

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

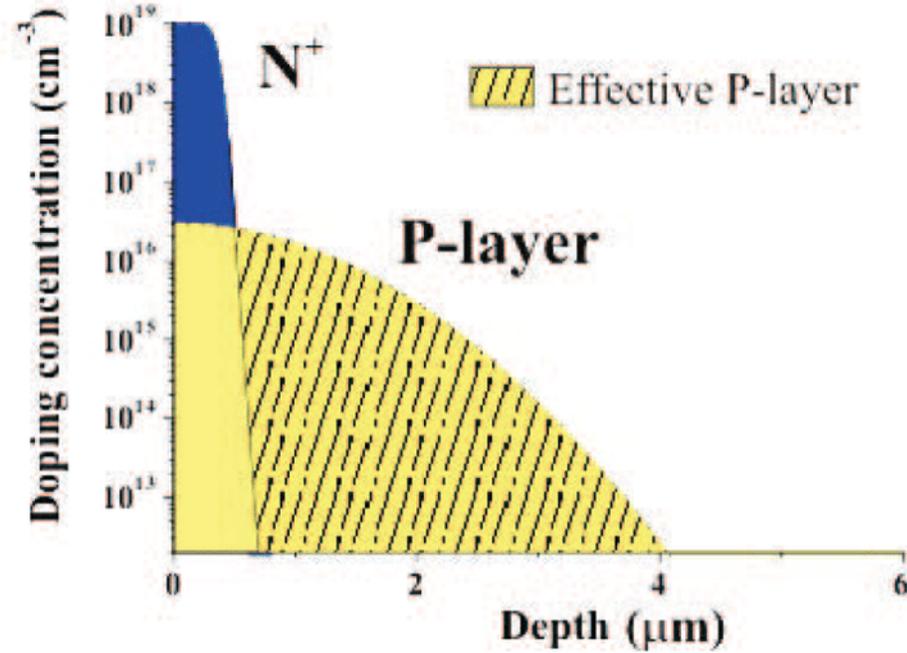
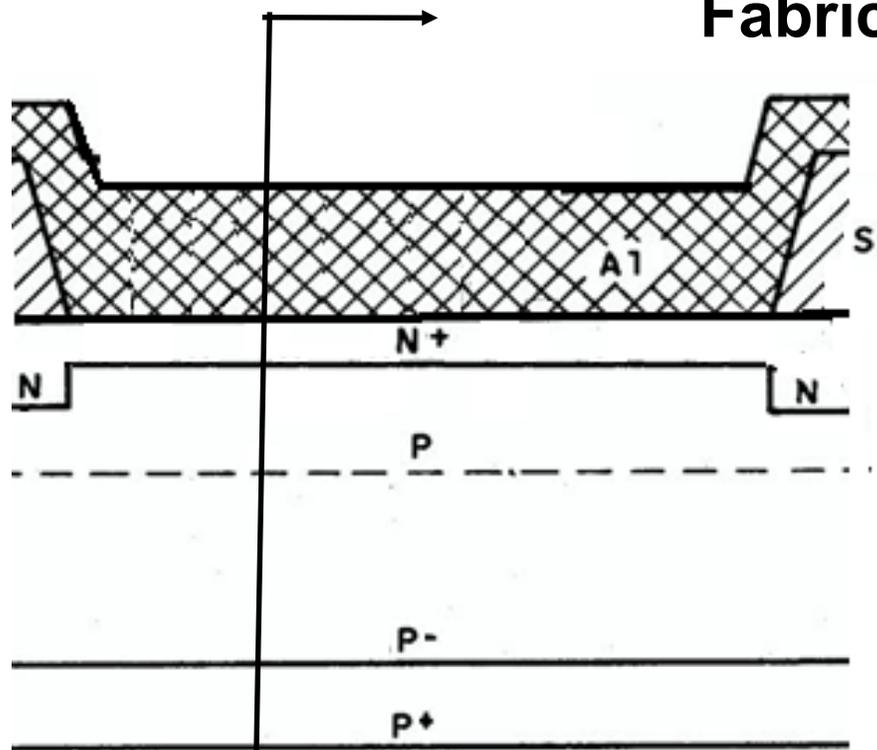
- Status atual:

