

Projeto, fabricação e testes de
sensores em silício para uso em
detecção de radiação

Dispositivos tipo LGAD fabricados em silício

Prof. Sebastião Gomes dos Santos Filho

Dispositivos tipo LGAD fabricados em silício

- Professor Sebastião Gomes dos Santos Filho: Responsável pela fabricação e testes de estruturas do tipo LGAD em silício.
- Alunos:
 - Marcos Norio Watanabe: aluno de doutorado (dedicação: 4 horas/semana)
 - Marcelo Luiz da Conceição: aluno de doutorado (início em 2024 com dedicação em tempo parcial)
- Publicações:
 - MARCELO LUIZ DA CONCEIÇÃO. Caracterização elétrica de diodos PIN e MOS operando como sensores de raios X. **2023**. Dissertação (**Mestrado em Engenharia Elétrica**) - Universidade de São Paulo, . Orientador: Sebastiao Gomes dos Santos Filho.
 - DA CONCEICAO, MARCELO L. ; WATANABE, MARCOS N. ; DOS SANTOS FILHO, SEBASTIAO G. . X-ray detection using MOS and PIN diodes biased in the constant reverse current or voltage modes. In: 2022 6th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (**INSCIT**), **2022**, Porto Alegre. 2022 6th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), 2022. p. 1-4.

Dispositivos tipo LGAD fabricados em silício

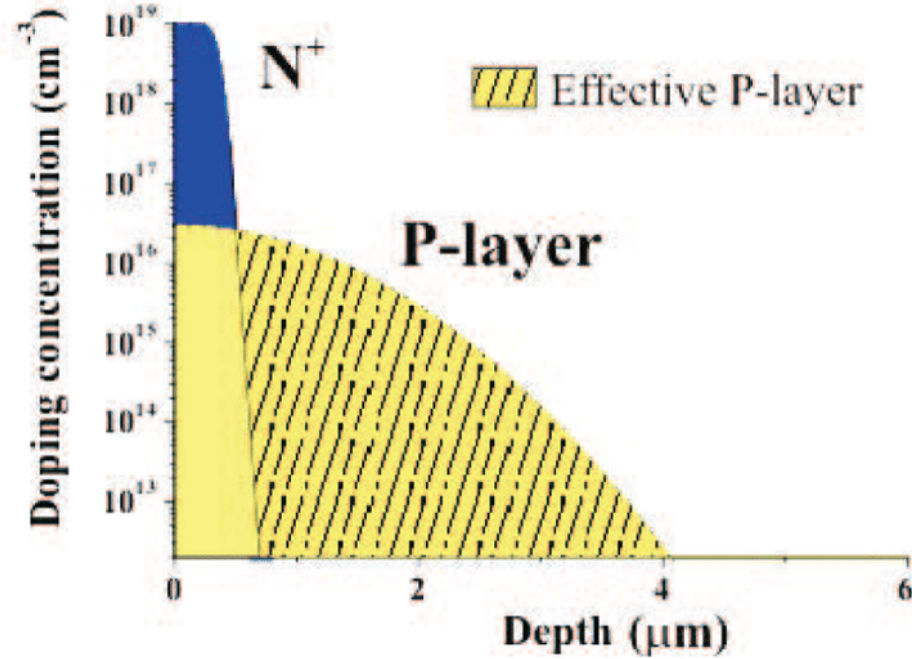
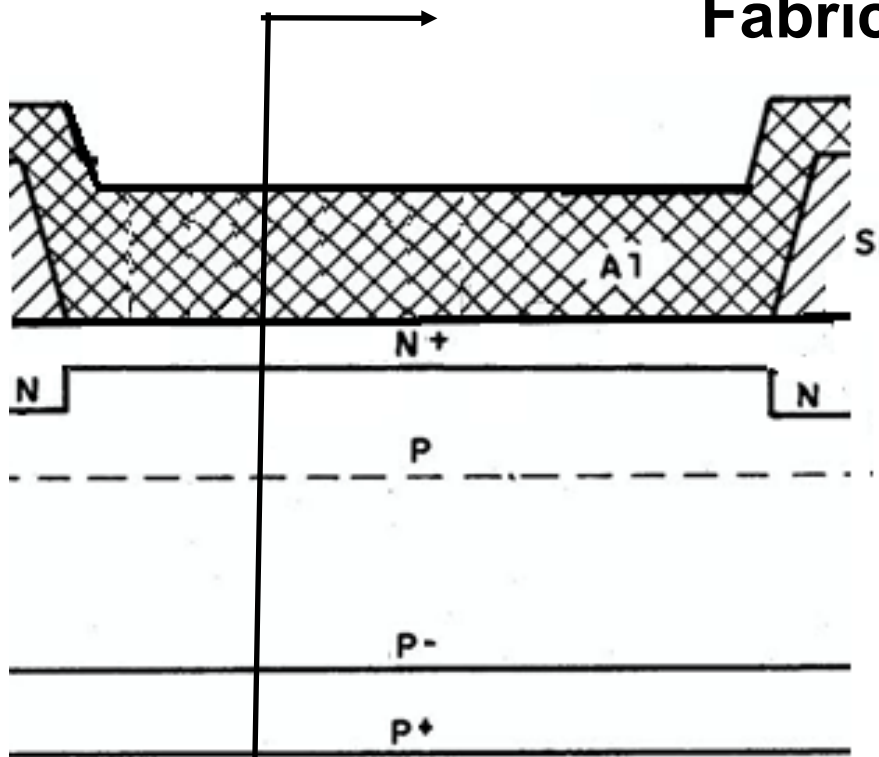
- Status atual:

- LGADs (Low Gain Avalanche Detectors) estão sendo desenvolvidos utilizando lâminas de silício tipo p- quase intrínsecas entre as regiões n+/p e p+ como indicado na figura. A camada p logo abaixo da camada n+, denominada camada de ganho, está sendo projetada para aumentar localmente o campo elétrico para ionização por impacto de elétrons, a fim de obter ganho de corrente interna no dispositivo.
- Recentemente, dielétricos de oxinitreto de silício (SiN_xO_y) entre o eletrodo de leitura e o volume dopado com silício p (região passiva do LGAD) foram construídas a fim de caracterizar eletricamente o mecanismo de corrente de tunelamento em função da intensidade dos raios X suaves ($E = 22,1 \text{ keV}$) variando a tensão de polarização do tubo de raios X na faixa de 0 a 45 kV e a corrente do filamento em até 100 μA

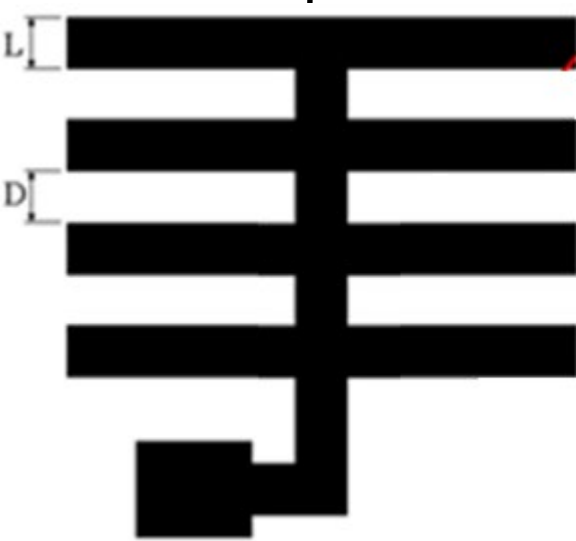
[DA CONCEIÇÃO, 2022 e 2023]

- Foram realizados com sucesso testes iniciais de difusões rasas N+ sobre camadas dopadas tipo P utilizando processamento térmico rápido a partir de óxido dopado com arsênio (spin on glass).

