JOSÉ AUGUSTO PADOVESE PEIXOTO

Aplicação do ^{BE}SOI (*Back Enhanced*) MOSFET como sensor de luz no espectro visível

São Paulo

2019

JOSÉ AUGUSTO PADOVESE PEIXOTO

Aplicação do ^{BE}SOI (*Back Enhanced*) MOSFET como sensor de luz no espectro visível

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

São Paulo

2019

JOSÉ AUGUSTO PADOVESE PEIXOTO

Aplicação do ^{BE}SOI (*Back Enhanced*) MOSFET como sensor de luz no espectro visível

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Microeletrônica

Orientador Profº Dr. João Antonio Martino

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de outubro de 2019

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Peixoto, José Augusto Padovese
Aplicação do BESOI (Back Enhanced) MOSFET como sensor de luz no espectro visível / J. A. P. Peixoto -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
106 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Microeletrônica 2.Transistores 3.Sensores Ópticos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Dr. João Antonio Martino pela orientação, pelo constante incentivo transmitido ao longo do trabalho e pela confiança depositada.

Aos amigos do grupo SOI, que sempre estavam dispostos a prestarem ajuda quando necessário. Gostaria de agradecer especialmente ao Ricardo Rangel, Kátia Sasaki e Leonardo Yojo, que trabalharam juntos no dispositivo ^{BE}SOI e sempre foram muito solícitos com as dúvidas que tive ao longo do caminho e por prestarem uma valiosa ajuda em discussões sem as quais o trabalho sofreria uma grave perda de qualidade.

Agradeço também aos meus pais, que me apoiaram durante todo o mestrado e me ajudaram nos tropeços deste caminho que também seguiram, e aos meus familiares, que torceram por mim.

Por fim, um agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro (processo 88882.333339/2019-01).

ΣΩΚΡΆΤΗΣ • Οὐκ ἄρα ηὑρήκαμεν, ὦ Νικία, ἀνδρεία ὅτι ἔστιν.

Πλάτων, Λάχης [199ε]

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo verificar as características fotossensoras do novo dispositivo ^{BE}SOI (*Back Enhanced*) MOSFET a fim de aplicá-lo como sensor de luz. O ^{BE}SOI MOSFET foi desenvolvido e fabricado no Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Universidade de São Paulo (USP). Suas principais características são a fabricação extremamente simples, tornando-o acessível a laboratórios acadêmicos, e a operação reconfigurável, i.e., é possível mudar sua operação entre nMOS e pMOS apenas mudando a polarização na segunda porta. O princípio de funcionamento se baseia na corrente da segunda interface, i.e., entre óxido enterrado e canal de silício. Ao polarizar a segunda porta com uma tensão suficientemente negativa, induz-se uma camada de lacunas na segunda interface, que conectam fonte e dreno, permitindo a passagem de corrente. O resultado é um transistor operando como tipo-p. Analogamente, se a tensão de segunda porta for suficientemente positiva, elétrons são induzidos na segunda interface e a operação é como tipo-n. O dispositivo ^{BE}SOI conta com uma região chamada de subposição (*underlap*), situada entre o eletrodo de porta e o terminal de dreno ou fonte. Devido a sua característica de condução pela segunda interface, o transistor tem uma alta resistência para a condução de corrente na primeira interface (óxido de porta/canal de silício). Em consequência disso, uma pequena geração de pares elétron-lacuna (como a decorrente de incidência de luz) pode reduzir a resistividade dessa região, causando uma maior variação de corrente. Além disso, a simplicidade de fabricação do ^{BE}SOI pode torná-lo compatível com tecnologias SOI comerciais sem alterações significativas no processo de fabricação. Desse modo, almeja-se neste trabalho aplicar esse novo dispositivo como sensor de luz, a fim de se obter um sensor integrado a tecnologias SOI UTB (*Ultra-Thin Body*). Para tal, primeiro foi verificada a sensibilidade dos dispositivos já fabricados à radiação luminosa dentro do espectro visível, mais especificamente para comprimentos de onda de 400 nm e 635 nm. A maior variação da corrente de dreno causada pela radiação luminosa medida foi de 34 nA com responsividade de 8,9 mA/W – observadas para uma polarização que induzia portadores também na primeira interface e radiação de 400 nm de comprimento de onda. Este resultado experimental foi também verificado por simulações numéricas, que apresentaram as mesmas tendências, mas com responsividade de 165 A/W. Apesar de usarem métodos de detecção diferentes, esse desempenho é parecido ao de fototransistores *junctionless*

(sem junção). Nesse dispositivo, a dopagem do filme de silício é uniforme assim como no ^{BE}SOI, mas a concentração de dopantes é elevada. O ^{BE}SOI também foi comparado com o fotodetetor ICPD (*Interface Coupled Photodetector*), que é construído numa lâmina SOI e se baseia no efeito de acoplamento entre interfaces. Foi usado um método de detecção de luz por variação da tensão de limiar e se observou uma relação entre a área do ^{BE}SOI com a sensibilidade. Por fim, tentou-se melhorar a sensibilidade do ^{BE}SOI por meio de alterações estruturais. Foi verificada a influência, separadamente, tanto da espessura da camada de silício quando da dopagem do canal na sensibilidade, que mostrou um ponto ótimo para uma espessura de 15 nm e concentrações de 10^{17} cm^{-3}.

Palavras-Chave: ^{BE}SOI MOSFET. Transistores reconfiguráveis. Sensores ópticos.

