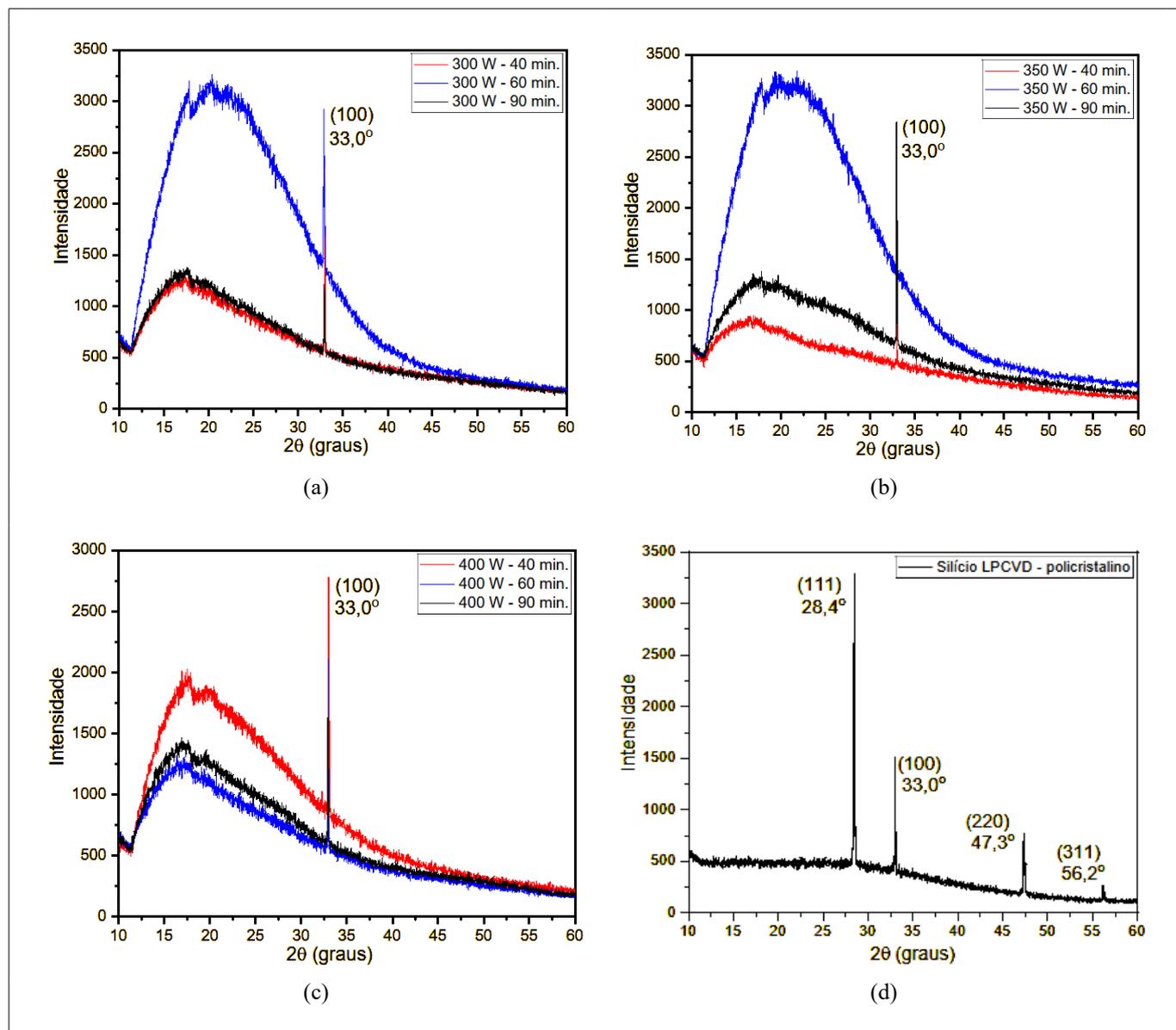
Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos após a deposição dos filmes de silício e a difusão de dopantes.

**Figura 1 ▼**

Difratogramas de silício depositado por *sputtering*:  
 (a) Processos de 300 W.  
 (b) Processos de 350 W.  
 (c) Processos de 400 W.  
 (d) Silício policristalino depositado por LPCVD.  
 Fonte: dados da pesquisa

#### 4.1 Resultados da análise de raios X

Os resultados da difração de raios X das amostras de silício após deposição são apresentados na Figura 1. Nas legendas das figuras, encontram-se indicados a potência de RF aplicada (em W) e o tempo de processo (em minutos), respectivamente. Na mesma figura, é exibido o difratograma de raios X do silício policristalino depositado por LPCVD, utilizado como referência para identificar as possíveis orientações cristalinas dos filmes de silício.



