

Atividades LSI-EPUSP

Responsáveis

Prof. Tit. João Antonio Martino

Prof. Dr. Ronaldo Domingues Mansano

Prof. Tit. Sebastião Gomes dos Santos Filho

Dispositivos tipo LGAD fabricados em silício

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:
 - **Marcelo Luiz da Conceição:** aluno de doutorado (início: em 2024)
 - Tema: Modelagem e caracterização elétrica de dispositivos sensores de raios X: sensibilidade e seletividade.
 - **Marcos Norio Watanabe:** aluno de doutorado (dedicação: 4 horas/semana)
 - Tema: Fabricação de estrutura MOS para passivação do dispositivo LGAD
- Pós-Doutoramento:
 - **Fábio Izumi:** (dedicação: 20 horas/semana)
 - Tema: Simulação TCAD de estrutura MOS para passivação do dispositivo LGAD

Dispositivos tipo LGAD fabricados em silício

- **Formação de Pessoal:**

- 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.

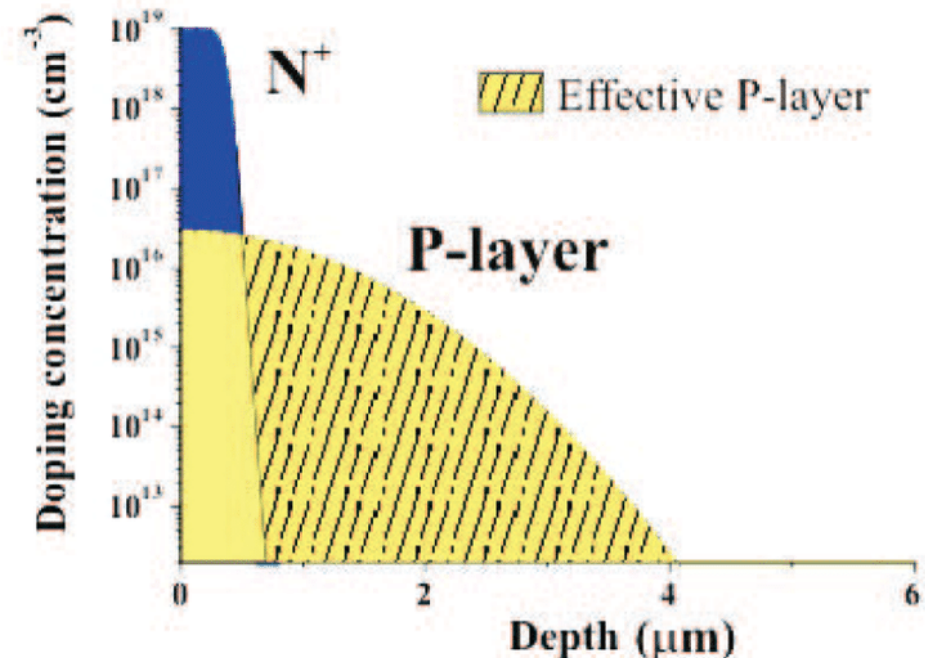
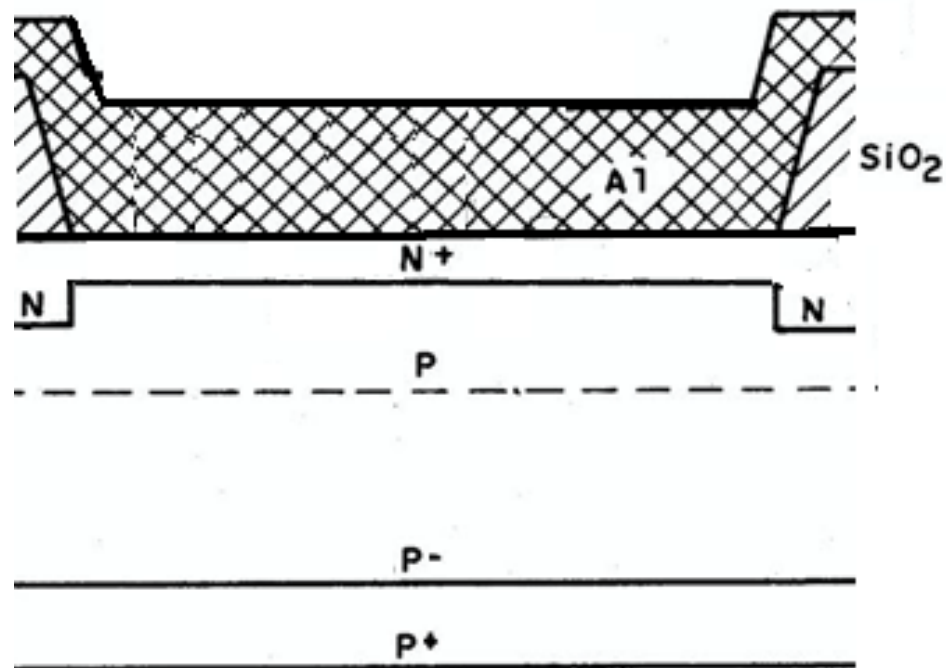
- **Publicações:**

- 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.
- IZUMI, FABIO ; WATANABE, MARCOS NORIO ; Siano B ; DOS SANTOS FILHO, SEBASTIÃO GOMES . Impact of the gate work function on the experimental I-V characteristics of MOS solar cells simulated with the Sentaurus TCAD software. **Journal of Integrated Circuits and Systems**, v. 19, p. 1-7, 2024.

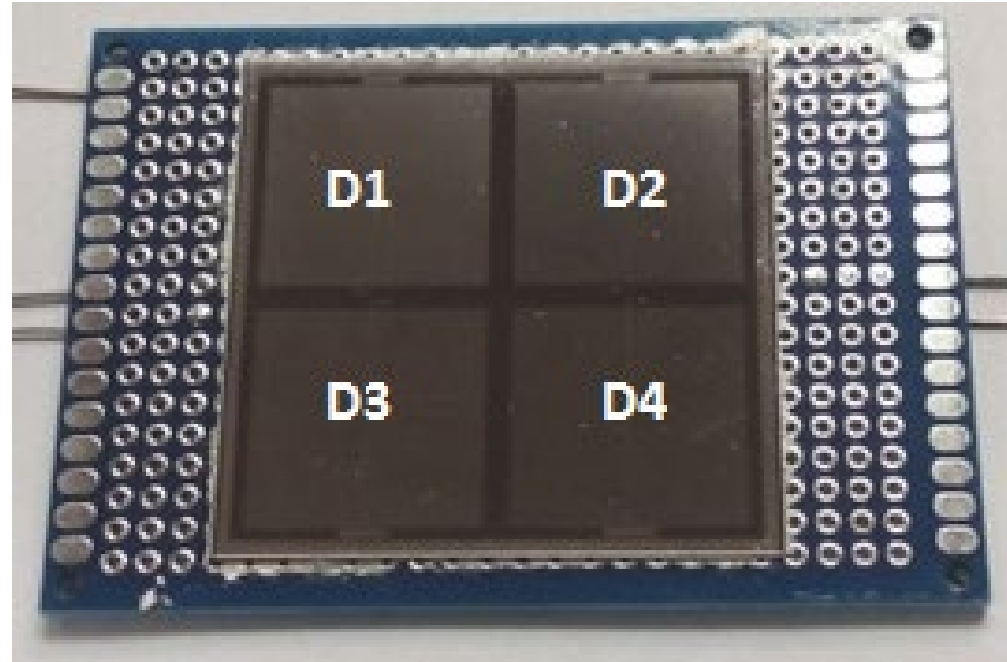
Dispositivos tipo LGAD fabricados em silício

- Resultados Obtidos:

- 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, foi simulada para aumentar localmente o campo elétrico para ionização por impacto de elétrons, a fim de obter ganho de corrente interna no dispositivo.