ABSTRACT

The goal of this work is to verify the light sensing characteristics of the novel device ^{BE}SOI (Back Enhanced) MOSFET in order to apply it as a light sensor. The ^{BE}SOI MOSFET was developed and fabricated in the Laboratory of Integrable Systems (*Laboratório de Sistemas Integráveis*, LSI) at the University of Sao Paulo (USP). The device main features are the extremely simple fabrication, making it accessible to academic laboratories, and the reconfigurable operation, i.e., it is possible to change the operation between nMOS and pMOS only by a different back gate bias. The operation principle is based on the back interface current, i.e., between buried oxide and silicon channel. When the back gate is biased with a sufficient positive voltage, a layer of holes is induced that connects drain and source, thus allowing the current to flow. The result is a device operating as a p-type transistor. Analogously, if the back gate bias is negative, electron are induced at the back interface and the operation is like an n-type transistor. The ^{BE}SOI device features a region called underlap, located between the front gate electrode and the drain or source. Because the drain current flows through the back interface, the transistor has a high resistivity in the front interface (gate oxide/silicon channel) in that region. Consequently, a small electron-hole pair generation (like due to light incidence) can reduce the underlap resistivity causing a high current variation. Furthermore, the fabrication simplicity of the ^{BE}SOI can make if compatible with commercial SOI technologies without significant changes in the fabrication process. Because of that, this works aims to use this new device as a light sensor in order to obtain a sensor integrated to SOI UTB (Ultra-Thin Body) technology. To accomplish that, the light sensitivity of the fabricated devices was verified in the visible spectrum, specifically for wavelengths of 400 nm 635 nm. The higher drain current variation due to luminous radiation measured was 34 nA with a responsivity of 8.9 mA/W – that was observed for a bias that induces carriers also in the front interface and for the 400 nm wavelength radiation. This experimental result was verified by numerical simulations, which presented the same tendencies and a responsivity of 165 A/W. Although the detection method is different, this performance is similar to the one obtained in junctionless phototransistors. Like the BESOI, the silicon film in this kind of device is doped uniformly, but uses a high concentration of impurities. The ^{BE}SOI was also compared with the novel photodetector ICPD (Interface Coupled Photodetector), which is built on a SOI wafer and uses the interface coupling

effect. Using a method of light detection based on the variation of the threshold voltage it was observed a relationship between the area of the ^{BE}SOI and the sensitivity. Finally, changes in the structure of the ^{BE}SOI were made in order to achieve a better sensitivity. This work examined, separately, the impact of the silicon film thickness and the channel doping concentration on the sensitivity. The results presented an optimal point for a 15 nm thick silicon film and a doping concentration of 10^{17} cm^{-3}.

Keywords: ^{BE}SOI MOSFET. Reconfigurable transistors. Optical sensors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenho esquemático do ^{BE}SOI mostrando as regiões de subposição (*underlap*) entre porta e eletrodo de fonte/dreno. 23
Figura 2 – Desenho esquemático de um dispositivo SOI MOSFET. 26
Figura 3 – Diagrama de bandas de energia de transistores SOI canal-n parcialmente e totalmente depletados. 28
Figura 4 – Desenho esquemático da realização do ^{BE}SOI (2ª geração). 34
Figura 5 – Foto de um dispositivo ^{BE}SOI MOSFET (2ª geração; L = W = 10 μm) fabricado na Universidade de São Paulo. 35
Figura 6 – Esquemáticos dos diagramas de cargas (esquerda) e de bandas de energia (direita) do ^{BE}SOI em diferentes regiões de operação. 36
Figura 7 – Curva de transferência esquemática de um dispositivo ^{BE}SOI canal-p. ... 37
Figura 8 – Perfil esquemático do dispositivo ^{BE}SOI canal-p em diferentes regiões de operação. 39
Figura 9 – Função de eficiência luminosa. 41
Figura 10 – Índice de refração do silício em temperatura ambiente. 45
Figura 11 – Coeficiente de absorção e comprimento de penetração do silício em temperatura ambiente. 45
Figura 12 – Desenho esquemático de um fotocondutor. 47
Figura 13 – Desenho esquemático de um fotodiodo e o respectivo diagrama de bandas. 50
Figura 14 – Desenho esquemático da estrutura de um fototransistor e o respectivo circuito equivalente. 52
Figura 15 – Desenho esquemático do perfil do ICPD, mostrando as cargas presentes no canal na polarização de operação. 54
Figura 16 – Desenho esquemático do perfil de transistores *junctionless* tipo-n (A) e tipo-p (B) 55
Figura 17 – Diagrama de bandas de energia de um fototransistor *junctionless* tipo-n sob iluminação. 56
Figura 18 – Desenho esquemático do arranjo experimental. 58
Figura 19 – Curvas experimentais da corrente de dreno versus tensão de porta do ^{BE}SOI pMOSFET com e sem irradiação ultravioleta. A diferença entre elas também é apresentada. 59