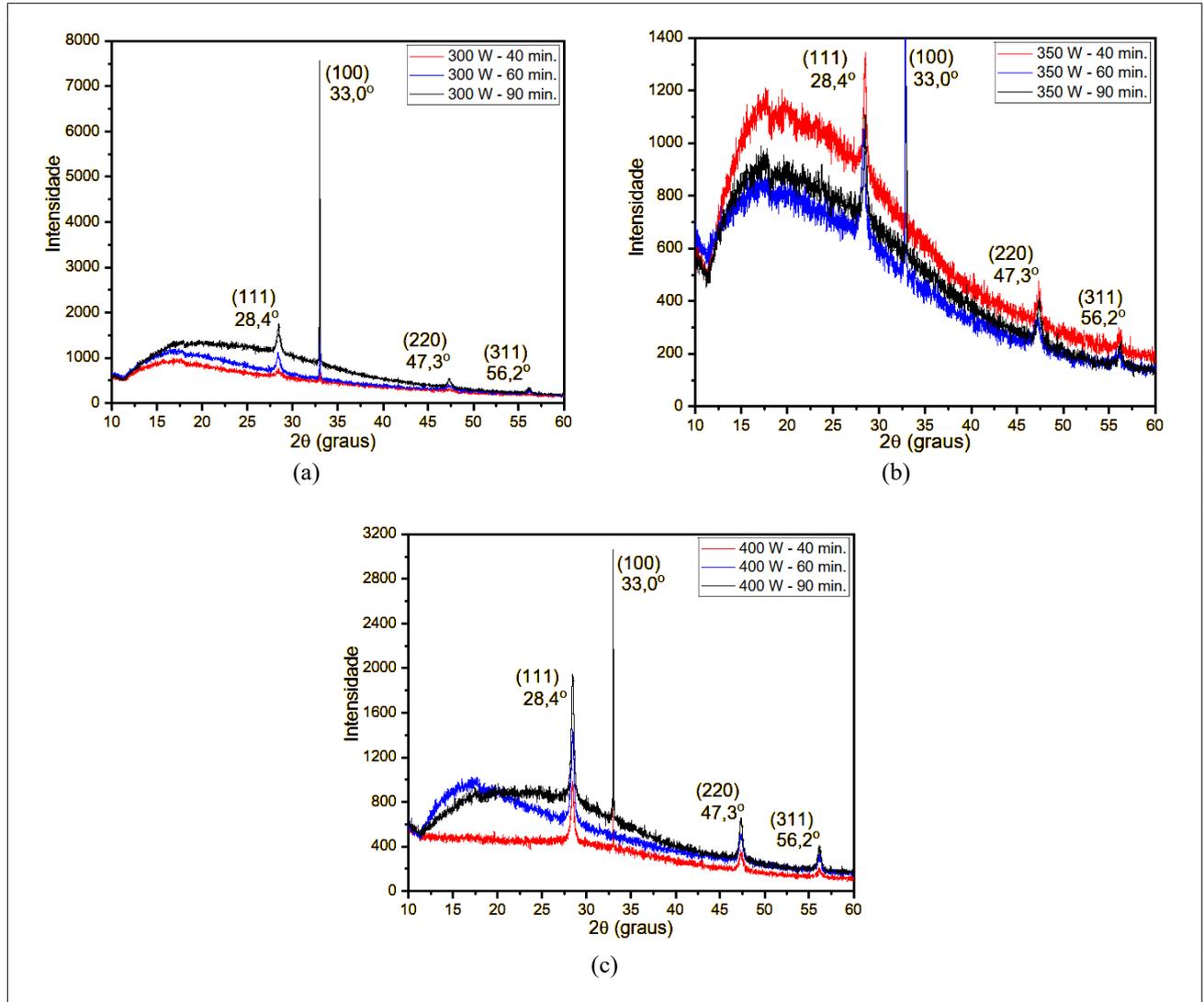
Todas as amostras de silício depositadas por *sputtering* apresentaram apenas o pico de difração relativo à lâmina de silício (100). Adicionalmente, a curvatura observada nos difratogramas indica a amorfização dos filmes.

Os difratogramas obtidos após a difusão de dopantes a 1150 °C por 60 minutos são mostrados na Figura 2. As condições de temperatura e tempo foram suficientes para

**Figura 2 ▼**

Difratogramas dos filmes após difusão: (a) Processos de 300 W. (b) Processos de 350 W. (c) Processos de 400 W.  
Fonte: dados da pesquisa

promover a cristalização parcial nos filmes de silício. Contudo, a presença de curvatura nos difratogramas sugere que parte do filme ainda permanece em estrutura amorfa.



#### 4.1.1 Cálculo do tamanho de grão

Os valores de tamanho de grão, calculados pela equação de Scherrer – Equação 2 (Etona; Araújo; Zambom, 2016; Smilgies, 2009) –, para o filme de silício depositado por LPCVD e os dados obtidos da literatura (RRUFF Project, [2023?]) são apresentados na Tabela 5. Na Tabela 6, encontram-se os valores de tamanho de grão para os filmes de silício depositados por *sputtering*, conforme as condições de processo descritas na Tabela 3, após a difusão de dopantes.

$$t = \frac{K \times \lambda}{B \times \cos \theta_B} \quad (2)$$

em que  $K = 0,89$  é o fator de forma para cristalitos esféricos,  $\lambda = 0,154$  nm é o comprimento de onda dos raios X,  $\theta_B$  é o ângulo de Bragg ( $\theta_B = 2\theta/2$ ) e  $B$  é a largura de meia altura, para  $2\theta_2 > 2\theta_1$  com  $2\theta_2$  e  $2\theta_1$  correspondendo aos valores de meia altura antes e após  $2\theta$ , respectivamente.