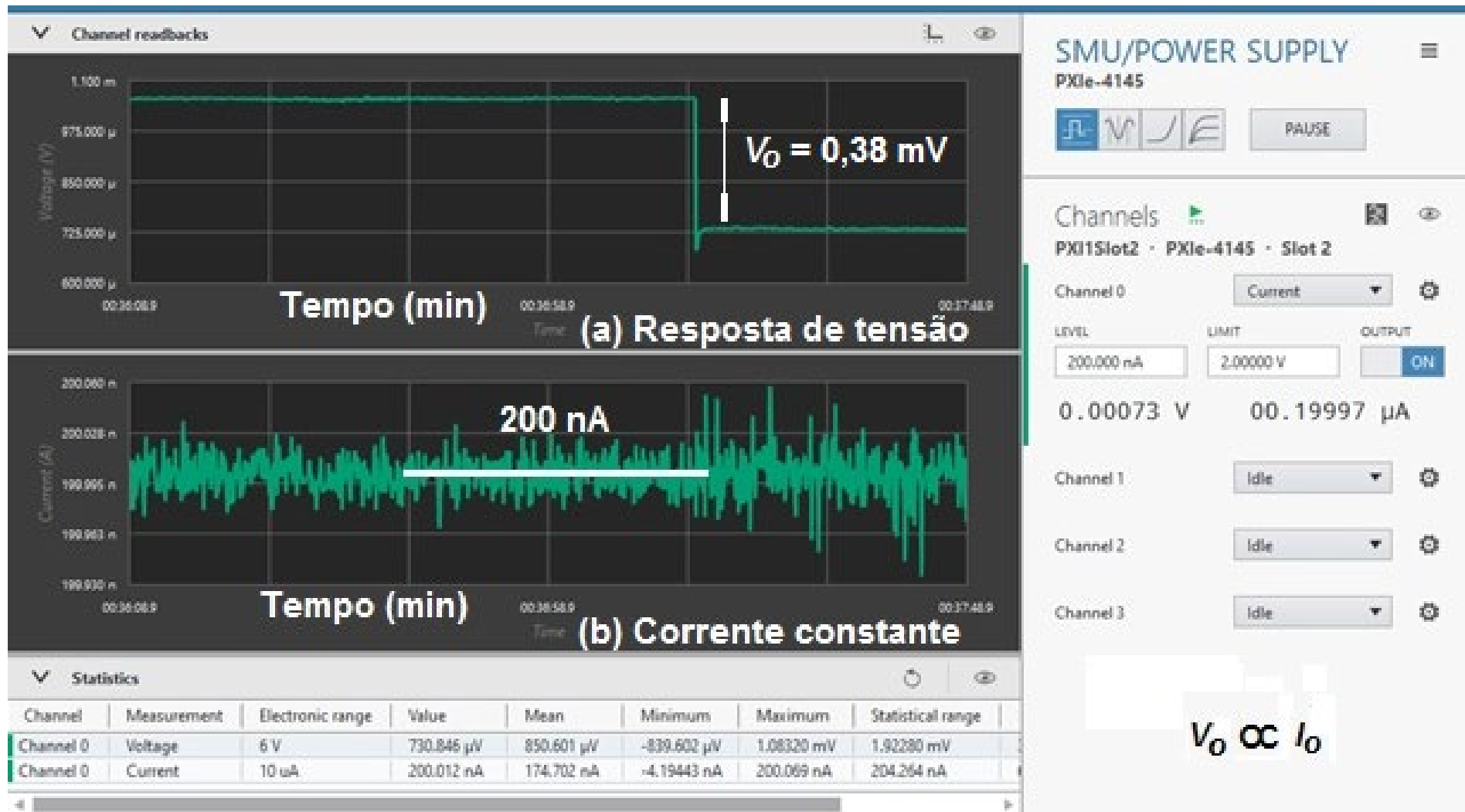


Testes da estrutura de passivação do LGAD



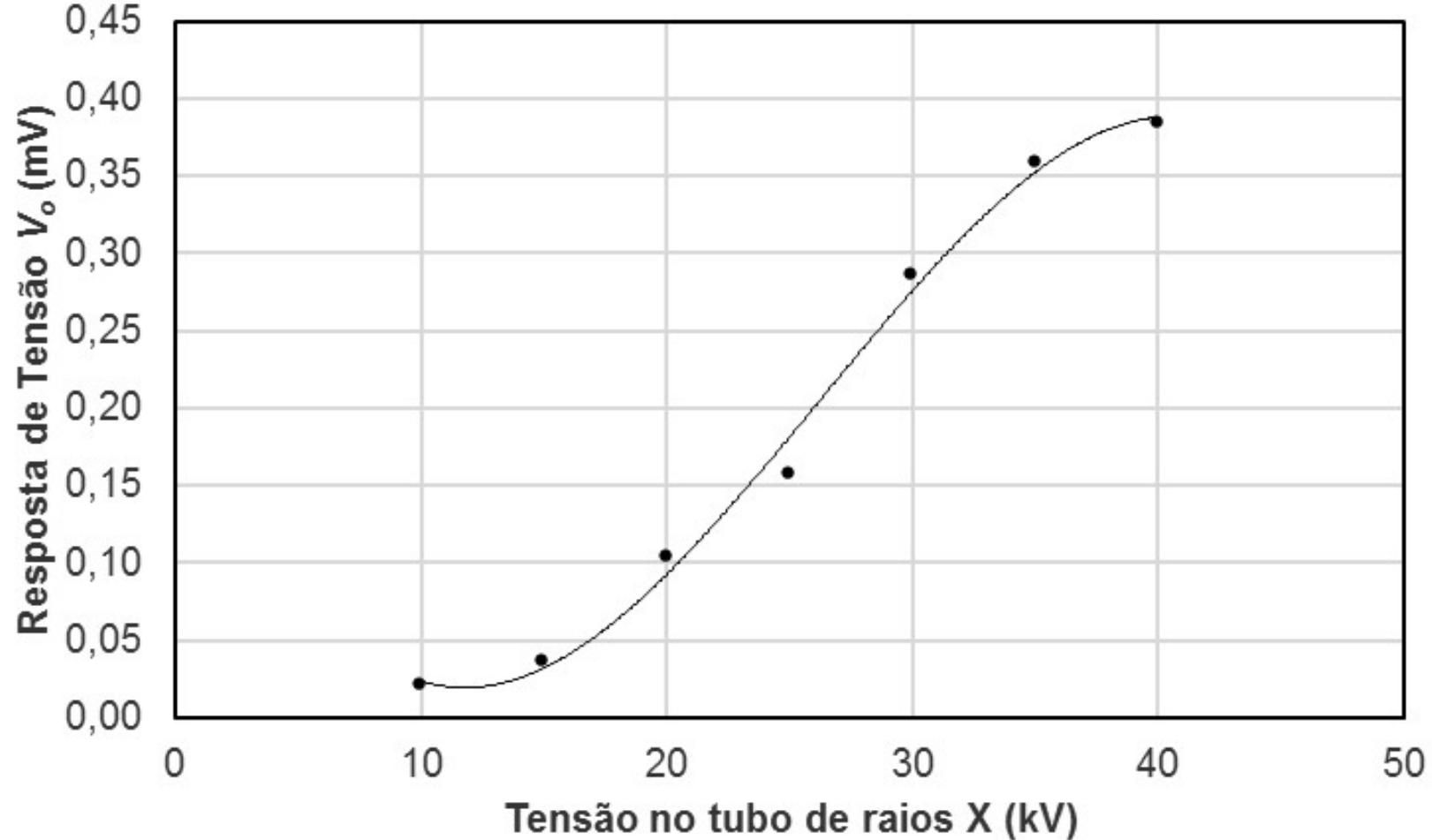
Placa de circuito impresso (PCB) sobre a qual foi feita colagem de lâmina de silício cortada na dimensão de 5 cm x 5cm onde é possível observar quatro estruturas de mesma área com dimensão lateral de 2 cm cada.