Figura 20 – Curva experimental da corrente de dreno versus tempo medida enquanto se ligava e desligava a luz ultravioleta para o dispositivo canal-p. 60
Figura 21 – Ajuste da função trabalho usando curvas I_{DS} versus V_{GF} experimental e simuladas. 61
Figura 22 – Curvas simuladas da corrente de dreno versus tensão de porta do ^{BE}SOI MOSFET canal-p com e sem irradiação ultravioleta. A diferença entre elas também é mostrada. 62
Figura 23 – Densidade de corrente nas primeira e segunda interfaces para os casos com e sem irradiação ultravioleta. 63
Figura 24 – Desenho esquemático do efeito de divisão de corrente entre as interfaces. 65
Figura 25 – Curvas experimentais da corrente de dreno versus tensão de porta do ^{BE}SOI nMOSFET com e sem irradiação ultravioleta. A diferença entre elas também é mostrada. 66
Figura 26 – Curva experimental da corrente de dreno versus tempo medida enquanto se ligava e desligava a luz ultravioleta para o dispositivo canal-n. 66
Figura 27 – Curvas simuladas da corrente de dreno versus tensão de porta dispositivo canal-n com e sem irradiação ultravioleta. A diferença entre elas também é mostrada. 67
Figura 28 – Curvas I_{DS} versus V_{GF} simuladas de um dispositivo ^{BE}SOI construído em substrato dopado com Fósforo (tipo-p). São mostrados ambos os casos canal-p e -n com e sem irradiação ultravioleta. 68
Figura 29 – Comparação entre valores simulados de ΔI_{DS} usando irradiações luminosas monocromáticas com diferentes comprimentos de onda. 69
Figura 30 – Curvas experimentais da corrente de dreno versus tensão de porta do ^{BE}SOI pMOSFET com irradiação ultravioleta e vermelha e sem nenhuma radiação. 70
Figura 31 – Curvas simuladas da corrente de dreno versus tensão de porta do ^{BE}SOI pMOSFET com irradiação ultravioleta e vermelha e sem nenhuma radiação. 71
Figura 32 – Dispositivos ^{BE}SOI MOSFET de diferentes dimensões presentes na mesma lâmina. 72
Figura 33 – Curvas experimentais da corrente de dreno versus tensão de porta de dispositivos ^{BE}SOI com L = W = 100 μm e L = W = 10 μm com e sem iluminação. A diferença entre as curvas também é apresentada. 73

Figura 34 – Curvas experimentais em escala logarítmica da corrente de dreno versus tensão de porta de dispositivos ^{BE}SOI com L = W = 100 μm e L = W = 10 μm com e sem iluminação. 74
Figura 35 – Desenho esquemático do efeito de acoplamento de interfaces no ^{BE}SOI MOSFET.....75
Figura 36 – Curva experimental da corrente de dreno versus tensão de segunda porta para o dispositivo L = W = 10 μm com e sem iluminação para duas polarizações de porta. 76
Figura 37 – Curva experimental da corrente de dreno versus tensão de segunda porta para o dispositivo L = W = 100 μm com e sem iluminação para duas polarizações de porta. 77
Figura 38 – Variação decorrente da iluminação da tensão de limiar da segunda interface em função da tensão de porta aplicada. 78
Figura 39 – Valores simulados de ΔI_{DS} versus t_{Si} para uma polarização V_{GF} = - 2,5 V. As irradiações de 400 nm e 635 nm são parametrizados em função do fluxo luminoso recebido.....79
Figura 40 – Desenho esquemático da região de subposição (*underlap*) do ^{BE}SOI indicando a posição do corte A-A'. 80
Figura 41 – Total de pares gerados devido radiação luminosa ao longo do corte A-A'. 81
Figura 42 – Total de pares recombinados devido à recombinação ao longo do corte A-A'. 82
Figura 43 – Concentração de lacunas na extensão do corte A-A' em função da profundidade no canal para vários valores de t_{Si}.....83
Figura 45 – Taxa de recombinação sem luz incidente na extensão do corte A-A' em função da profundidade no canal para vários valores de t_{Si}. 84
Figura 44 – Concentração de elétrons na extensão do corte A-A' em função da profundidade no canal para vários valores de t_{Si}.....84
Figura 47 – Desenho esquemático da borda do canal do dispositivo ^{BE}SOI. A separação da corrente de dreno entre as interfaces é ilustrada pelas setas. 85
Figura 46 – Taxa de recombinação com luz incidente na extensão do corte A-A' em função da profundidade no canal para vários valores de tSi. 85
Figura 48 – Variações ΔI_{DS} extraídas das curvas simuladas para canais dopados tanto com boro quando fósforo em várias concentrações. 86

Figura 49 – Curvas simuladas da corrente de dreno em função da tensão de porta para dispositivos ^{BE}SOI pMOSFET com canal dopado com boro em várias concentrações. 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grandezas radiométricas importantes. 40
Tabela 2 – Grandezas fotométricas importantes. 41
Tabela 3 – Valores das variações da corrente de dreno observados na Figura 20. ..60
Tabela 4 – Valores das variações da densidade de corrente observados na Figura 23. 64
Tabela 5 – Valores experimentais de ΔI_{DS} para irradiações ultravioleta e vermelha..71