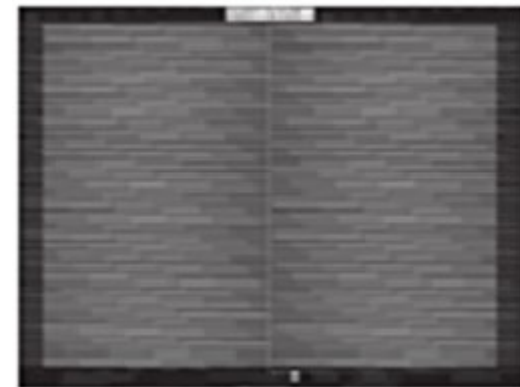
Fabricação do LGAD



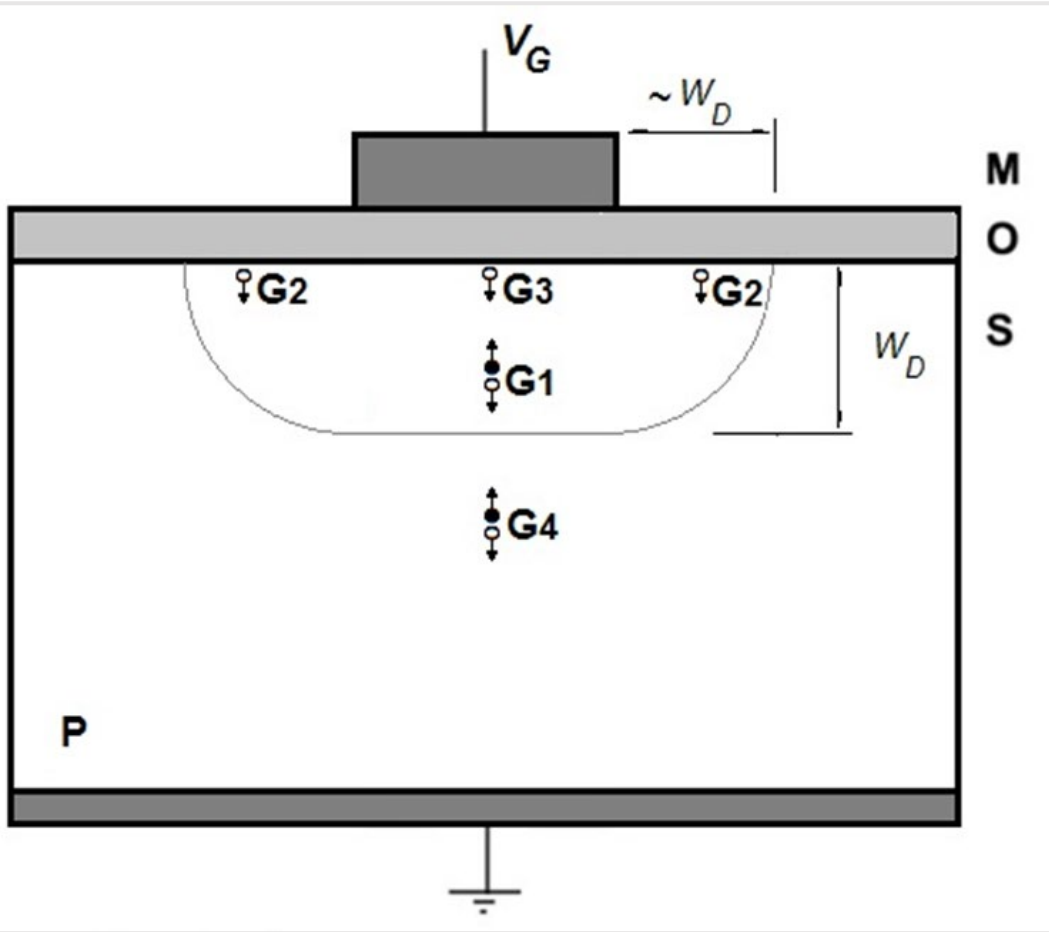
- Está em fase de fabricação um conjunto de 3 máscaras para a fabricação de estruturas LGAD com áreas de 0,25 a 4,00 cm².