Testes da estrutura de passivação do LGAD



Degrau de tensão V_0 na estrutura de passivação do LGAD com corrente constante de 200 nA quando é ligada a fonte de Raios X em 40KV x 100 μ A

Testes da estrutura de passivação do LGAD

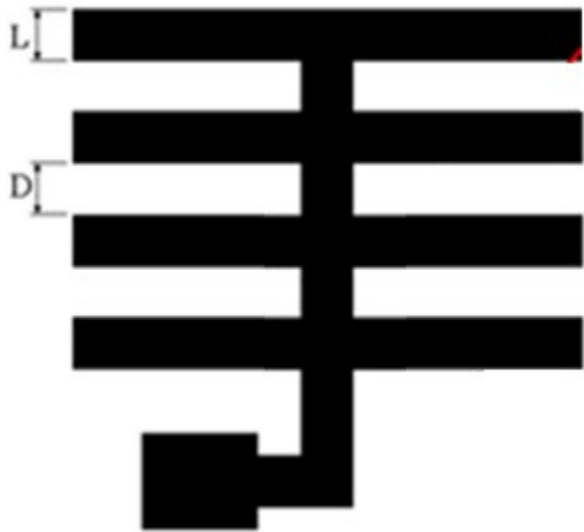


Resposta de tensão da estrutura operando no modo de corrente constante (200 nA) em função da tensão do tubo de Raios X para corrente de filamento de 100 μ A

Dispositivos tipo LGAD fabricados em silício

- Resultados Obtidos:

- 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]



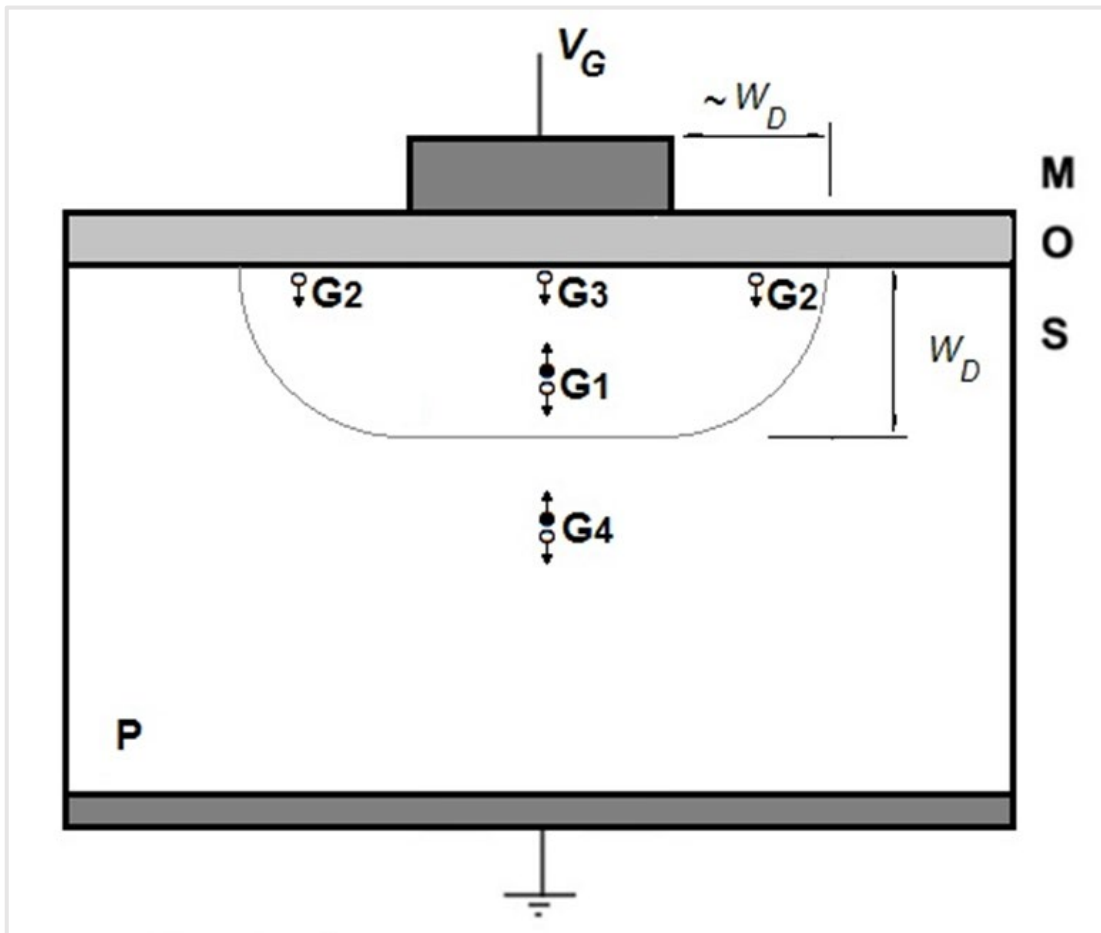
Dispositivo	L (mm)	D (mm)	Nº L	A_g (cm^2)	Perímetro (cm)
50x50	50	50	180	1,63	651,6
50x100	50	100	120	1,09	434,4
100x100	100	100	90	1,63	325,8
100x150	100	150	71	1,34	257,0



Dispositivos tipo LGAD fabricados em silício

- Resultados Obtidos:

- 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. [DA CONCEIÇÃO, 2023]



- 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.

Dispositivos tipo LGAD fabricados em silício

- Propostas futuras e orçamento para o próximo período:
 - Construção dos dispositivos LGAD utilizando dielétricos de oxinitreto de silício (SiN_xO_y) entre o eletrodo de leitura e o volume dopado baseado nos resultados sobre a caracterização elétrica já realizada da corrente de tunelamento em função da intensidade dos raios X suaves.
 - Solicitação de bolsa de pós-doutoramento atrelada ao projeto temático para a fabricação e caracterização do dispositivo LGAD proposto.

Radiação em dispositivos semicondutores e circuitos

Radiação em dispositivos semicondutores e circuitos

Participantes:

João Antonio Martino

Paula Ghedini Der Agopian

Vanessa Cristina Pereira da Silva

Welder Fernandes Perina

Atividades Realizadas:

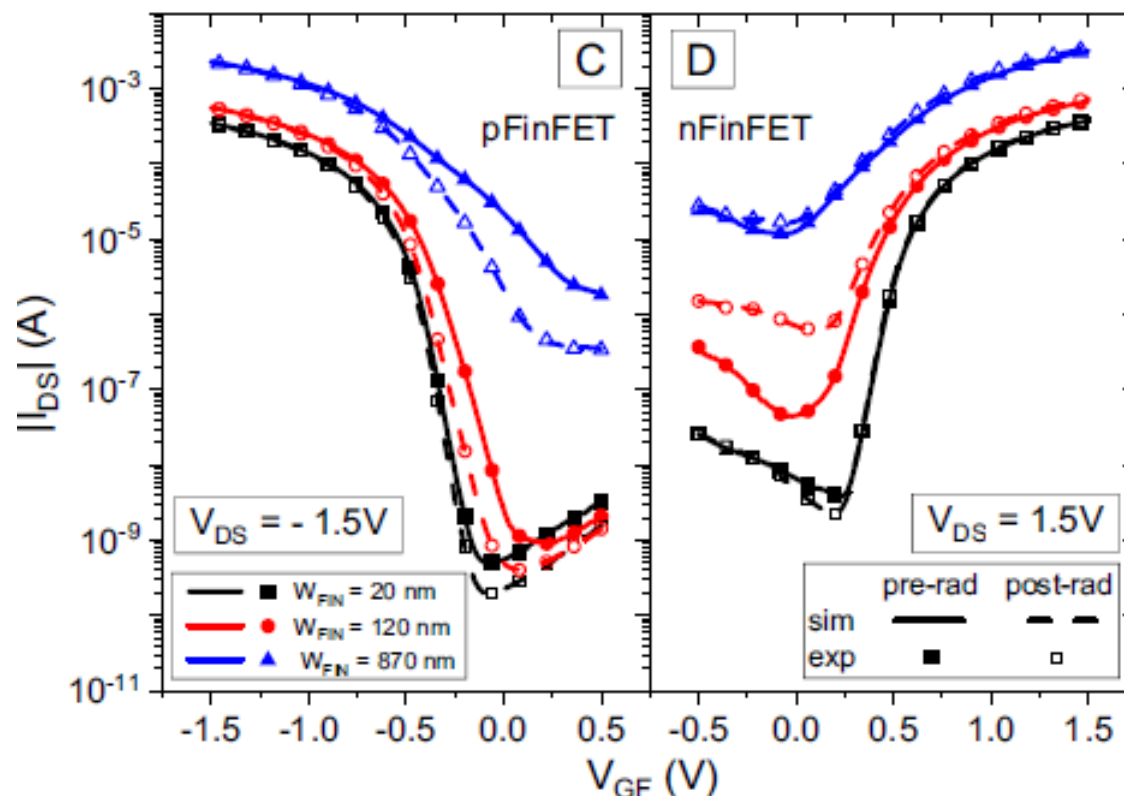
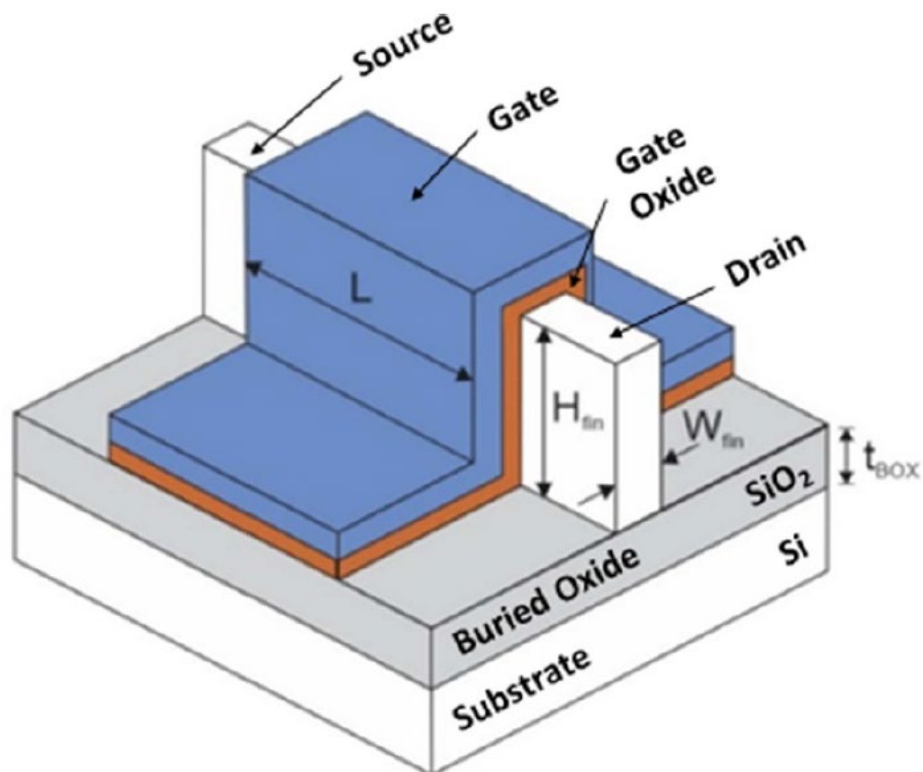
- Estudo experimental do efeito da radiação em transistores FinFETs
- Efeito da radiação em amplificadores operacionais
- Simulação do efeito da radiação em transistores *Ohmega-gate SOI MOSFET*

Propostas Futuras

- Simulação do efeito da radiação em transistores MISHEMT

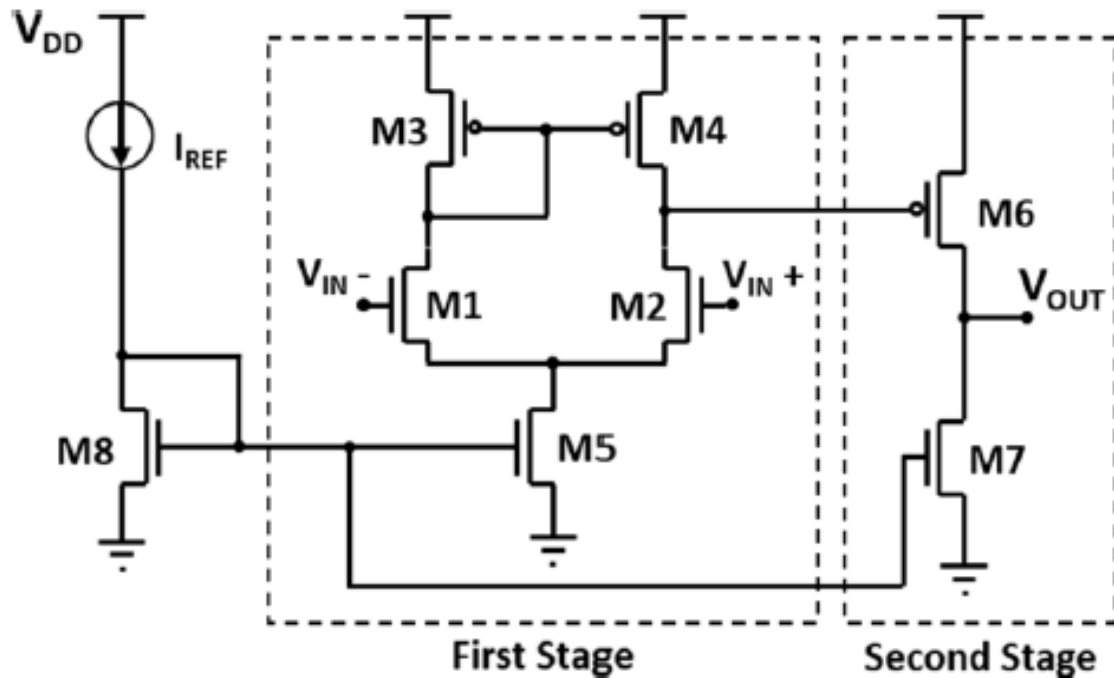
Estudo experimental do efeito da radiação em transistores FinFETs

The proton irradiation process of 60 MeV beam energy up to a fluence of 10^{12} p.cm⁻² (at room temperature) was performed at the Cyclone facility in Louvain-la-Neuve (Belgium).