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

APD	*Avalanche Photodiode* (Fotodiodo avalanche)
^{BE}SOI	*Back Enhanced* (Induzido pela segunda porta) *SOI*
CMOS	*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (Metal óxido semicondutor complementar)
FD	*Fully Depleted* (totalmente depletado)
FinFET	*Fin Field-Effect-Transistor* (Transistor de efeito de campo com aleta)
ICPD	*Interface Coupled Photodetector* (Fotodetetor de interface acoplada)
LSI	Laboratório de Sistemas Integráveis
MOSFET	*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (Transistor de efeito de campo metal óxido semicondutor)
nMOSFET	*n-channel Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (Transistor de efeito de campo metal óxido semicondutor com canal tipo n)
PD	*Partially Depleted* (Parcialmente depletado)
pMOSFET	*p-channel Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (Transistor de efeito de campo metal óxido semicondutor com canal tipo p)
PSU	Fonte de energia (*Power Supply Unit*)
SCE	*Short Channel Effect* (Efeito de canal curto)
SOI	*Silicon-On-Insulator* (Silício sobre isolante)
USP	Universidade de São Paulo
UTBB	*Ultra Thin Body and Buried Oxide* (Corpo e óxido enterrados ultrafinos)
UV	Ultravioleta
UV-A	Ultravioleta na região A (λ = 315–400 nm)
UV-B	Ultravioleta na região B (λ = 280–315 nm)
UV-C	Ultravioleta na região C (λ = 100–280 nm)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área iluminada [cm^2].
A_{LDR}	Ganho do fotocondutor [A/A].
A_{sub}	Área da região de subposição [cm^2].
C_b	Capacitância entre canal e substrato por unidade de área [F/cm^2].
C_{BOX}	Capacitância do óxido enterrado por unidade de área [F/cm^2].
C_D	Capacitância da região de depleção por unidade de área [F/cm^2].
C_{OX}	Capacitância do óxido de porta por unidade de área [F/cm^2].
C_{Si}	Capacitância do silício por unidade de área [F/cm^2].
c	Velocidade da luz no vácuo [m/s].
d	Distância entre os LEDs e a lâmina com os dispositivos ^{BE}SOI [cm].
D_p	Constante de difusão para lacunas [cm^2/s].
D_{LDR}	Profundidade do fotocondutor [cm].
E	Campo elétrico dentro do fotocondutor [V/m].
$E_{0,x}$	Vetor do campo elétrico no plano y-z [V/m].
E_G	Energia de separação entre as bandas do Silício [eV].
E_e	Irradiância [W/m^2].
E_v	Iluminância [lx].
E_x	Onda eletromagnética se propagando no eixo x [V/m].
f	Frequência [Hz].
G	Taxa de geração de portadores [$cm^{-3}s^{-1}$].
G_e	Grandeza radiométrica genérica.
G_v	Grandeza fotométrica genérica.
g_m	Transcondutância [S].
h	Constante de Planck [eV.s].
h_{FE}	Ganho emissor comum do transistor bipolar [A/A].
I_{CT}	Corrente total no coletor do fototransistor [A].
I_{DS}	Corrente de dreno [A].
I_e	Intensidade radiante [W/sr].
I_v	Intensidade luminosa [cd].
I_F	Corrente de polarização direta nos diodos [mA].
I_{op}	Corrente óptica [A].

j	Número complexo.
J_{der}	Densidade de corrente de deriva dos portadores gerados opticamente [A/cm^2].
J_{dif}	Densidade de corrente de difusão dos portadores gerados opticamente [A/cm^2].
J_{op}	Densidade de corrente óptica [A/cm^2].
K	Número de onda [m^{-1}].
k	Constante de Boltzmann [eV/K].
K_x	Número de onda no eixo x [m^{-1}].
L	Comprimento de canal [µm].
L_{LDR}	Comprimento do fotocondutor [cm].
L_e	Radiância [W/(m^2.sr)].
L_p	Comprimento de difusão para lacunas [cm].
L_v	Luminância [cd/sr].
L_β	Comprimento de penetração [µm].
N_A	Concentração de dopantes aceitadores [cm^{-3}].
n	Constante de efeito de corpo.
$\underline{n}$	Índice de refração complexo.
n_{FD}	Constante de efeito de corpo do dispositivo FD SOI.
n_i	Concentração intrínseca de portadores [cm^{-3}].
n_{Im}	Parte imaginária do índice de refração.
$n_{PD,bulk}$	Constante de efeito de corpo do dispositivo PD SOI e MOSFET convencional.
n_{Re}	Parte real do índice de refração.
P_{op}	Potência radiante incidente no fotodetetor [W].
p_{n0}	Concentração inicial de lacunas [cm^{-3}].
Q_{BOX}	Total de cargas no óxido enterrado por unidade de área [C/cm^2].
Q_{depl}	Carga de depleção por unidade de área [C/cm^2].
Q_{inv1}	Carga de inversão na primeira interface por unidade de área [C/cm^2].
Q_{OX}	Total de cargas no óxido de porta por unidade de área [C/cm^2].
Q_{S2}	Carga na segunda interface por unidade de área [C/cm^2].
q	Carga elementar do elétron [C].
R	Responsividade [A/W].

r	Raio da área iluminada [cm].
S	Inclinação de sublimiar [mV/dec].
T	Temperatura [K].
t	Tempo [s].
t_r	Tempo de trânsito dos portadores gerados opticamente [s].
t_{BOX}	Espessura do óxido enterrado [nm].
t_{OX}	Espessura do óxido de porta [nm].
t_{Si}	Espessura da camada de silício [nm].
V_D	Tensão de dreno [V].
V_{DS}	Tensão entre fonte e dreno [V].
$\|V_{DS}\|$	Módulo da tensão entre fonte e dreno [V].
V_{Dsat}	Tensão de dreno em saturação [V].
$V_{DS\ nmos}$	Tensão entre fonte e dreno no dispositivo canal-n [V].
$V_{DS\ pmos}$	Tensão entre fonte e dreno no dispositivo canal-p [V].
V_{FB}	Tensão de faixa plana [V].
V_{GB}	Tensão no substrato [V].
$V_{GB,acc2}$	Tensão de substrato para segunda interface em acumulação [V].
V_{GF}	Tensão entre porta e fonte [V].
V_{GF1}	Tensão entre porta e fonte para operação do ^{BE}SOI na região A [V].
V_{GF2}	Tensão entre porta e fonte para operação do ^{BE}SOI na região B [V].
V_{GF3}	Tensão entre porta e fonte para operação do ^{BE}SOI na região C [V].
V_S	Tensão de fonte [V].
V_{TH}	Tensão de limiar [V].
V_{TH0}	Tensão de limiar para polarização de substrato nula [V].
V_{TH2}	Tensão de limiar da segunda interface [V].
$V_{TH,acc2}$	Tensão de limiar para segunda interface em acumulação [V].
$V_{TH,depl2}$	Tensão de limiar para segunda interface em depleção [V].
$V_{TH,inv2}$	Tensão de limiar para segunda interface em inversão [V].
V_{THn}	Tensão de limiar do dispositivo canal-n [V].
V_{THp}	Tensão de limiar do dispositivo canal-p [V].
v	Velocidade da onda [m/s].
v_e	Velocidade de deriva para elétrons [cm/s].
v_p	Velocidade de deriva para lacunas [cm/s].