Dispositivo	L (mm)	D (mm)	Nº L	A _g (cm ²)	Perímetro (cm)
50x50	50	50	180	1,63	651,6
50x100	50	100	120	1,09	434,4
100x100	100	100	90	1,63	325,8
100x150	100	150	71	1,34	257,0



Modelagem da camada de passivação de oxinitreto de silício (SiN_xO_y) entre o eletrodo de leitura e o volume dopado tipo p : - Corrente de tunelamento.



- A corrente de tunelamento constante através do diodo MOS irá alimentar uma largura de depleção estacionária W_D .
- Componentes da corrente total :
 - 1) geração térmica na região de depleção (**G1**),
 - 2) geração térmica na superfície da região adjacente à zona de depleção (**G2**),
 - 3) geração na superfície semicondutora sob a porta (**G3**),
 - 4) geração no corpo do semicondutor a uma distância menor ou igual a um comprimento de difusão das bordas da região de depleção (**G4**).

Modelagem da camada de passivação de oxinitreto de silício (SiNxOy) entre o eletrodo de leitura e o volume dopado tipo p : - Corrente de tunelamento.

$$\bullet I_R = qn_i \cdot \frac{A_G \cdot W_D}{\tau_g} + qn_i \cdot A_S \cdot S_o + qn_i \cdot A_G \cdot S + \frac{qn_i^2 \cdot D_n}{N_A \cdot L_n}$$

- A camada de passivação apresentou baixa corrente de fuga ($\sim 5 \text{ nA/cm}^2$) e baixo ruído do tipo “shot” para raios X com energia de 22.1 keV ($< 3 \text{ nV/cm}^2$)

q - carga elementar,

n_i - concentração intrínseca de portadores,

W_D - largura da região de depleção,

τ_g - tempo de geração de portadores minoritários,

S_o - velocidade de geração na porção lateral,

S - velocidade de geração sob a porta,

A_G - área de porta,

A_S - área superficial lateral da região de depleção,

N_A - dopagem do substrato,

D_n - constante de difusão dos portadores,

$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}$ - comprimento de difusão.

Fabricação e testes de Diodos PIN

Prof. Ronaldo Domingues Mansano (EPUSP)

Prof. Luis da Silva Zambom (Fatec/SP)

Fabricação e testes de Diodos PIN

- Professor Ronaldo Domingues Mansano: Responsável pela atividade de fabricação e testes de estruturas do tipo PIN em silício.
- **Colaboradores:**
 - Prof. Antonio Carlos dos Santos Arruda (Fatec/Osasco) (início em 2024 dedicação: 20 horas/semanais)
 - Prof. Luis da Silva Zambom (Fatec/SP) (dedicação : 8 horas/semanais)