A largura de meia altura é calculada pela Equação 3:

$$B = (2\theta_2 - 2\theta_1) \times \frac{\pi}{180} \quad (3)$$

**Tabela 5** ▶

Valores de referência para o tamanho de grão do silício.

Fonte: dados da pesquisa

Referência	Plano cristalino	t (nm)
Si LPCVD 630 °C	(111)	50,63
	(220)	38,97
	(311)	74,23
RRUFF	(111)	161,90
	(220)	204,74
	(311)	148,69

**Tabela 6** ▶

Tamanho de grão (t) para os filmes de silício depositados por sputtering, após a difusão de dopantes.

Fonte: dados da pesquisa

Processo		Plano cristalino	t (nm)	
Potência (W)	Tempo (minutos)			
300	40	(111)	20,78	
		(220)	28,58	
		(311)	–	
	60	90	(111)	17,61
			(220)	12,99
			(311)	18,56
		40	(111)	23,83
			(220)	24,49
			(311)	21,70
350	60	(111)	25,32	
		(220)	16,81	
		(311)	21,70	
	90	60	(111)	18,44
			(220)	10,89
			(311)	12,40
		40	(111)	26,13
			(220)	31,77
			(311)	21,72
400	60	(111)	21,30	
		(220)	12,58	
		(311)	16,53	
	90	60	(111)	23,79
			(220)	15,32
			(311)	17,48
		40	(111)	23,14
			(220)	23,17
			(311)	22,82

De maneira geral, os tamanhos de grão obtidos apresentam valores menores quando comparados às referências. Essa redução pode ser atribuída à presença dos grãos em uma matriz amorfa, conforme indicado pelas curvaturas observadas nos difratogramas dos filmes após a difusão de dopantes.

Nas condições experimentais avaliadas, não foi identificada influência significativa da potência elétrica aplicada e do tempo de processo na cristalização dos filmes após a difusão de dopantes.

Essa baixa cristalização, evidenciada pelos tamanhos de grão reduzidos, sugere que, devido ao fato de os filmes apresentarem-se totalmente amorfos após a deposição, o aquecimento durante o processo de difusão de dopantes não foi suficiente para gerar cristalitas iniciais que possibilitassem o posterior crescimento dos grãos.

**Figura 3** ▼

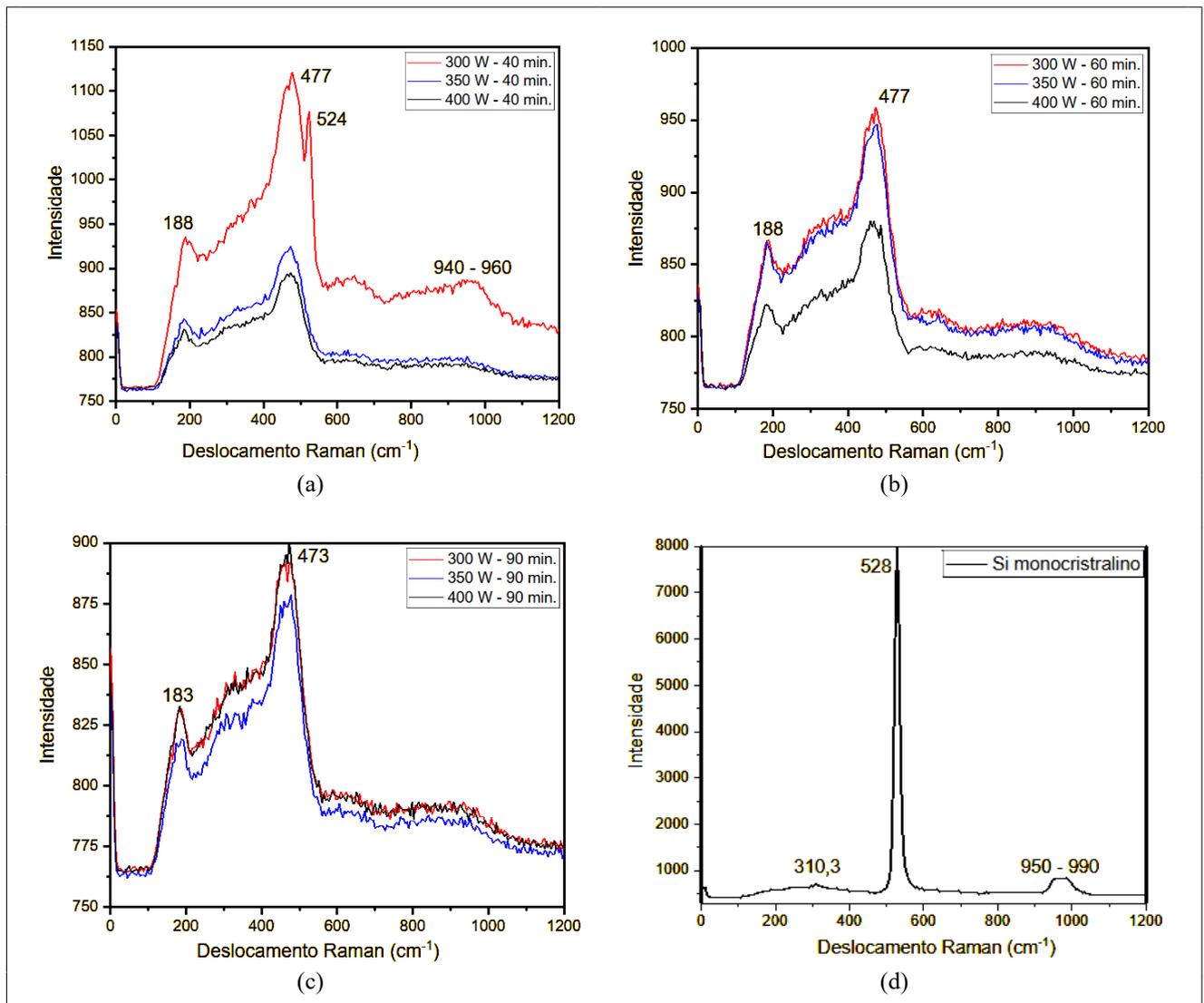
Espectros Raman dos filmes de silício após deposição.