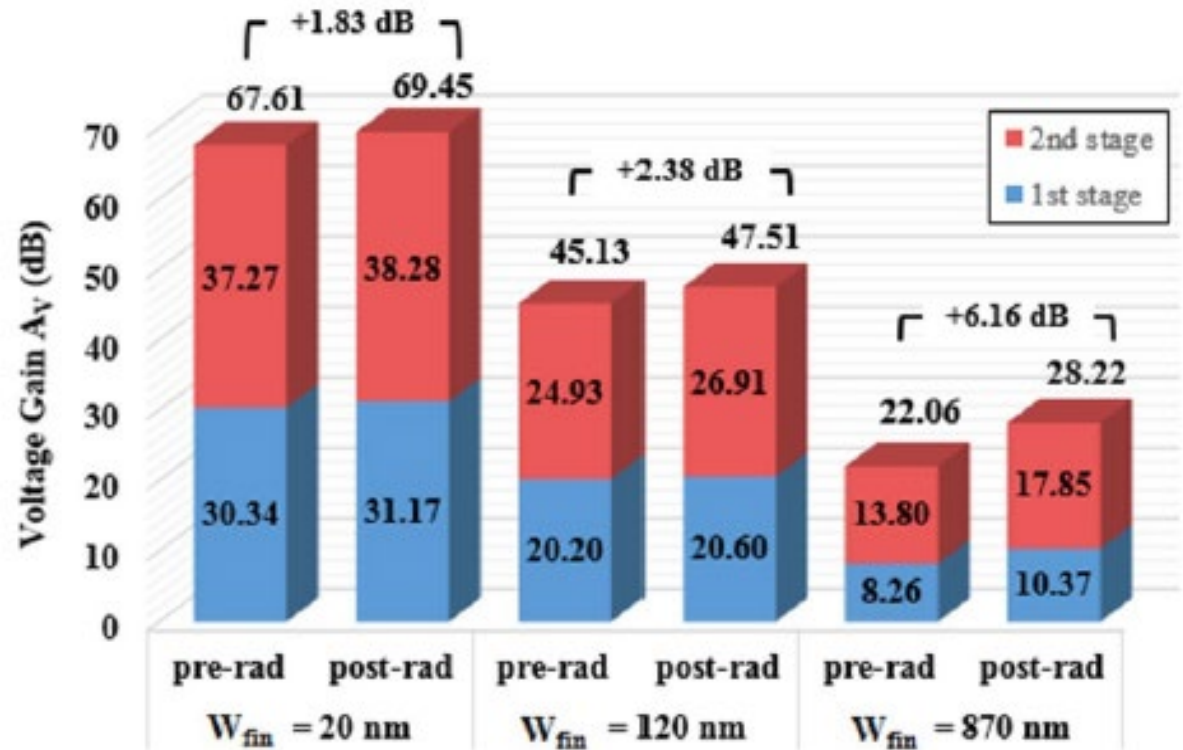


Resultado Principal: Os transistores mais estreitos ($W_{FIN} = 20$ nm) são mais tolerantes à radiação devido ao maior acoplamento eletrostático entre porta e canal.

Efeito da radiação em amplificadores operacionais



The OTA studied in this paper.



Voltage gain (A_V) of the designed differential and common-source amplifiers with ideal current sources for g_m/I_D of 8 V^{-1} for different W_{fin} devices.

Resultado Principal: O ganho de tensão do Amp.Op aumentou após a radiação (post-rad) nos dispositivos FinFETs utilizados devido a mudança da região de operação dos dispositivos

Simulação do efeito da radiação em transistores *Omega-gate SOI MOSFET*

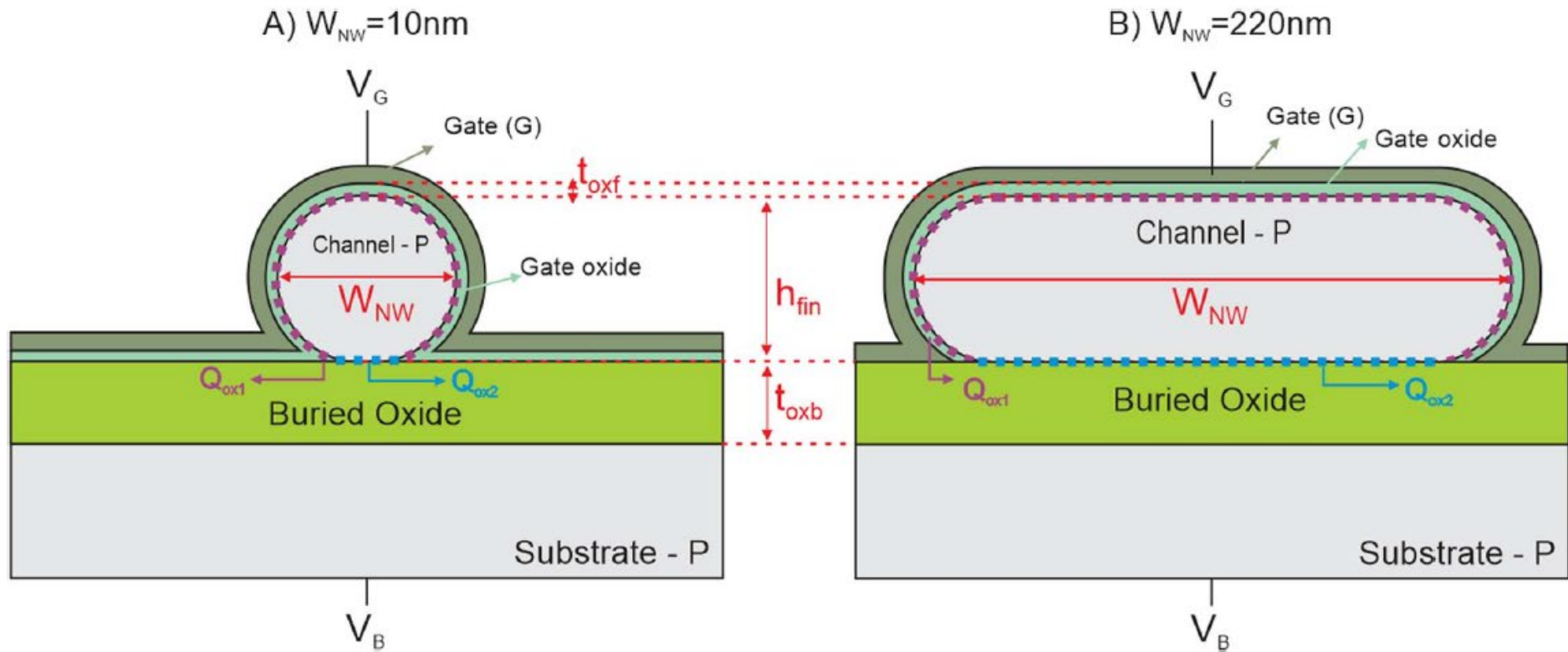
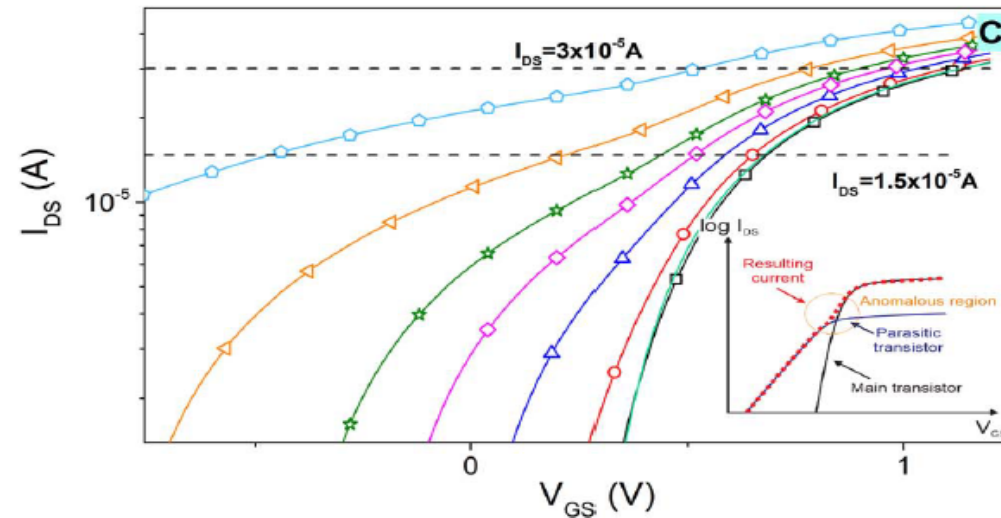
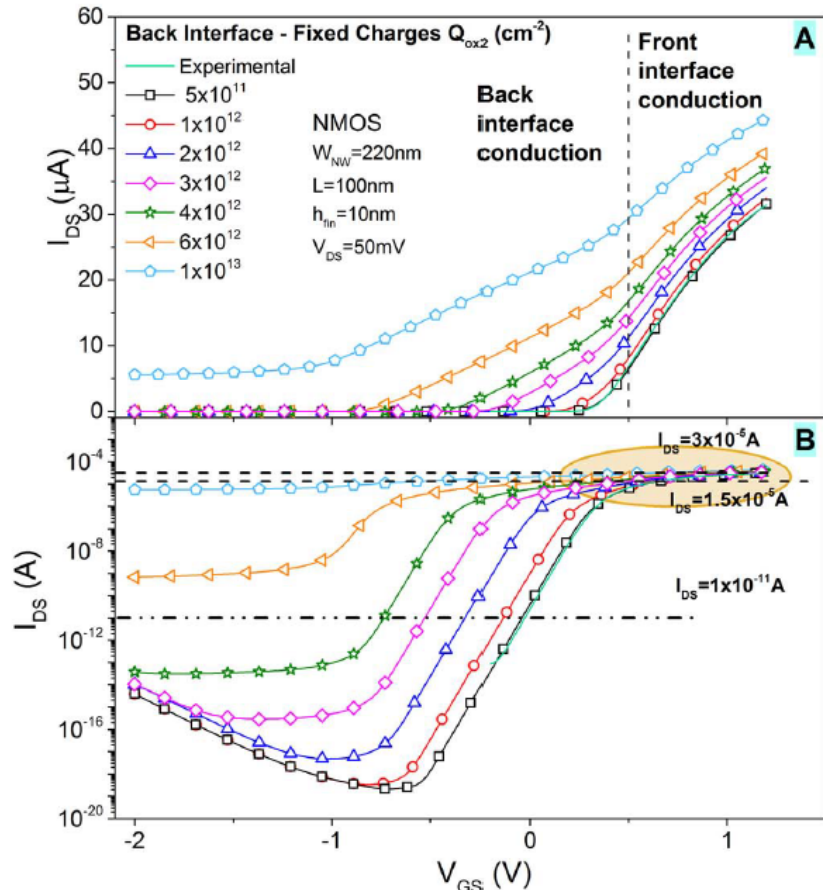