W	Largura do canal [μm].
W_i	Largura da região de depleção ou intrínseca [cm].
W_{LDR}	Largura do fotocondutor [cm].
x	Posição no eixo x [m].
$x_{dmáx}$	Máxima profundidade da camada de depleção [cm].
$\bar{y}$	Função de eficiência luminosa [lm/W].
α	Fator de acoplamento capacitivo.
β	Coeficiente de absorção [cm^{-1}].
γ	Parâmetro de efeito de corpo [$V^{1/2}$].
Δ_1	Variação da densidade de corrente na região de subposição [A/cm^2].
Δ_2	Variação da densidade de corrente na primeira interface [A/cm^2].
Δ_3	Variação da densidade de corrente na segunda interface [A/cm^2].
ΔI_{DS}	Variação da corrente de dreno entre casos com e sem irradiação [nA].
$\Delta I_{DS,\,400}$	Variação da corrente de dreno para radiação ultravioleta (λ = 400 nm) [nA].
$\Delta I_{DS,\,635}$	Variação da corrente de dreno para radiação vermelha (λ = 635 nm) [nA].
Δn	Diferença de concentração de elétrons devido geração óptica [$cm^{-3}s^{-1}$].
Δp	Diferença de concentração de lacunas devido geração óptica [$cm^{-3}s^{-1}$].
ε_{Si}	Permissividade do silício [F/cm].
η	Eficiência quântica.
θ	Ângulo de visão 50% [°].
λ	Comprimento de onda [nm].
λ_c	Comprimento de onda de absorção máxima [nm].
μ_n	Mobilidade do elétron no silício [$cm^2/(V.s)$].
μ_p	Mobilidade da lacuna no silício [$cm^2/(V.s)$].
σ	Condutividade [S/cm].
τ	Tempo de vida dos portadores gerados opticamente [s].
Φ_e	Fluxo radiante [W].
Φ_M	Função trabalho do metal [V].

Φ_{MS1}	Diferença entre funções trabalho do metal de porta e semicondutor [V].
Φ_{MS2}	Diferença entre funções trabalho do substrato e silício [V].
Φ_{op}	Fluxo de fótons [$cm^{-2}.s^{-1}$].
Φ_{v}	Fluxo luminoso [lm].
ϕ_{F}	Potencial de Fermi [V].
ϕ_{S1}	Potencial na primeira interface [V].
ϕ_{S2}	Potencial na segunda interface [V].
Ω	Ângulo sólido [sr].
ω	Frequência angular [rad/s].

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 22
1.1 OBJETIVOS 24
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 26
2.1 TECNOLOGIA SOI (SILÍCIO SOBRE ISOLANTE) 26
2.1.1 Classificação 27
2.1.2 Tensão de limiar 29
2.1.3 Constante de efeito de corpo (n) 31
2.1.4 Transcondutância (gm) 32
2.1.5 Inclinação de sublimiar (S) 33
2.2 ^{BE}SOI (BACK ENHANCED) MOSFET 33
2.2.1 Princípio de operação 35
2.3 CONCEITOS EM ÓPTICA 40
2.3.1 Definições em fotometria e radiometria 40
2.3.2 Propriedades ópticas do silício 42
2.4 DISPOSITIVOS FOTODETETORES 45
2.4.1 Fotocondutor 46
2.4.2 Fotodiodos 49
2.4.3 Fototransistor 52
2.4.4 ICPD (Interface Coupled Photodetector) 53
2.4.5 Fototransistor junctionless (sem junção) 54
3 INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO LUMINOSA NO ^{BE}SOI MOSFET 58
3.1 SENSIBILIDADE DO ^{BE}SOI P-MOSFET À RADIAÇÃO UV 58
3.1.1 Resultados experimentais 58
3.1.2 Resultados simulados (modelo bidimensional) 61
3.2 A INSENSIBILIDADE DO DISPOSITIVO ^{BE}SOI N-MOSFET 65
3.2.1 Alteração da dopagem de substrato 67
3.3 SENSIBILIDADE PARA OUTROS COMPRIMENTOS DE ONDA NO ESPECTRO VISÍVEL 69
3.4 INFLUÊNCIA DO EFEITO DE ACOPLAMENTO ENTRE INTERFACES 72
4 OTIMIZAÇÃO DO ^{BE}SOI MOSFET COMO SENSOR DE LUZ 79
4.1 ESPESSURA DA CAMADA DE SILÍCIO 79

4.2 DOPAGEM DO CANAL 86
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 89
5.1 SUGESTÕES DE SEQUÊNCIA DO TRABALHO 91
REFERÊNCIAS 92
APÊNDICE A – CÁLCULO DA IRRADIÂNCIA 96
APÊNDICE B – CÁLCULO DA RESPONSIVIDADE 98
APÊNDICE C – DISPOSITIVO GERADO NO SENTAURUS 100
APÊNDICE D – CÓDIGO DA SIMULAÇÃO NO SENTAURUS 103
APÊNDICE E – PUBLICAÇÕES GERADAS 106