- (a) Processos de 40 minutos.
- (b) Processos de 60 minutos.
- (c) Processos de 90 minutos.
- (d) Lâmina monocristalina de silício.

Fonte: dados da pesquisa

## 4.2 Resultados de análise Raman

Os espectros Raman das amostras de silício, após a deposição, são apresentados na Figura 3. Como referência para a cristalização do silício, foi incluído o espectro Raman de uma lâmina monocristalina de silício.



A amorfização dos filmes de silício, em comparação com o espectro da lâmina de silício, é observada nas seguintes características: deslocamento do pico em  $528\text{ cm}^{-1}$  para  $477\text{ cm}^{-1}$  (Smilgies, 2009), distorção e alargamento dos picos na região de  $477\text{ cm}^{-1}$ , surgimento de um pico em  $180\text{ cm}^{-1}$  e desaparecimento da banda na região de  $950\text{ cm}^{-1}$ .

Os espectros Raman dos filmes de silício depositados por *sputtering*, após a difusão de dopantes a  $1150\text{ °C}$  por 60 minutos, são apresentados na Figura 4. Observa-se que os espectros mostram picos semelhantes aos do silício monocristalino (Figura 3d) em  $306\text{ cm}^{-1}$ ,  $523\text{ cm}^{-1}$  e na faixa de  $940\text{ cm}^{-1}$  a  $980\text{ cm}^{-1}$ , exceto para a amostra 300 W/40 min, que apresenta apenas o pico em  $523\text{ cm}^{-1}$ . Esses resultados indicam que a etapa de difusão foi suficiente para cristalizar os filmes amorfos de silício depositados por *sputtering*.

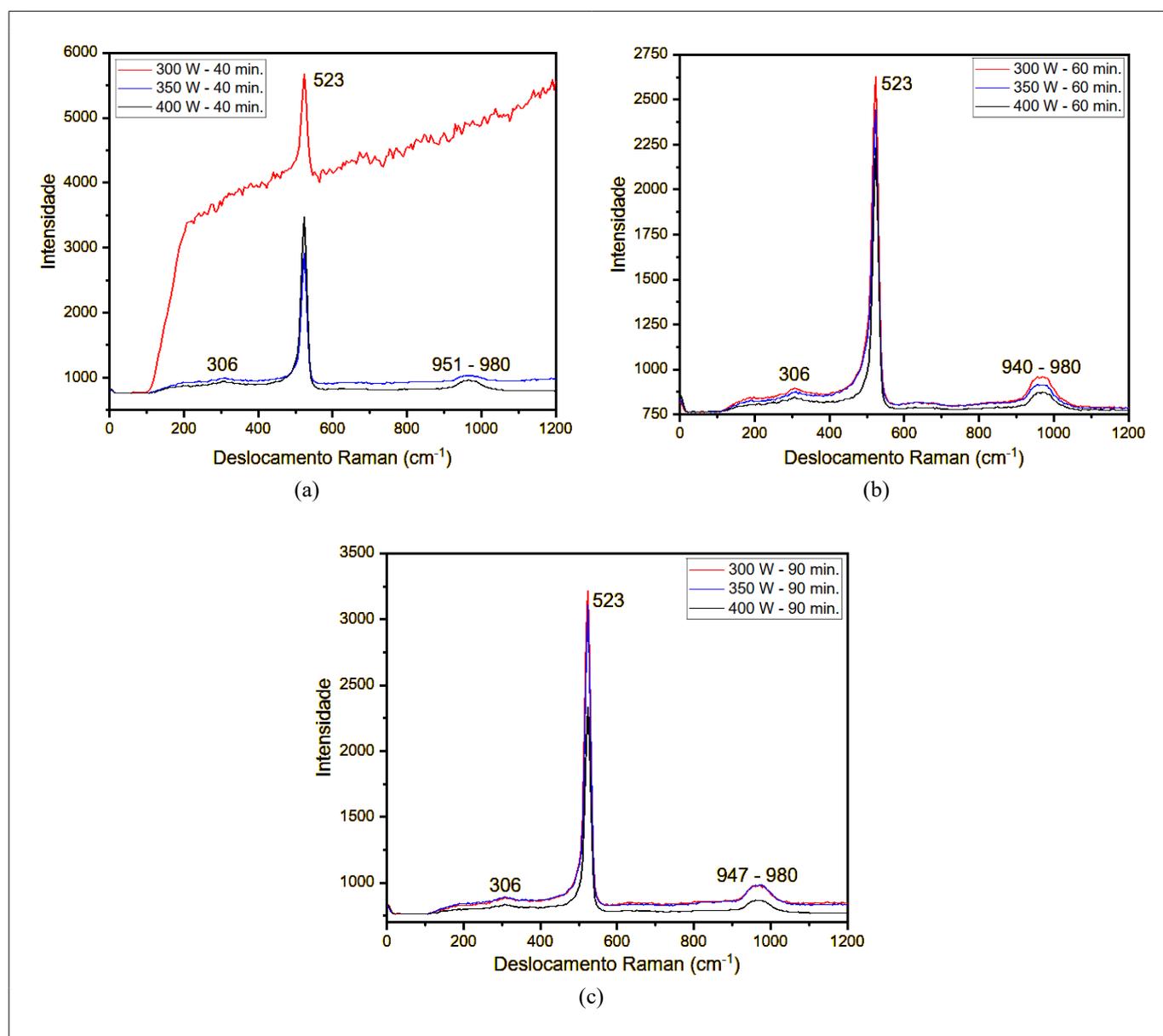
Assim, além da difração de raios X, a espectroscopia Raman confirma-se como uma técnica apropriada para determinar a natureza amorfa ou cristalina dos filmes de silício (Smit *et al.*, 2003).