Figure 1. Schematic cross section of omega-gate NW device A) for $W_{NW} = 10\text{nm}$ and B) for $W_{NW} = 220\text{nm}$.

Simulação do efeito da radiação em transistores

Ohmega-gate SOI MOSFET

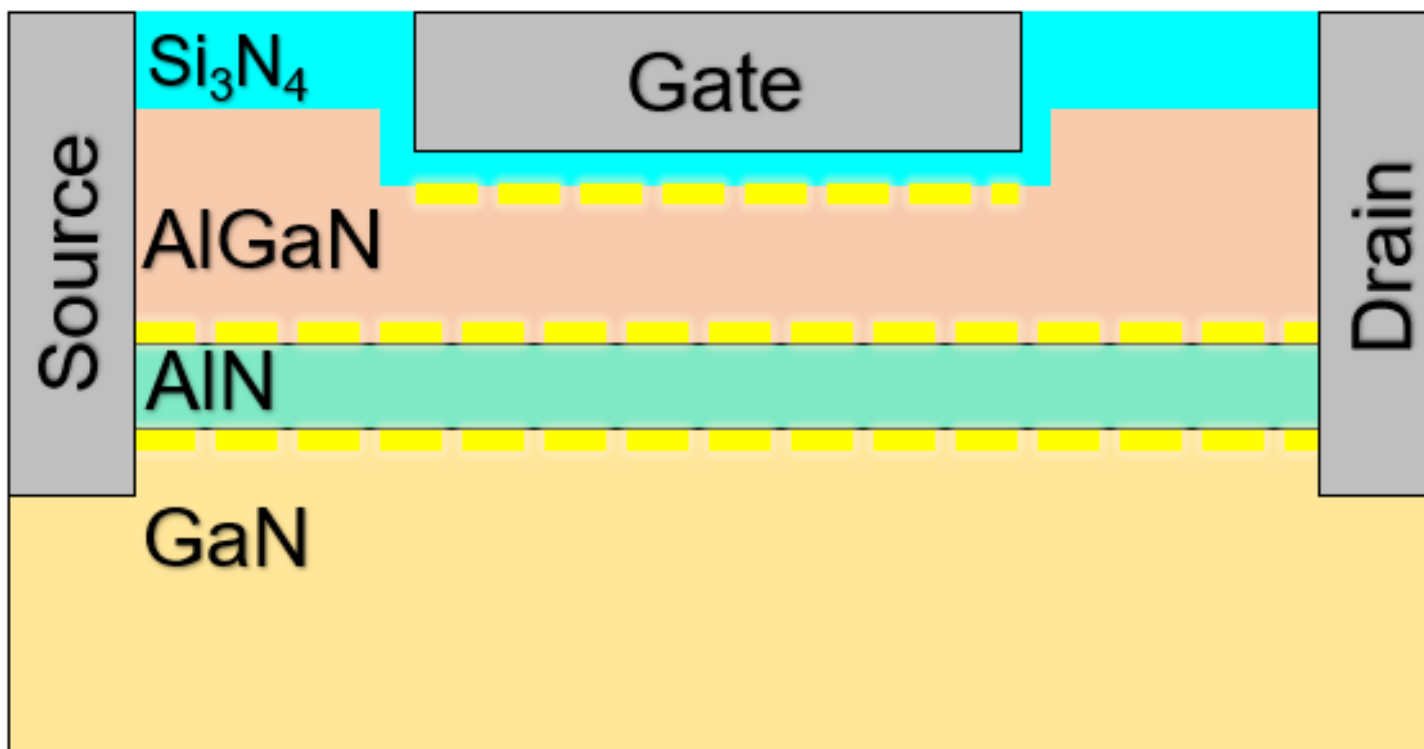


Experimental and simulated drain current as a function of gate voltage, varying Q_{ox} from 5×10^{11} up to $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ for $W_{NW} = 220 \text{ nm}$ and $L = 100 \text{ nm}$, in a linear (A) and logarithmic (B) scales and a zoom of the highlighted region from Figure 5B (C).

Resultado Principal: O transistor com diâmetro de 10nm apresentou qualquer variação significativa na faixa estudada de cargas acumuladas devido ao efeito da radiação. Nestas figuras estão apenas mostradas os resultado para $W_{NW} = 220 \text{ nm}$, onde o efeito é significativo, deslocando a tensão de limiar e reduzindo o acoplamento eletrostáticos entre porta e canal.