Fabricação do diodo PIN



Esquema do diodo PIN

Substratos utilizados

Lâmina Addison – 3 PP – 8 – tipo P

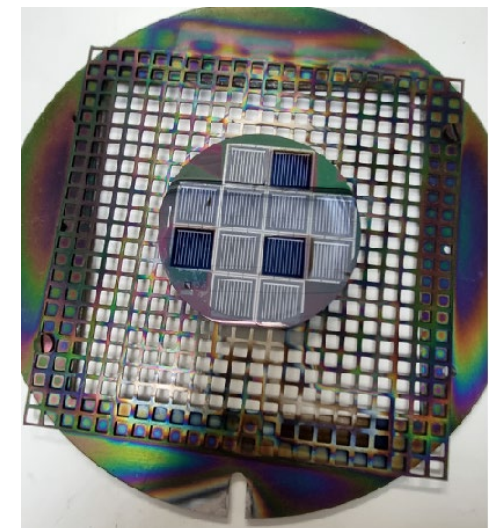
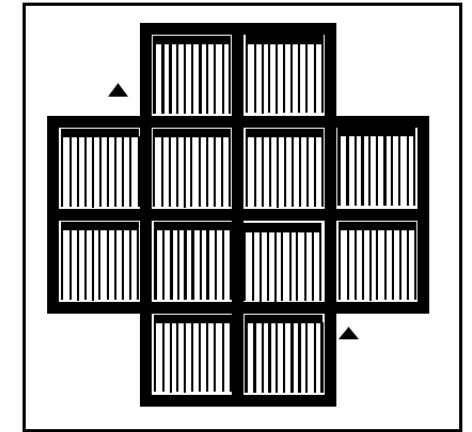
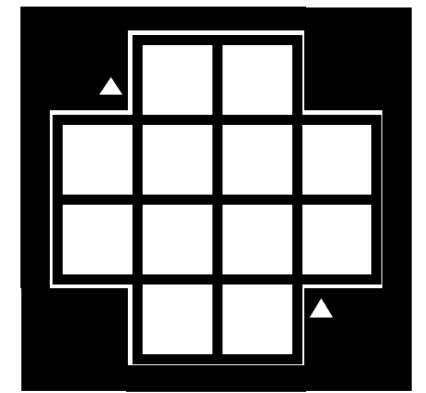
Frente – R (10^6 ohm/q)	Costas – R (10^6 ohm/q)	Espessura (um)	[B] átomos/cm ³
0,231	0,237	332	$1,778 \cdot 10^{12}$
0,234	0,232	331	
0,213	0,236	323	
0,229	0,225		

[B] foi calculada, utilizando o site <https://www.pvlighthouse.com.au/resistivity>, a partir do valor de resistividade (Rq = resist./espessura)