**Figura 4 ▼**

Espectros Raman de filmes de silício após difusão de dopantes.

- (a) Processos de 40 minutos.
- (b) Processos de 60 minutos.
- (c) Processos de 90 minutos.

Fonte: dados da pesquisa



**Tabela 7 ▼**

Valores de rugosidade antes e após a difusão de dopantes para os filmes de silício depositados por LPCVD e *sputtering* em 300 W, 350 W e 400 W.

Fonte: dados da pesquisa

### 4.3 Microscopia de força atômica

Os valores de rugosidade Ra e Rq (RMS) foram determinados por meio do programa de análise de imagens AFM (Gwyddion, [2022]) e estão indicados na Tabela 7.

Amostra	Tempo do processo (minutos)	Antes da difusão		Após a difusão	
		Ra (nm)	Rq (nm)	Ra (nm)	Rq (nm)
Si LPCVD 630 °C	60	34,63	49,36	–	–
	40	3,732	4,644	11,49	14,83
300 W	60	3,618	4,318	7,993	9,717
	90	5,771	7,464	4,917	6,104
350 W	40	4,757	6,553	5,458	7,057
	60	5,754	7,470	4,755	5,802
400 W	90	4,072	5,112	8,766	10,59
	40	6,002	7,603	4,018	4,857
400 W	60	4,470	5,600	6,012	7,603
	90	7,100	8,933	7,153	9,514

Os valores de Ra e Rq antes da difusão revelam superfícies com baixa rugosidade, quando comparadas ao filme de silício depositado por LPCVD. Essas baixas rugosidades estão associadas à amorficidade dos filmes de silício depositados por *sputtering*, conforme evidenciado pelos resultados de difração de raios X (Figura 1) e espectroscopia Raman (Figura 3).

A baixa rugosidade também reflete a alta qualidade superficial dos filmes depositados por *sputtering*, independentemente da potência de radiofrequência aplicada. Após a difusão, observou-se um leve aumento da rugosidade, atribuído principalmente à formação de pequenos grãos. No entanto, pode-se inferir a possibilidade de danos na superfície dos filmes de silício devido à remoção do filme residual da fonte dopante.

### 4.4 Resistência de folha

Os filmes depositados, sem a etapa de difusão de dopantes, apresentaram valores de resistência de folha acima do limite máximo do equipamento de Quatro Pontas, caracterizando-se como altamente resistivos. Esses resultados corroboram os dados de difração de raios X e espectroscopia Raman, que indicam a amorficidade dos filmes.

Após a realização da etapa de difusão de dopantes, a presença de grãos possibilitou a diminuição da resistência de folha, conforme apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8** ▶

Valores de tamanho médio do grão e resistência de folha para lâmina de silício, silício depositado por LPCVD e silício depositado por *sputtering* em 300 W, 350 W e 400 W.