Proposta Futura

Simulação do efeito da radiação em transistores MISHEMT



Sensores PIN em silício

Radiação em dispositivos semicondutores e circuitos

Participantes:

Ronaldo Domingues Mansano

Luis da Silva Zambom

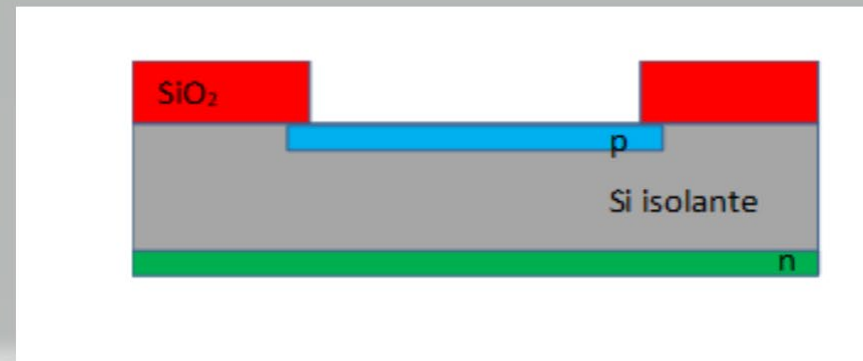
Atividades Realizadas:

- Projeto da estrutura dos diodos PIN
- Estudo das etapas de processo
- Fabricação do novo diodo com variação das dimensões e teste dos novos substrato
- Teste de resposta a luz visível

Propostas Futuras

- Testes da nova estrutura com radiação
- Montagem do set-up de teste
- Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados com Lab-View

Estrutura básica diodo PIN



Substratos utilizados

Amostra 1

Property		Item 5
Lot #	:	5614
Diameter	:	76.2mm
Growth method	:	Fz
Grade	:	Prime
Type/Dopant	:	P/Boron
Resistivity	:	>5,000 Ω -cm
Thickness	:	635 \pm 50 μ m
Orientation	:	[100] \pm 0.5 $^\circ$
Primary flat length	:	42.5 \pm 2.5mm
Primary flat location	:	<110> \pm 1 $^\circ$
Secondary flat length	:	27.5 \pm 2.5mm
Secondary flat location	:	90 $^\circ$ C.W. from P.F.
TTV	:	\leq 10 μ m
Bow/Warp	:	\leq 30 μ m
Front Finish	:	Polish
Back Finish	:	Etch
Laser mark	:	No
Lead-time	:	4 weeks
Quantity	:	25 - 50
Price per wafer	:	68.00

Amostra 2

Property		Item 5
Lot #	:	E0128
Diameter	:	76.2mm \pm 0.3mm
Growth method	:	Fz
Grade	:	Prime
Type/Dopant	:	Intrinsic
Resistivity	:	>20,000 Ω -cm
Thickness	:	380 \pm 25 μ m
Orientation	:	[100] \pm 0.5 $^\circ$
Primary flat length	:	22.2mm \pm 2.5mm
Primary flat location	:	<110> \pm 1 $^\circ$
Secondary flat length	:	N/A
Secondary flat location	:	N/A
TTV	:	\leq 10 μ m
Bow/Warp	:	\leq 30 μ m
Front Finish	:	Polish
Back Finish	:	Etch
Laser mark	:	No
Lead-time	:	48 hrs
Quantity	:	25 - 350
Price per wafer	:	78.00

Medição da resistividade de folha

1 - Lâmina Addison – 3 PP – 8 – tipo P

Frente – R (10^6 ohm/q)	Espessura (um)	[B] átomos/cm ³
0,231	332	$1,778.10^{12}$
0,234	331	
0,213	323	
0,229		

[B] foi calculada, utilizando o site <https://www.pvlighthouse.com.au/resistivity>

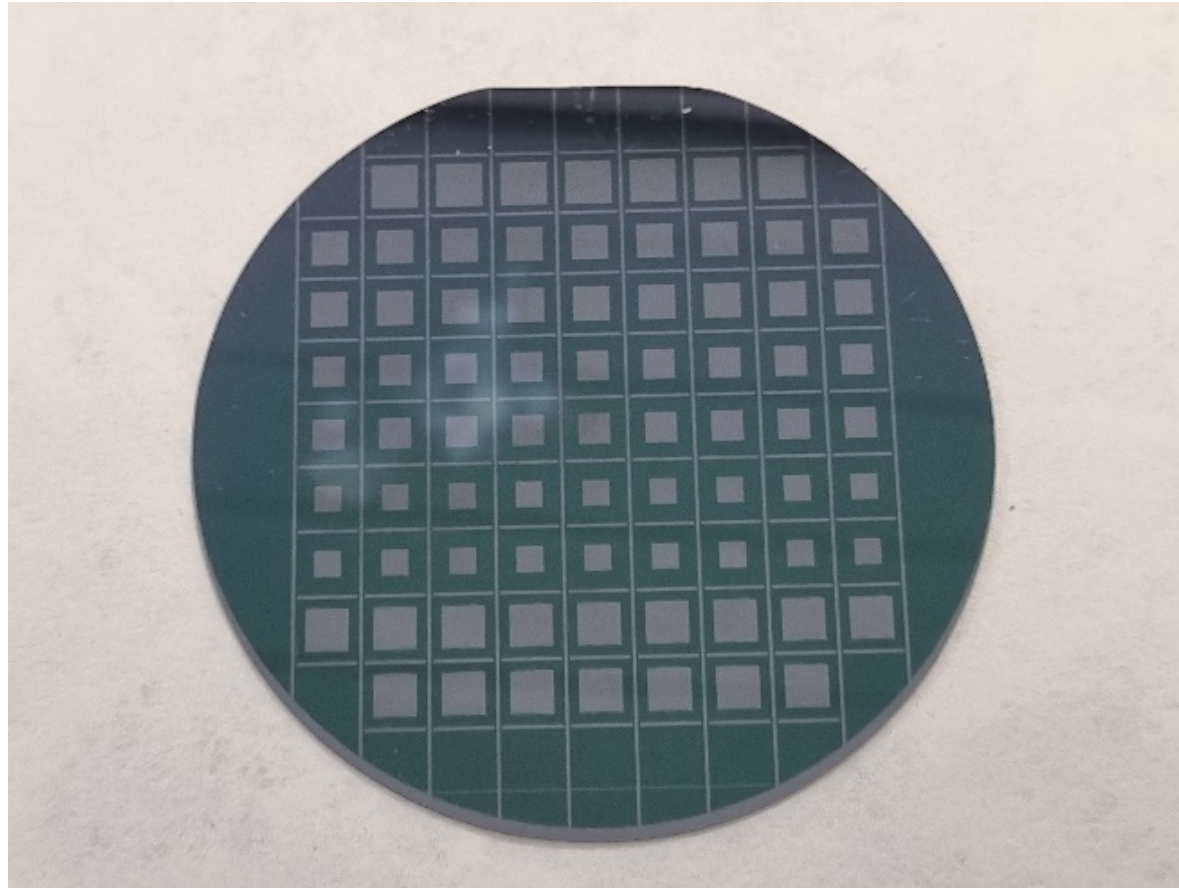
2 - Lâmina Float Zone - intrínseca

Frente – R (10^6 ohm/q)	Espessura (um)	[B] átomos/cm ³
0,132	380	$9,543.10^{11}$
0,159	375	
0,102	395	
0,094		