- 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

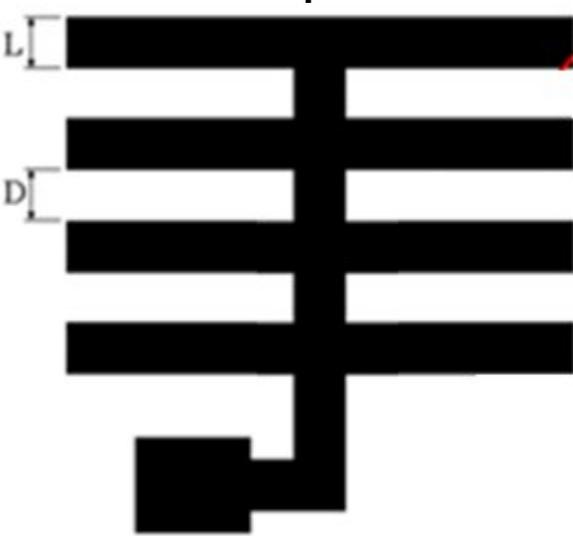
[DA CONCEIÇÃO, 2022 e 2023]

- 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).

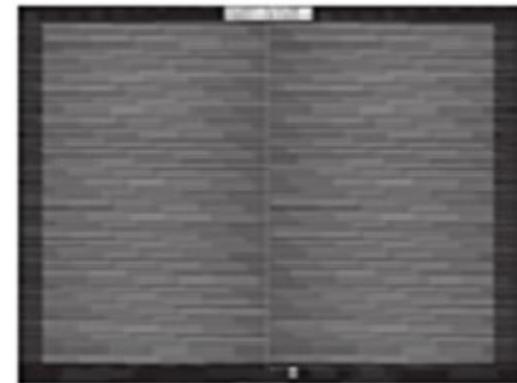
Fabricação do LGAD



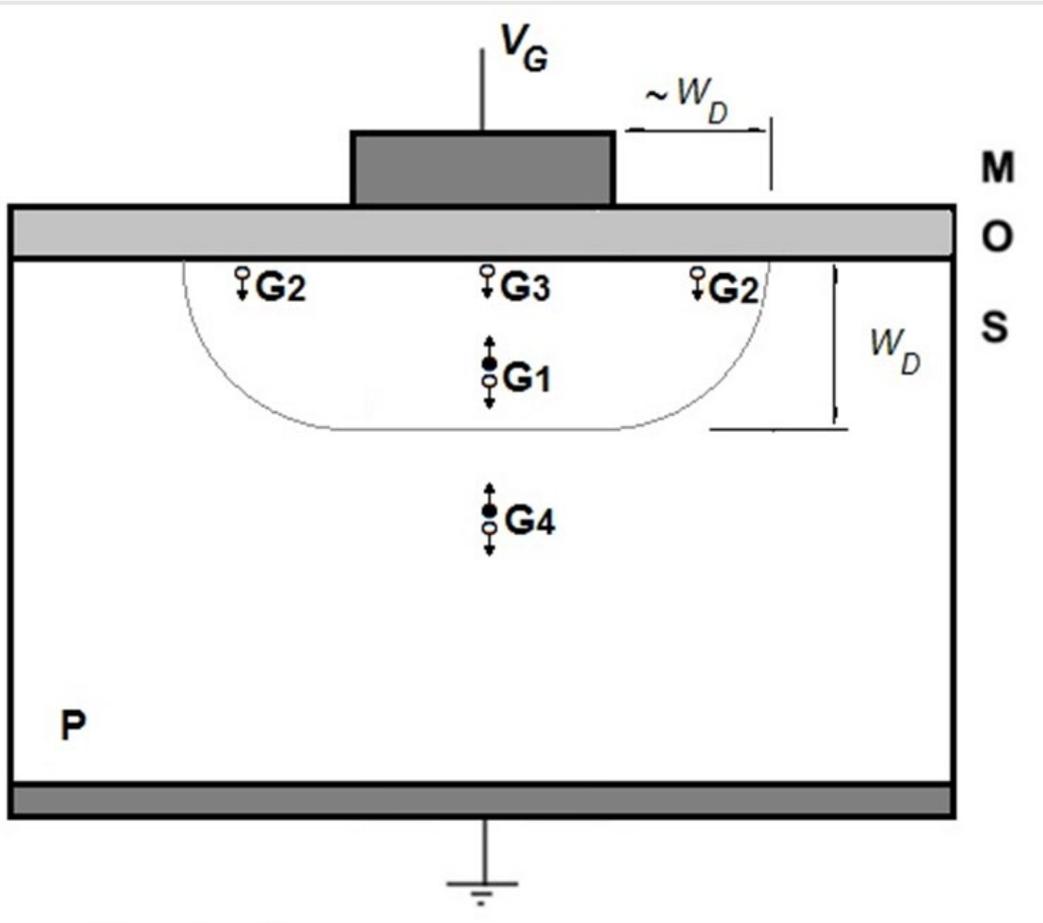
- Está em fase de fabricação um conjunto de 3 máscaras para a fabricação de estruturas LGAD com áreas de 0,25 a 4,00 cm².