Fonte: dados da pesquisa

Amostra	Tempo do processo (minutos)	Tamanho médio do grão (nm)	Resistência da folha ( $\Omega/\square$ )
Lâmina Si <100>	–	–	4,93
Si LPCVD 630 °C	60	54,59	16,5
	40	24,68	11.500
300 W	60	16,39	2.200
	90	23,34	358
	40	21,28	600
350 W	60	13,91	4.900
	90	26,54	–
	40	16,80	480
400 W	60	18,86	260
	90	23,04	181

Os resultados demonstram uma relação direta entre o tamanho médio dos grãos e a redução da resistência de folha, exceto para a amostra de 300 W/40 minutos. Para o filme de silício policristalino depositado por LPCVD, a temperatura do processo destaca-se como o fator determinante para o tamanho final e a quantidade de grãos. Estes, embora em menor número, são menores em tamanho.

No processo *sputtering*, a temperatura máxima intrínseca ao procedimento é de aproximadamente 100 °C, insuficiente para iniciar a cristalização. Já a temperatura utilizada na difusão de dopantes, cerca do dobro da temperatura de processamento por LPCVD e dez vezes maior que a do *sputtering*, foi suficiente para gerar cristalitos, mas não para promovê-los a tamanhos maiores.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o processo de deposição de silício por *sputtering* deve ser realizado a temperaturas superiores a 500 °C, caso se deseje obter filmes com alta condutividade elétrica após a difusão de dopantes. Para filmes de silício policristalino obtidos por *sputtering*, com condutividade média e adequados para fabricação de transistores MOSFETs, as condições ideais foram estabelecidas como sendo 400 W por 90 minutos.

## 5 Conclusões

Filmes finos de silício foram obtidos por *sputtering* em diferentes condições de potência de RF e tempo de deposição, com temperatura de processo de 100 °C. Os filmes depositados apresentaram-se amorfos e, após a difusão de dopantes do tipo n a 1150 °C durante 60 minutos, sofreram cristalização.

Entretanto, a cristalização foi parcial, resultando em filmes com grãos de tamanho médio inferior a 25 nm, distribuídos em uma matriz amorfa, conforme indicado pelos resultados de difração de raios X.

Outro aspecto relevante da difusão de dopantes nos filmes de silício depositados por *sputtering* foi a redução da resistência elétrica, obtida em todas as amostras. Os filmes, a princípio altamente resistivos em sua forma amorfa, apresentaram uma relação de dependência entre a resistência de folha e o tamanho médio dos grãos, observando-se um aumento significativo da resistência para grãos com tamanho médio inferior a 20 nm.

Para aumentar o tamanho médio dos grãos após a difusão de dopantes, sugere-se a deposição de filmes finos de silício por *sputtering* em temperatura acima de 500 °C. Nessas condições, espera-se a formação de microcristalitos de silício durante a deposição, os quais favoreceriam o crescimento dos grãos durante a etapa de difusão de dopantes.

Nas condições de processamento desenvolvidas neste estudo, foi possível obter filmes cristalinos com resistência elétrica adequada para aplicação como material de porta na fabricação de transistores MOSFET, independentemente da técnica LPCVD. Esse avanço amplia significativamente as possibilidades de produção e estudo desses dispositivos, que são fundamentais na área de tecnologia de semicondutores.

## Financiamento

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

## Conflito de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

## Contribuições ao artigo

**ZAMBOM, L. S.; MANSANO, R. D.:** concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. **ABE, I. Y.; ORDONEZ, N.:** análise e/ou interpretação dos dados. **RANGEL, R. C.:** análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

## Referências

AIRGAS. **Safety data sheet**. Radnor, PA: Airgas, 2023. Disponível em: <https://www.airgas.com/msds/001073.pdf>. Acesso em: 6 dez. 2023.

AN, G. H.; KIM, S. J.; KIM, S.; SHIN, S. J.; CHOI, M.; KIM, D.; RAHMAN, I. N.; BANG, J.; KIM, K.; KIM, D. H.; LEE, H. S. Growth mode control of CVD-grown WS<sub>2</sub> monolayer flakes *via* O<sub>2</sub> pre-annealing for organic surfactant oxidation. **Applied Surface Science**, v. 585, 152564, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152564>.

BHOL, K.; JENA, B.; NANDA, U. Silicon nanowire GAA-MOSFET: a workhorse in nanotechnology for future semiconductor devices. **Silicon**, v. 14, p. 3163-3171, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01136-x>.

BRANDÃO, L. E. V. S. **Crescimento, dopagem e caracterização de filmes de nanodiamantes CVD**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/90316>. Acesso em: 18 dez. 2023.

CAI, Z.; LIU, B.; ZOU, X.; CHENG, H.-M. Chemical vapor deposition growth and applications of two-dimensional materials and their heterostructures. **Chemical Reviews**, v. 118, n. 13, p. 6091-6133, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00536>.

DAMINELLI, L. M. **Obtenção e caracterização de heteroestruturas bidimensionais (2D/2D) construídas a partir de materiais dicalcogenetos de metais de transição**. 2019. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/5406>. Acesso em: 17 dez. 2023.

ETONA, K. E.; ARAÚJO, V. M.; ZAMBOM, L. S. Obtenção de filmes finos de SnO<sub>2</sub> por evaporação reativa e tratados termicamente em ambiente de O<sub>2</sub>. **Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo**, v. 41, p. 35-41, 2016. Disponível em: <http://bt.fatecsp.br/media/bulletins/bt41v1.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2023.