Espessura medida por micrômetro

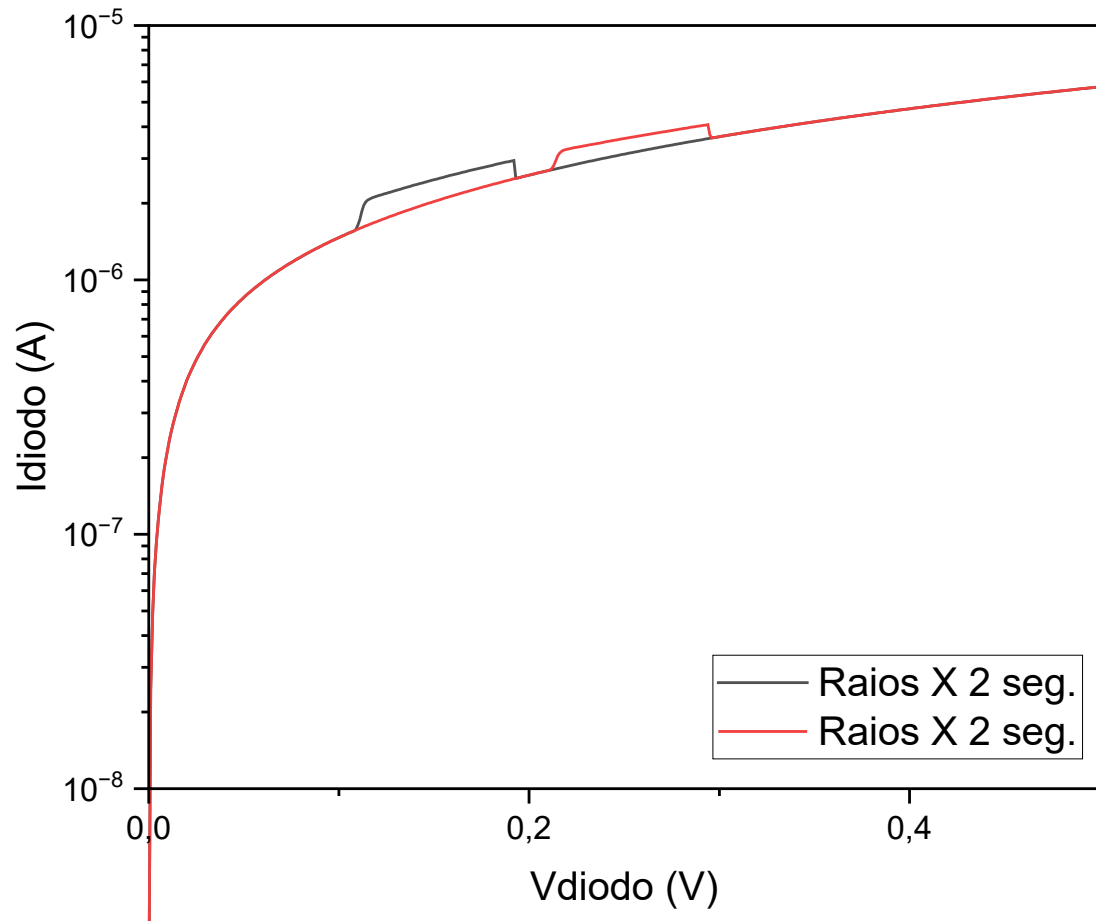
Etapas realizadas

- Limpeza dos substratos
- Oxidação úmida de 1h20min. / 1150 °C / O₂ 1L/min / H₂O = 98 °C- espessura obtida 100nm.
- Litografia diodo: máscara 1 em fotolito
- Corrosão do SiO₂ lado polido
- Difusão do lado polido : Temp. 1150 °C / 45 min. / N₂ 5 L/min / SOG p (2 mL) / costas: SiO₂
- Remoção do SiO₂ costas – BOE: 16 minutos, utilizando a peça de teflon para proteger a frente
- Difusão tipo n e p ao mesmo tempo. Difusão p novamente, para diminuir Rq. Temp. = 1150 °C, Tempo= 45 min. N₂ = 5 L/min, SOG n (3,8 M) = 2 mL, SOG p (10,0 mL) = 2 mL
- Metalização – contatos: Evaporação de alumínio
- Litografia diodo: máscara 2 em fotolito
- Corrosão do alumínio
- Deposição do contato de substrato: alumínio – costas