1 INTRODUÇÃO

O grande desafio da microeletrônica é a redução das dimensões dos dispositivos semicondutores. Este esforço é chamado de escalamento e, por décadas, notou-se um aumento exponencial do número de transistores em circuitos integrados com o passar dos anos. Essa tendência foi observada desde 1965, quando pela primeira vez Gordon Moore, cofundador da Intel, constatou que o número de transistores em um circuito integrado dobraria a cada 12 meses (MOORE, 1965), corrigido posteriormente para 18 a 24 meses. Essa tendência ficou conhecida como “Lei de Moore” e a abordagem utilizada para concretizá-lo teve sucesso, melhorando o controle eletrostático sobre as cargas no canal (IWAI, 2015). O foco das pesquisas é reduzir os efeitos de canal curto (SCE) por meio de melhorias nos processos – porta metálica, silício tensionado e óxidos com alta constante dielétrica – mudanças estruturais – FinFETs em lâminas convencionais (*bulk*) ou SOI (CHIARELLA, 2010), UTBB FDSOI (*Ultra-thin Body and Buried Oxide, Fully Depleted SOI)* (LE PAILLEUR, 2013) e dispositivos nanofio (*nanowire*) – e novos mecanismos de condução de corrente – Túnel FETs (IONESCU; RIEL, 2011). Essa abordagem obteve êxito até agora e melhorou o desempenho elétrico dos dispositivos além de reduzir seu tamanho, permitindo, desse modo, a construção de circuitos mais complexos e de melhor desempenho.

Uma nova abordagem que tem ganhado popularidade é o desenvolvimento de transistores reconfiguráveis. Essa nova ideia permite que o mesmo dispositivo opere tanto como canal-n quanto canal-p e, desse modo, é possível usar a mesma área da lâmina para mais de uma função. Um dos problemas dos transistores reconfiguráveis é sua difícil fabricação. Mesmo que a maioria não tenha etapas de dopagem intencionais (como definição de fonte e dreno), o que evita problemas como flutuações de impurezas, é comum que sua estrutura seja nanofio (*nanowire*) (HEINZIG et al., 2012) (WESSELY et al., 2013) (TROMMER et al., 2016), uma tecnologia no estado da arte ainda não utilizada comercialmente. Isso traz uma grande dificuldade para construir tais dispositivos, pois essa técnica necessita processos litográficos muito complexos e ainda não chegou numa etapa de fabricação em larga escala.

Pensando nos benefícios da tecnologia reconfigurável e numa fabricação mais simples, foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Integráveis da

Universidade de São Paulo um novo dispositivo chamado ^{BE}SOI (*Back Enhanced*, induzido pela segunda porta) MOSFET. Suas maiores vantagens são (i) a mudança de modo de operação (permutação entre canal-p e canal-n) com apenas uma alteração na polarização na segunda porta (V_{GB}), (ii) sua fabricação extremamente simples, sem nenhuma etapa intencional de dopagem e (iii) usa um processo planar com apenas três máscaras litográficas. A Figura 1 a seguir mostra um desenho esquemático do ^{BE}SOI MOSFET com destaque para as regiões de subposição.

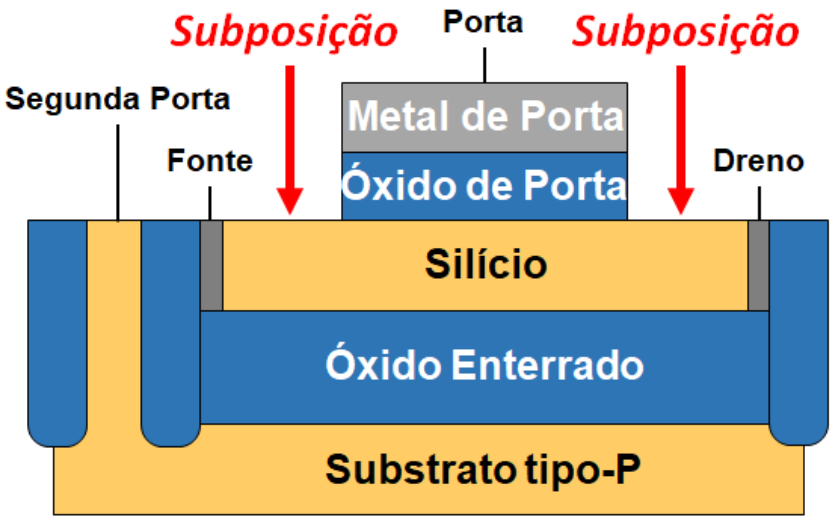


Figura 1 – Desenho esquemático do ^{BE}SOI mostrando as regiões de subposição (*underlap*) entre porta e eletrodo de fonte/dreno.
Fonte: Autor.

Por causa da fabricação simples, o ^{BE}SOI é compatível com outras tecnologias SOI disponíveis comercialmente. Esse fato permite a integração desse dispositivo reconfigurável com outros SOI MOSFETs convencionais em uma mesma lâmina. Portanto, um circuito integrado pode conter ambas as lógicas digitais (convencional e reconfigurável) sem mudanças significativas no processo de fabricação.

Uma característica da tecnologia ^{BE}SOI é a presença de regiões no canal entre os eletrodos de fonte/dreno e o eletrodo de porta, chamadas de subposição (*underlap*). Pela característica não dopada dessas regiões e por estarem fora da influência do campo elétrico da porta, cria-se uma região neutra, onde é possível explorar efeitos externos para causar uma variação na corrente de dreno, como a geração de portadores e a deposição de outros materiais sobre essa região. Nesse sentido, trabalhos anteriores estudaram a aplicação de materiais biológicos sobre a subposição. Isso altera a constante dielétrica do material sobre essa região a fim de

causar o espraiamento do campo elétrico de porta, que aumenta a influência do eletrodo de porta sobre o canal. Assim, é possível realizar um detector de partículas biológicas usando o ^{BE}SOI (YOJO et al., 2018b) (YOJO et al., 2018c).