FEIJÓ, T. O. **Crescimento de grafeno por CVD e sua interação físico-química com hidrogênio**. Dissertação (Mestrado em Microeletrônica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/159139>. Acesso em: 18 dez. 2023.

GRÜBEL, B.; NAGEL, H.; STEINHAUSER, B.; FELDMANN, F.; KLUSKA, S.; HERMLE, M. Influence of plasma-enhanced chemical vapor deposition poly-Si layer thickness on the wrap-around and the quantum efficiency of bifacial *n*-TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) solar cells. **Physica Status Solidi A**, v. 218, n. 16, 2100156, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.202100156>.

GWYDDION. **Gwyddion**: Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. [2022]. Disponível em: <http://gwyddion.net>. Acesso em: 10 dez. 2022.

HALOVA, E.; ALEXANDROVA, S.; SZEKERES, A.; MODREANU, M. LPCVD-silicon oxynitride films: interface properties. **Microelectronics Reliability**, v. 45, n. 5-6, p. 982-985, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2004.11.011>.

ISOLDI, M.; OZONO, E. M.; MANSANO, R. D. Síntese de nanomateriais estruturados de carbono via cavidade ressonante cilíndrica. **Revista Foco**, v. 16, n. 6, p. 1-7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n6-113>.

IVANDA, M.; GEBAVI, H.; RISTIĆ, D.; FURIĆ, K.; MUSIĆ, S.; RISTIĆ, M.; ŽONJA, S.; BILJANOVIĆ, P.; GAMULIN, O.; BALARIN, M.; MONTAGNA, M.; FERARRI, M.; RIGHINI, G. C. Silicon nanocrystals by thermal annealing of Si-rich silicon oxide prepared by the LPCVD method. **Journal of Molecular Structure**, v. 834-836, p. 461-464, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2006.09.036>.

KAWAGUTI, A. K. **Preparação de fonte dopante líquida de fósforo para dopagem de silício**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: [http://biblioteca.fatecsp.br/monografias/repositorio/Anderson\\_Kenji\\_Kawaguti.zip](http://biblioteca.fatecsp.br/monografias/repositorio/Anderson_Kenji_Kawaguti.zip). Acesso em: 18 dez. 2023.

KERN, W.; BAN, V. S. Chemical vapor deposition of inorganic thin films. *In*: VOSSSEN, J. L.; KERN, W. (ed.). **Thin film processes**. New York: Academic Press, 1978. p. 257-329.

LI, Q. **Investigation on solid-phase crystallization techniques for low temperature polysilicon thin-film transistors**. 2013. Master Thesis (Master of Science in Microelectronic Engineering) – Rochester Institute of Technology, Rochester, 2013. Disponível em: <https://scholarworks.rit.edu/theses/7217/>. Acesso em: 18 dez. 2023.

LÓPEZ, S.; BERGUEIRO, J.; FIDALGO, J. Silane. In: WEXLER, P. (ed.). **Encyclopedia of Toxicology**. 3. ed. New York: Academic Press, 2014. p. 261-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.01180-5>.

MARCINS, G.; BUTIKOVA, J.; TALE, I.; POLYAKOV, B.; KALENDARJOV, R.; MUHIN, A. Crystallization processes of amorphous Si by thermal annealing and pulsed laser processing. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 23, 012035, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/23/1/012035>.

MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. B. **Caracterização elétrica de tecnologia e dispositivos MOS**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

MEIER, J.; DUBAIL, S.; GOLAY, S.; KROLL, U.; FAÏ, S.; VALLAT-SAUVAIN, E.; FEITKNECHT, L.; DUBAIL, J.; SHAH, A. Microcrystalline silicon and the impact on micromorph tandem solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 74, n. 1-4, p. 457-467, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00111-3](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00111-3).

MIMURA, A.; SHINAGAWA, Y.; KAWACHI, G.; ONISAWA, K.; MINEMURA, T.; HARA, M.; ISHIDA, T.; TAKEDA, T. Flat and large poly-Si grains by a continuous process of plasma-enhanced chemical vapor deposition of a-Si and its direct laser crystallization. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 39, n. 8A, p. L779-L781, 2000. DOI: <https://dx.doi.org/10.1143/JJAP.39.L779>.

MODREANU, M.; TOMOZEIU, N.; COSMIN, P.; GARTNER, M. Optical properties of LPCVD silicon oxynitride. **Thin Solid Films**, v. 337, n. 1-2, p. 82-84, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01189-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01189-4).

MORALES, A.; BARRETO, J.; DOMÍNGUEZ, C.; RIERA, M.; ACEVES, M.; CARRILLO, J. Comparative study between silicon-rich oxide films obtained by LPCVD and PECVD. **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, v. 38, n. 1-2, p. 54-58, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2006.12.056>.

MOUSUMI, J. F.; ALI, H.; GREGORY, G.; NUNEZ, C.; PROVANCHA, K.; SEREN, S.; ZUNFT, H.; DAVIS, K. O. Phosphorus-doped polysilicon passivating contacts deposited by atmospheric pressure chemical vapor deposition. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 54, n. 38, 384003, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac0e5c>.