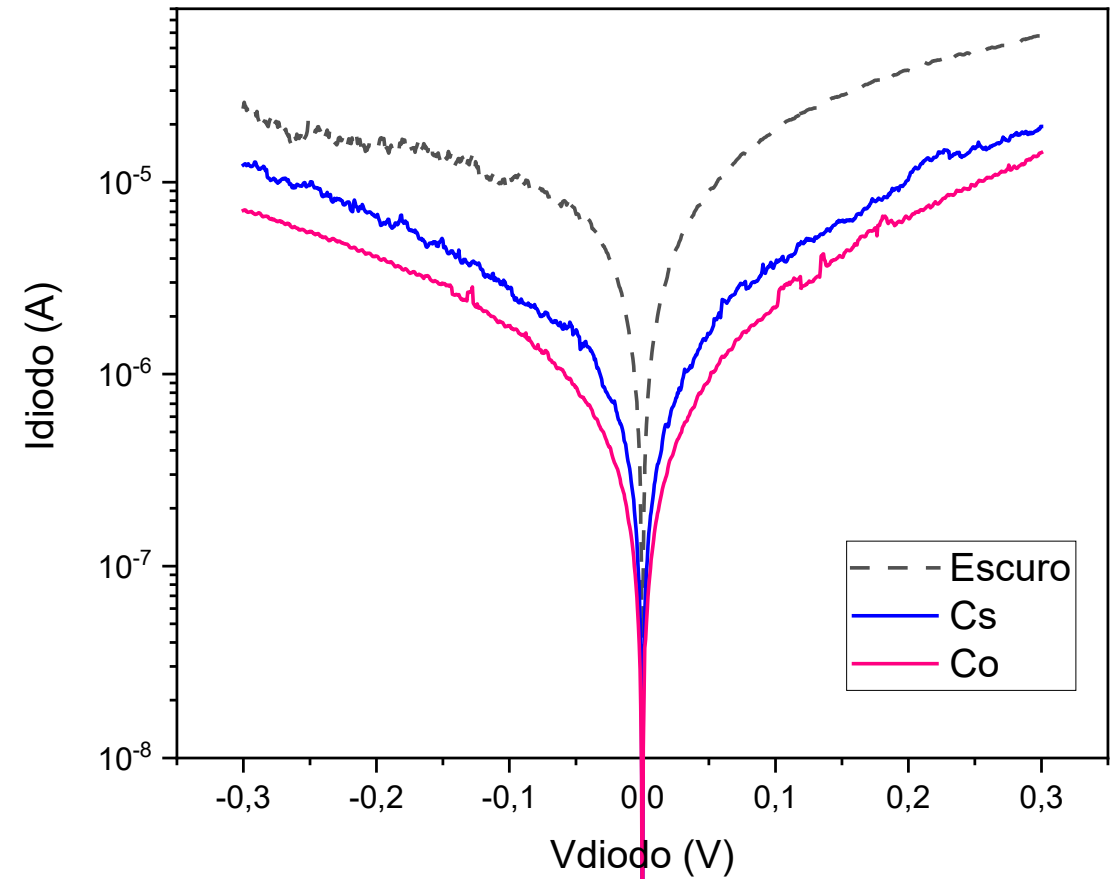


Análise Elétrica com raios X / Fontes radioativas

- Raios X

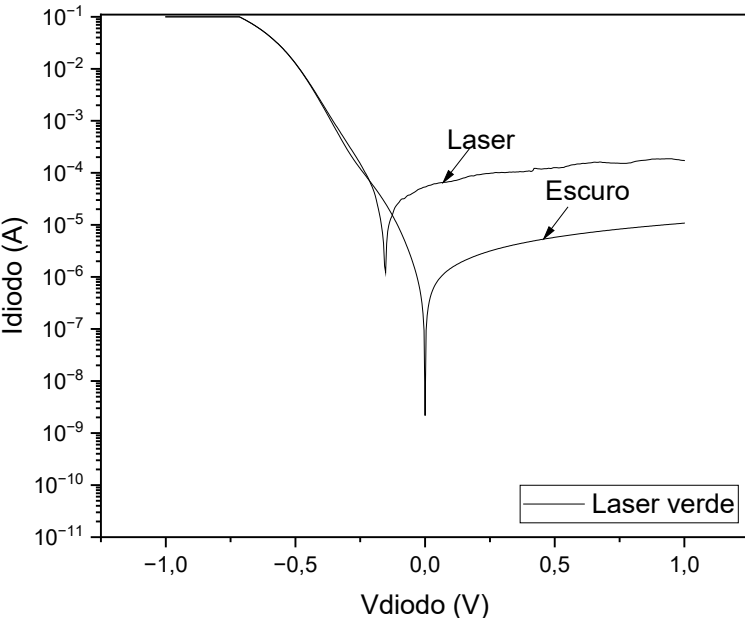


- Fontes Radioativas

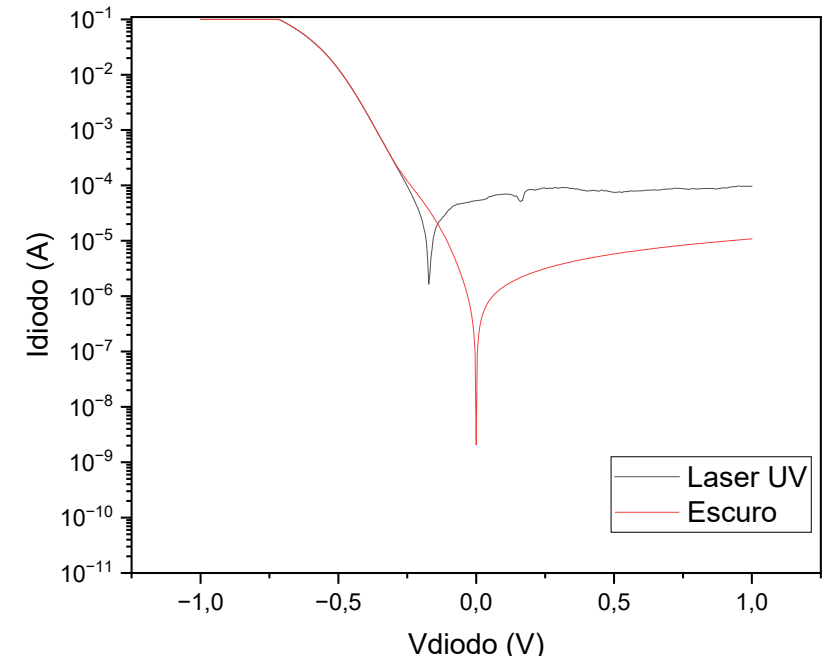


Análise Elétrica com LEDs / Laser UV

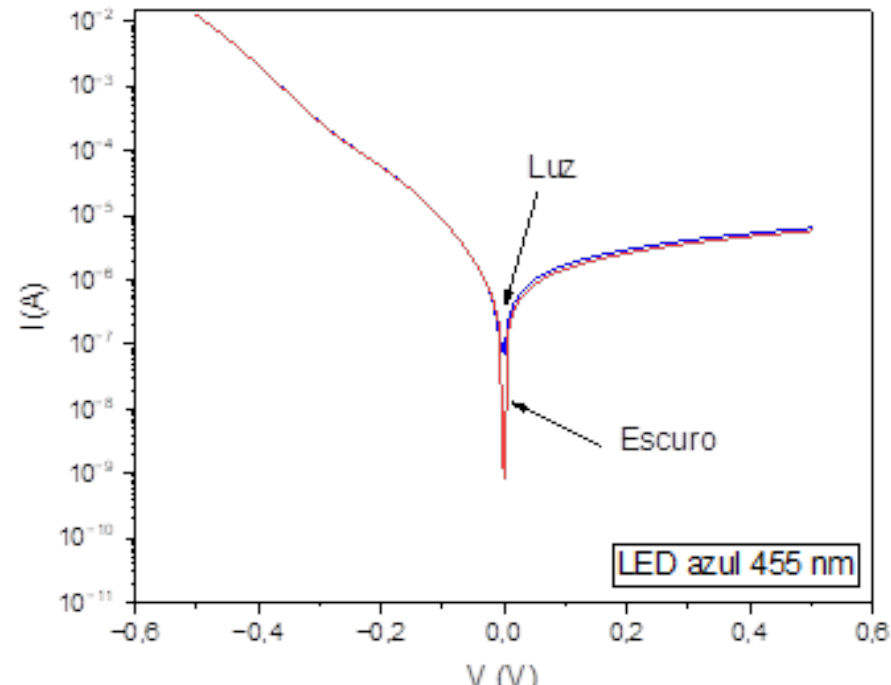
- Laser Verde



- Laser UV



- Leds



Etapas em andamento

- Calibração dos fornos de difusão e oxidação.
- Manutenção do spinner para a deposição do material para a difusão.
- Importação dos substratos de silício intrínseco e epitaxial
- Projeto do circuito elétrico de condicionamento de sinal e testes
- Montagem de um sistema de refrigeração autônomo
- Montagem de um sistema de criogenia para os testes com radiação.
- Preparação de novas fontes de difusão.
- Preparação de um novo sistema de exposição a raios X de estado sólido.
- Montagem de um sistema de análise com raios X característicos.

Próximas etapas

2024

- Uso de substratos intrínsecos
- Uso de substratos epitaxiais
- Projeto de nova máscara litográfica para os sensores com dimensões adequadas aos testes a serem realizados no IFUSP
- Simulação das estruturas (estamos procurando um aluno)
- Simulação dos circuitos de condicionamento e testes (estamos procurando um aluno)

2025

- Integração de estruturas com 4 e 16 sensores.
- Integração com circuito de condicionamento de sinais
- Estudo da possibilidade de fazer a implantação por transmutação por nêutrons (em discussão com o IPEN)