| 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

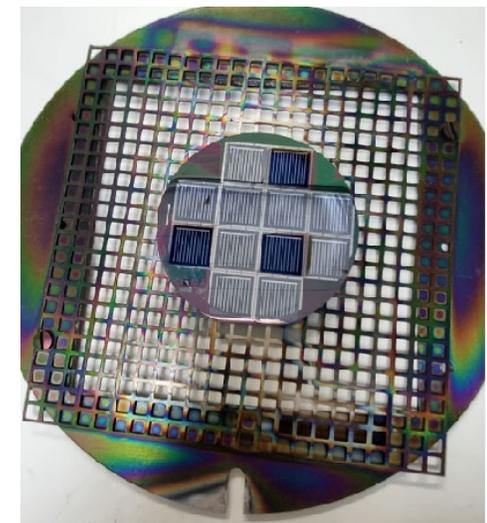
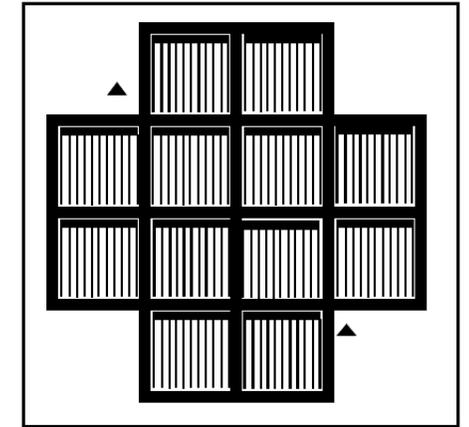
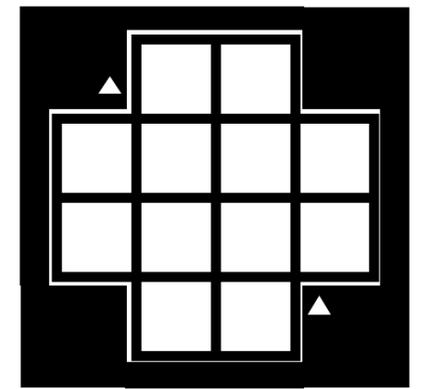
| Frente – R (10^6 ohm/q) | Costas – R (10^6 ohm/q) | Espessura (um) | [B] átomos/cm ³ |
|----------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|
| 0,231 | 0,237 | 332 | $1,778 \cdot 10^{12}$ |
| 0,234 | 0,232 | 331 | |
| 0,213 | 0,236 | 323 | |
| 0,229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