Oxidação úmida de 2h00min. / 1150 °C / O₂
1L/min / H₂O = 98 °C

Espessura (nm)	
1004,5	1003,3
983,33	1009,0
1008,6	
1009,0	

Litografia fotorresiste positivo e Corrosão do SiO₂



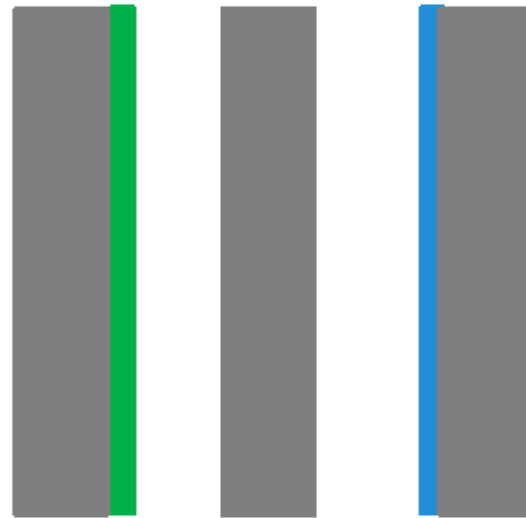
Difusão tipo P e N por proximidade

Esquema da difusão

SOG n

lâmina

SOG p



Difusão: temp. 950 °C / 60 min. / 2 mL SOG p e n

Resistividade após difusão

1 – lâmina Addison

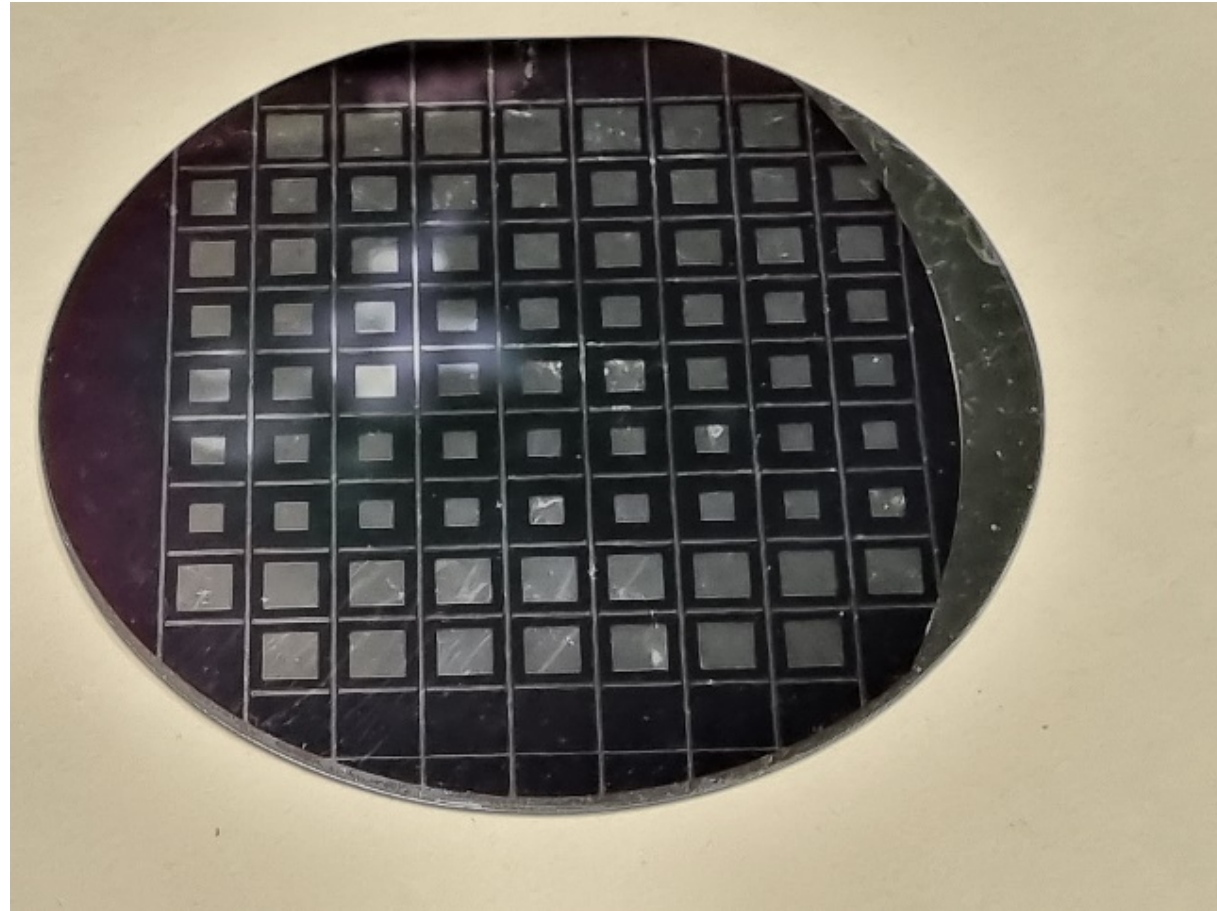
Lado P⁺ não foi possível medir resistência de folha por causa da área disponível

Lado N – R (ohm/q)
15,73
18,46
15,89
16,04
16,15
15,44

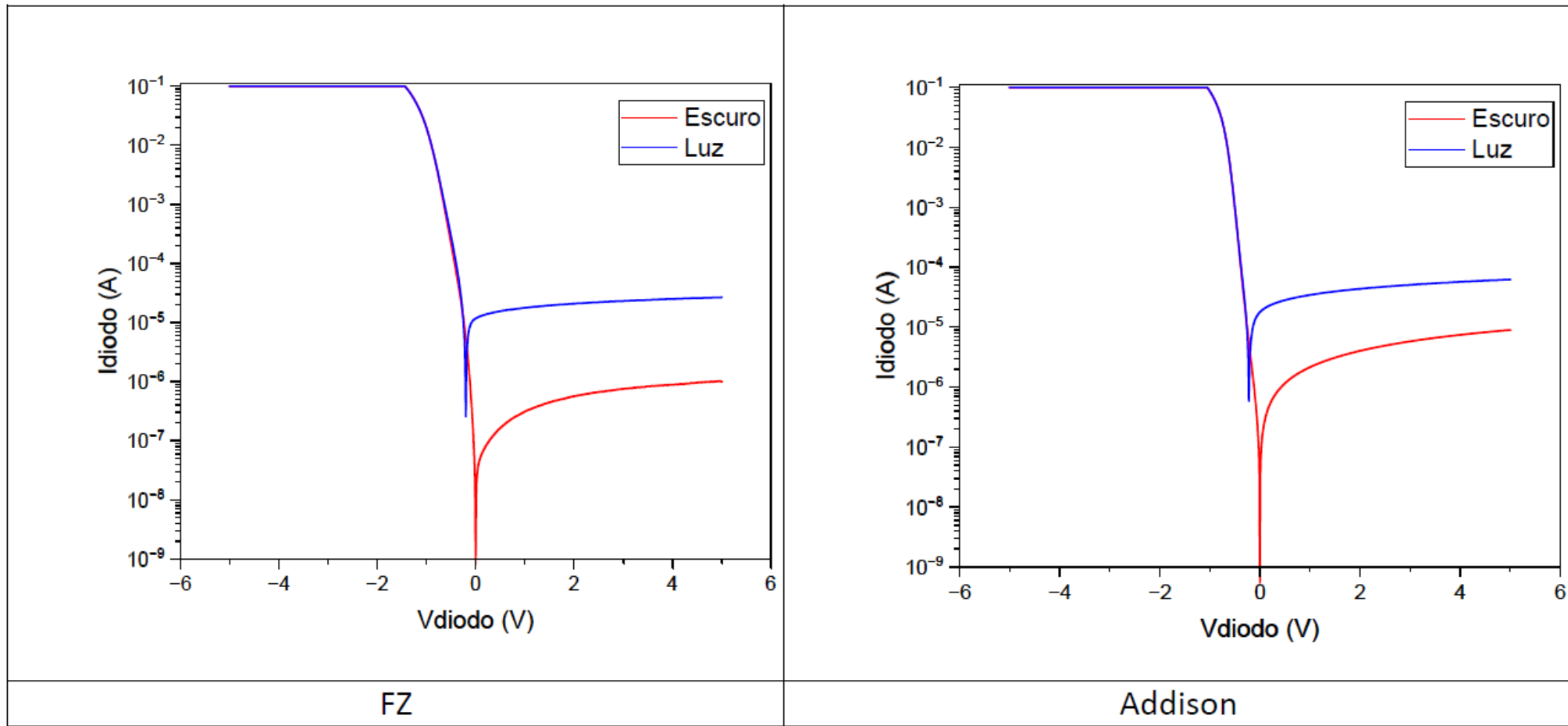
2 - Lâmina FZ

Lado N – R (ohm/q)
243
406
286
384
367
349

Litografia com fotorresiste negativo e metalização Frente e Costas



Medição dos diodos com Luz Visível



Etapas Futuras

- Teste da resposta com luz UV, Raios X e fontes Gama
- Montagem do set-up para teste de grupos de diodos
- Implementação do sistema de aquisição de dados com Daq e LabView
- Testes com sistema de Raios X calibrado