Neste trabalho será estudada a sensibilidade do ^{BE}SOI à radiação luminosa explorando a variação da corrente de dreno do dispositivo causada pela geração óptica nas regiões de subposição. Já foi bem explorado na literatura e é sabido que transistores SOI são menos suscetíveis à radiação, pois a camada de silício onde os dispositivos são construídos é muito fina, especialmente em tecnologias como FD SOI (COLINGE, 2004). Por outro lado, em trabalhos anteriores (YOJO et al., 2017a) foi notado que a corrente de dreno (I_{DS}) tende à estabilização quando a tensão entre fonte e dreno (V_{DS}) é muito elevada no caso de operação tipo-n ou muito negativa no caso tipo-p. Este fenômeno está relacionado à baixa densidade de portadores na região de subposição do dispositivo. Desse modo, o dispositivo tem uma condição de polarização onde a corrente pode ser alterada com uma mínima geração de portadores. Isso permite maior sensibilidade a efeitos que ocasionam na geração de pares elétron-lacuna, como a radiação luminosa. Esse fato pode indicar o ^{BE}SOI como candidato a módulos sensores de luz facilmente integráveis a circuitos SOI convencional devido à compatibilidade do ^{BE}SOI com essa tecnologia.

1.1 OBJETIVOS

Deseja-se neste trabalho analisar a sensibilidade de dispositivos ^{BE}SOI (*Back Enhanced*) MOSFET à radiação luminosa a fim de propô-lo como elemento sensor de luz integrado às tecnologias SOI convencionais. Para tal, serão estudadas num primeiro momento as características do dispositivo já fabricado por meio de caracterizações elétricas e simulações numéricas usando o TCAD Sentaurus. Será comparada, por exemplo, a variação da corrente de dreno quando irradiado com luz para diferentes polarizações e sensibilidade para excitações de diferentes comprimentos de onda. Também serão analisados os mecanismos pelos quais derivam a sensibilidade dos dispositivos. Baseando-se nesses resultados, o dispositivo original será otimizado a fim de melhorar sua sensibilidade. Essa segunda parte faz alterações estruturais no transistor usado anteriormente para atingir esses objetivos e apresenta resultados sustentados por simulações numéricas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, são eles:

Capítulo 1 – Introdução: Esta primeira parte apresenta o trabalho e fez as considerações iniciais. É apresentado um breve histórico do desenvolvimento de dispositivos em microeletrônica bem como conceitos preliminares do dispositivo ^{BE}SOI estudado. Em seguida mencionam-se as motivações para a realização deste trabalho e propõe-se os objetivos pretendidos.

Capítulo 2 – Revisão Biliográfica: Apresenta a base teórica usada no trabalho. Os temas a serem abordados resumem-se a uma introdução à tecnologia SOI; maiores detalhes dos dispositivos ^{BE}SOI, principalmente sobre seu princípio de funcionamento; e, finalmente, conceitos de óptica e fundamentos de dispositivos fotodetetores.

Capítulo 3 – Influência da Radiação Lumiosa no ^{BE}SOI MOSFET: Apresenta o estudo da sensibilidade do dispositivo a incidências luminosas monocromáticas com comprimentos de onda variando dentro do espectro visível. É comparada a sensibilidade para diferentes polarizações com o intuito de verificar o melhor caso. Por fim, os resultados, derivados de experimentos e simulações, são analisados com o objetivo de estudar os mecanismos que causam a sensibilidade.

Capítulo 4 – Otimização do Dispositivo: trata de tentativas de melhorar a sensibilidade do ^{BE}SOI à luz por meio de alterações na estrutura do dispositivo. São analisados resultados baseados em simulações numéricas com o intuito de obter um ponto ótimo para uso do ^{BE}SOI para aplicações sensoras de radiação luminosa.

Capítulo 5 – Considerações Finais: Apresenta as considerações finais compilando os resultados experimentais e simulados obtidos nas seções anteriores. Também são feitas propostas para a continuação do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste captulo é realizado um estudo preliminar sobre alguns conceitos de áreas relevantes. É apresentado o resultado desta pesquisa teórica, que engloba as áreas de tecnologia de Silício Sobre Isolante (*Silicon-on-Insulator*, SOI), o novo dispositivo ^{BE}SOI (*Back Enhanced*) MOSFET, noções de óptica e funcionamento básico dos principais fotodetetores.

2.1 TECNOLOGIA SOI (SILÍCIO SOBRE ISOLANTE)

A tecnologia SOI (*Silicon-on-Insulator*) se baseia em construir os dispositivos em uma fina camada de silício sobre um isolante. A vantagem perante a tecnologia MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) convencional (*bulk*) é que a região ativa dos dispositivos SOI é isolada do substrato. Segundo Colinge (2004), a estrutura impede interações entre ambos, prevenindo efeitos indesejados como o efeito do tiristor parasitário (*latch-up*) em estruturas MOS Complementar (*Complementary MOS*, CMOS).