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

Espessura medida por micrômetro

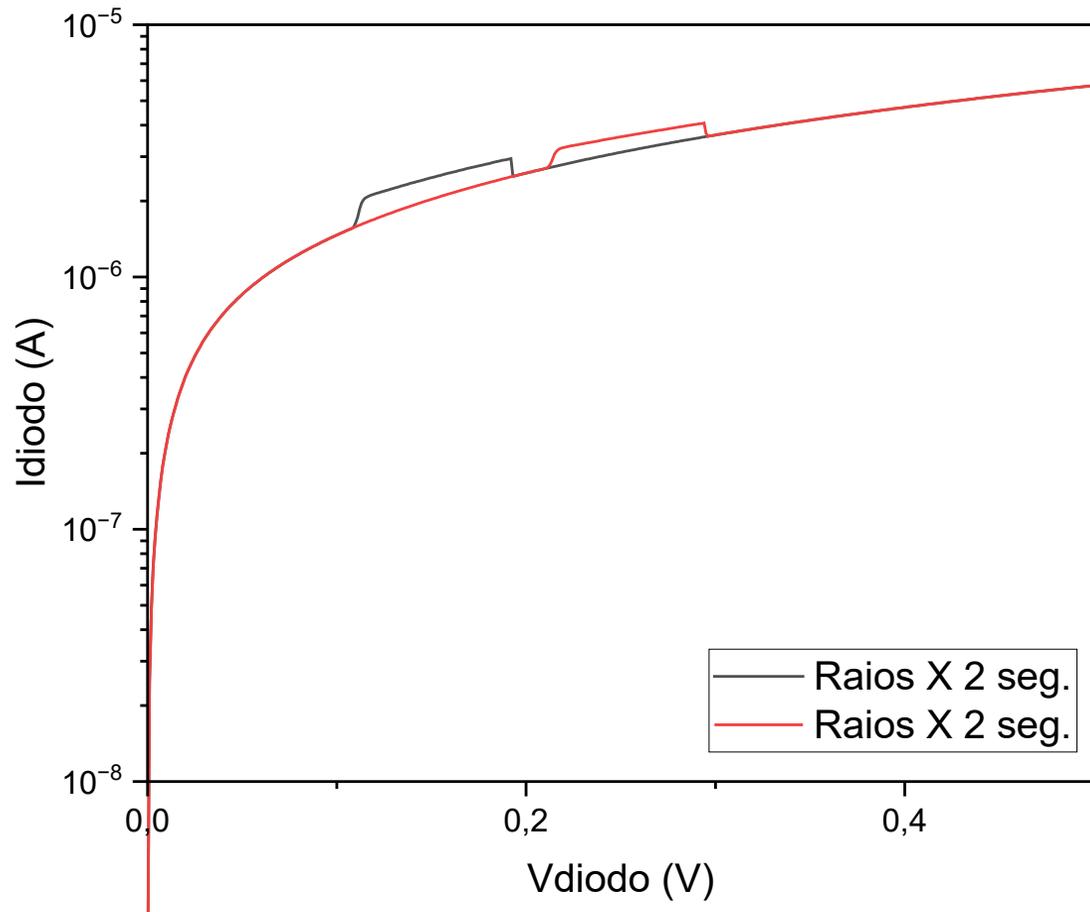
Etapas realizadas

- 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