NASUNO, Y.; KONDO, M.; MATSUDA, A. Microcrystalline silicon thin-film solar cells prepared at low temperature using PECVD. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 74, n. 1-2, p. 497-503, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00065-X).

PANGAL, K. **Hydrogen-plasma-enhanced crystallization of hydrogenated amorphous silicon films: fundamental mechanisms and applications**. 1999. Doctoral Thesis (Doctorate in Electrical Engineering) – Princeton University, Princeton, 1999. Disponível em: <https://sturm.scholar.princeton.edu/phd-theses>. Acesso em: 18 dez. 2023.

PENG, D. Z.; ZAN, H. W.; SHIH, P. S.; CHANG, T. C.; LIN, C. W.; CHANG, C. Y. Comparison of poly-Si films deposited by UHVCVD and LPCVD and its application for thin film transistors. **Vacuum**, v. 67, n. 3-4, p. 641-645, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00255-5](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00255-5).

PENTEADO, S. Crise de escassez de semicondutores prejudica desde setor automotivo até programas de aceleradores de partículas, e tem disputa econômica entre EUA e China como complicador. **Jornal da UNESP**, 20 jan. 2023. Disponível em: <https://jornal.unesp.br/2023/01/20/crise-de-escassez-de-semicondutores-prejudica-desde-setor-automotivo-ate-programas-de-aceleradores-de-particulas-e-tem-disputa-economica-entre-eua-e-china-como-complicador>. Acesso em: 18 dez. 2023.

PEREIRA, L. M. N. **Produção e caracterização de silício policristalino e sua aplicação em TFTs**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/1942>. Acesso em: 18 dez. 2023.

ROSLER, R. S. Low pressure CVD production processes for poly, nitride, and oxide. **Solid State Technology**, v. 20, n. 4, p. 63-70, 1977.

RRUFF PROJECT. **Silicon R050145**. [2023?]. Disponível em: <https://rruff.info/Silicon>. Acesso em: 10 fev. 2023.

SERAVALLI, L.; BOSI, M. A review on chemical vapour deposition of two-dimensional MoS<sub>2</sub> flakes. **Materials**, v. 14, n. 24, 7590, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247590>.

SHARMA, N.; HOODA, M.; SHARMA, S. K. Synthesis and characterization of LPCVD polysilicon and silicon nitride thin films for MEMS applications. **Journal of Materials**, v. 2014, n. 1, 954618, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/954618>.

SMILGIES, D.-M. Scherrer grain-size analysis adapted to grazing-incidence scattering with area detectors. **Journal of Applied Crystallography**, v. 42, p. 1030-1034, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1107/S0021889809040126>.

SMIT, C.; VAN SWAAIJ, R. A. C. M. M.; DONKER, H.; PETIT, A. M. H. N.; KESSELS, W. M. M.; VAN DE SANDEN, M. C. M. Determining the material structure of microcrystalline silicon from Raman spectra. **Journal of Applied Physics**, v. 94, n. 5, p. 3582-3588, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1596364>.

SOUZA, D. C. P. **Estudo e produção de filmes de oxinitreto de silício (SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>) pela técnica de PECVD**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2003.tde-09062003-113450>.

STEWART, M.; HOWELL, R. S.; PIRES, L; HATALIS, M. K. Polysilicon TFT Technology for active matrix OLED displays. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 48, n. 5, p. 845-851, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1109/16.918227>.

SUBRAMANIAN, V.; DANKOSKI, P.; DEGERTEKIN, L.; KHURI-YAKUB, B. T.; SARASWAT, K. C. Controlled two-step solid-phase crystallization for high-performance polysilicon TFT's. **IEEE Electron Device Letters**, v. 18, n. 8, p. 378-381, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1109/55.605445>.

SUN, L.; YUAN, G.; GAO, L.; YANG, J.; CHHOWALLA, M.; GHARAHCHESHMEH, M. H.; GLEASON, K. K.; CHOI, Y. S.; HONG, B. H.; LIU, Z. Chemical vapour deposition. **Nature Reviews Methods Primers**, v. 1, 5, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43586-020-00005-y>.

SWART, J. W. Estruturas de Dispositivos Semicondutores. *In*: SWART, J. W. **Semicondutores: fundamentos, técnicas e aplicações**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. Cap. 9, p. 229-287.

YANG, J.; GASPAR, J.; PAUL, O. Fracture properties of LPCVD silicon nitride and thermally grown silicon oxide thin films from the load-deflection of long Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> diaphragms. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 17, n. 5, p. 1120-1134, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2008.928706>.

ZAMBOM, L. S. **Deposição de nitreto de silício por LPCVD**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.1994.tde-16082024-072450>.

ZAMBOM, L. S.; LANTIN, D. G.; ONODA, E.; VERDONCK, P. B. Non-stoichiometric silicon oxide deposited at low gaseous N<sub>2</sub>O/SiH<sub>4</sub> ratios. **Thin Solid Films**, v. 459, n. 1-2, p. 220-223, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.12.087>.