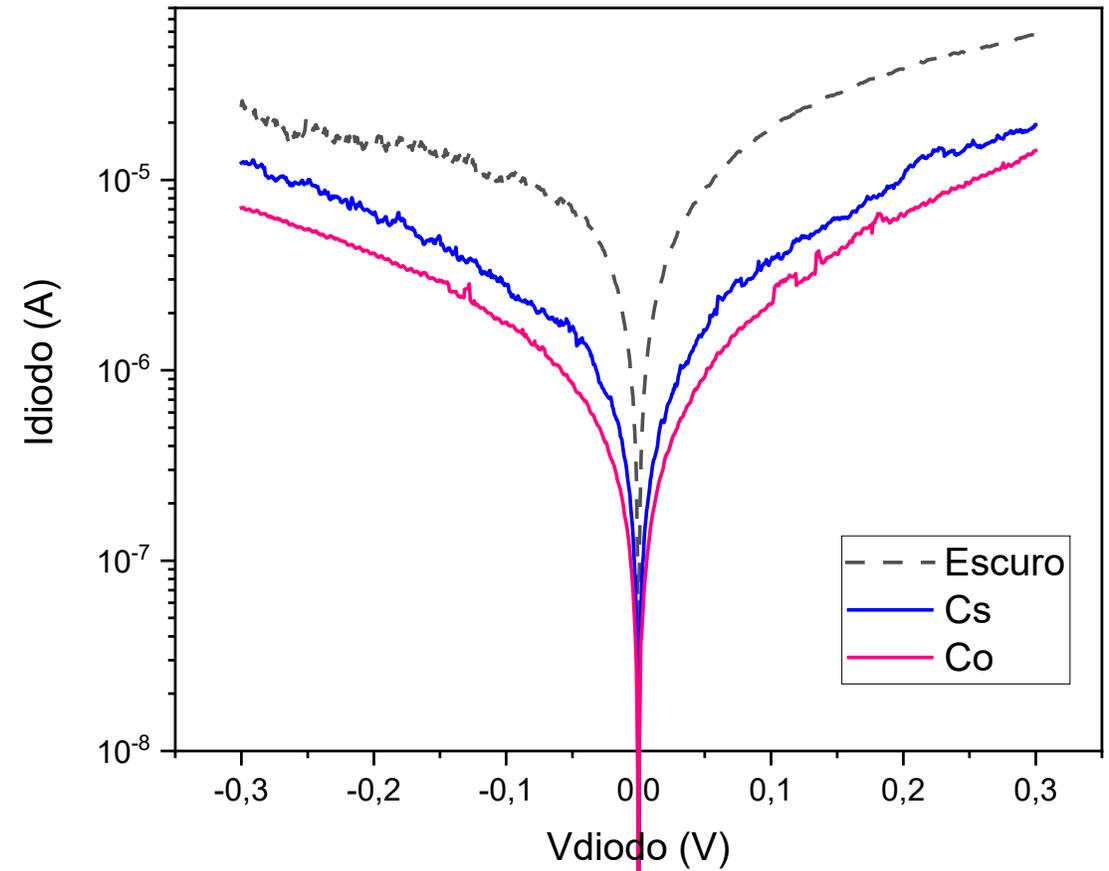


Análise Elétrica com raios X / Fontes radioativas

- Raios X

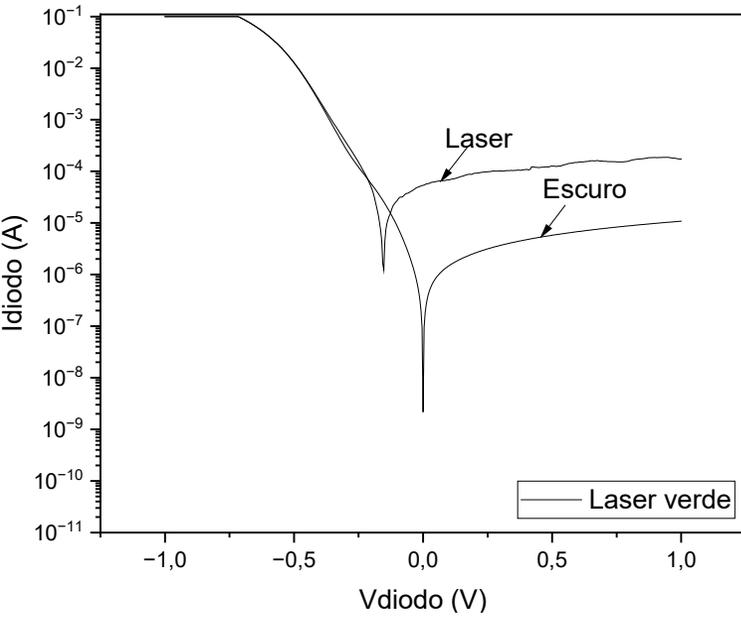


- Fontes Radioativas

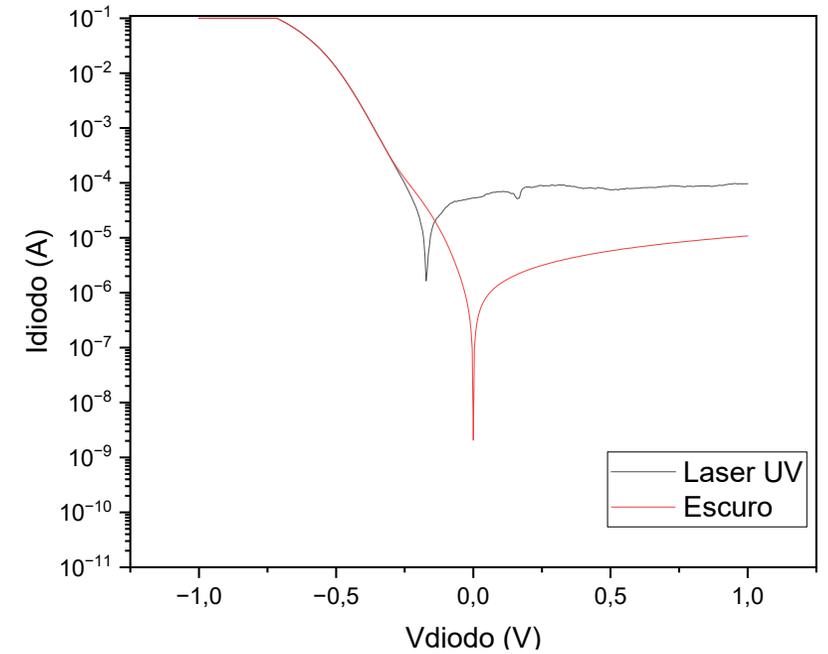


Análise Elétrica com LEDs / Laser UV

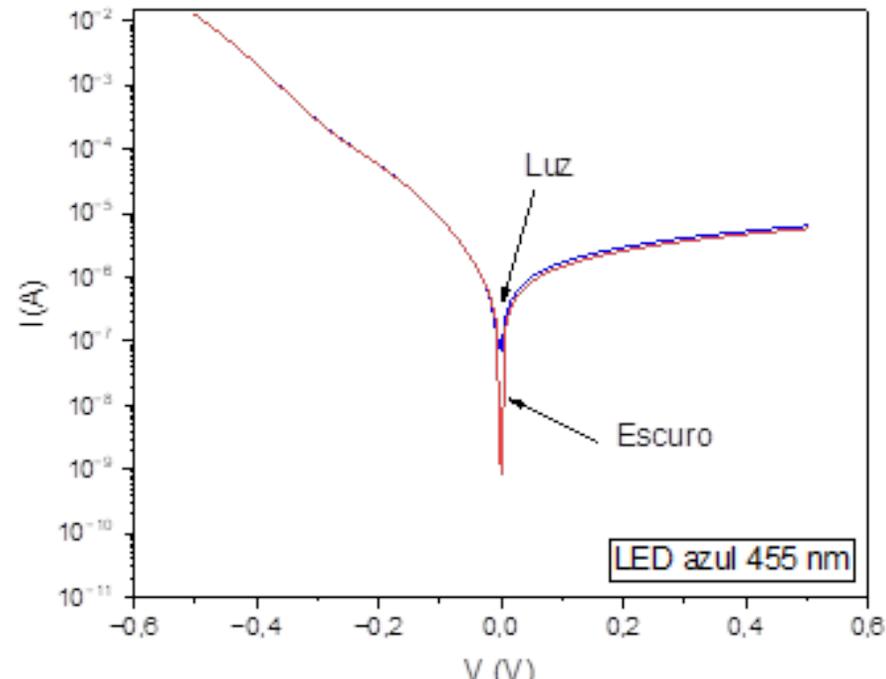
- Laser Verde



- 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)