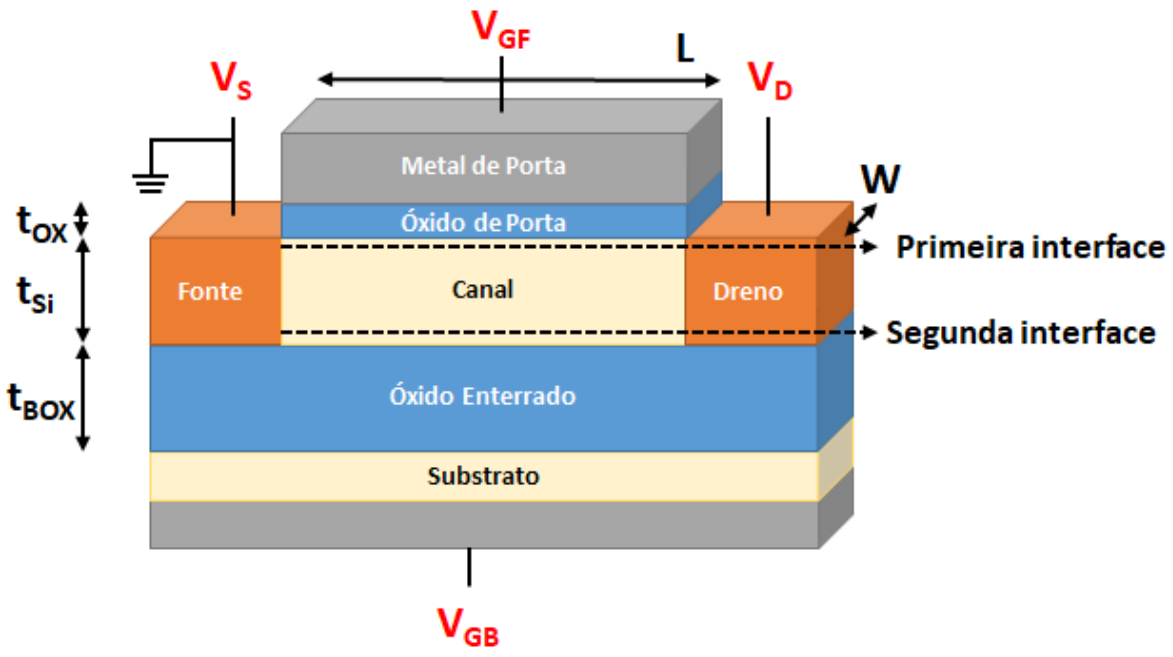


Figura 2 – Desenho esquemático de um dispositivo SOI MOSFET.
Fonte: Autor.

Além disso, a tecnologia SOI traz ganhos para as características elétricas dos dispositivos, e.g., redução de capacitâncias parasitárias, menor inclinação de sublimiar, maior transcondutância e melhor resistência à radiação. Também há vantagens do ponto de vista de fabricação, pois mitiga eventuais problemas e simplifica processos, como dopagem de junções rasas (COLINGE, 2004). Na Figura 2 é apresentado um desenho esquemático de um transistor SOI MOSFET. No desenho estão denominados os símbolos que são usados ao longo deste texto. As polarizações de primeira porta (*front gate*) e segunda porta (*back gate*) são representadas por V_{GF} e V_{GB}, respectivamente. Já V_{DS} denomina a tensão entre dreno (*drain*) e fonte (*source*). Quanto às dimensões do canal, a largura é denominada por W e o comprimento por L. As espessuras do óxido de porta, camada de silício e óxido enterrado (*buried oxide*) são representadas por t_{OX}, t_{Si} e t_{BOX}, respectivamente. Também são definidos nomes para as interfaces, a “primeira” refere-se à interface entre óxido de porta e o canal de silício e “segunda” àquela entre óxido enterrado e o canal de silício.

2.1.1 **Classificação**

Por terem duas interfaces (primeira e segunda), que envolvem o canal do transistor, os dispositivos SOI MOSFET têm duas regiões de depleção. Dependendo da espessura da camada de silício, essas regiões podem interagir entre si, o que altera as características de operação desses transistores. Desse modo, os dispositivos SOI podem ser divididos em dois tipos: parcialmente depletado (*partially depleted,* PD) e totalmente depletado (*fully depleted*, FD), dependendo da espessura t_{Si} (COLINGE, 2004).

A região de depleção de cada interface pode ter seu valor máximo ($x_{dmáx}$) calculado a partir da equação (1).

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{4.\varepsilon_{Si}.\phi_F}{q.N_A}} \qquad (1)$$

onde ε_{Si} denomina a permissividade do silício, ϕ_F o potencial de Fermi, q a carga elementar do elétron e N_A a concentração de dopantes aceitadores.

A expressão para ϕ_F é definida pela equação (2):

$$\phi_F = \frac{k.T}{q} ln \frac{N_A}{n_i} \quad (2)$$

onde k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura medida em Kelvin e n_i é a concentração intrínseca de portadores do silício.

No dispositivo PD SOI não há interação entre as regiões de depleção, pois t_{Si} é maior que o dobro de $x_{dmáx}$. Desse modo, há uma região neutra no canal entre as regiões de depleção, pois, quaisquer que sejam V_{GF} e V_{GB}, as depleções de cada interface nunca se sobreporão. Essa região neutra pode ser conectada ao terra pelo chamado “contato de corpo”, desse modo a operação do PD SOI é igual a um MOSFET convencional (*bulk*). Caso contrário, se for deixada flutuante, podem aparecer alguns efeitos parasitários, que degradam o desempenho do dispositivo.

No caso FD SOI existe a interação entre as interfaces, pois t_{Si} é menor que $x_{dmáx}$. Desse modo, todo o canal do transistor estará em depleção quando V_{GF} for igual à tensão de limiar (V_{TH}). Estes dispositivos apresentam as melhores características. Segundo Colinge (2004), além de estarem livres de efeitos de corpo flutuante (se a região próxima ao óxido enterrado não estiver em acumulação), obtém-se uma maior transcondutância, menor efeito de canal curto e inclinação de sublimiar quase ideal.

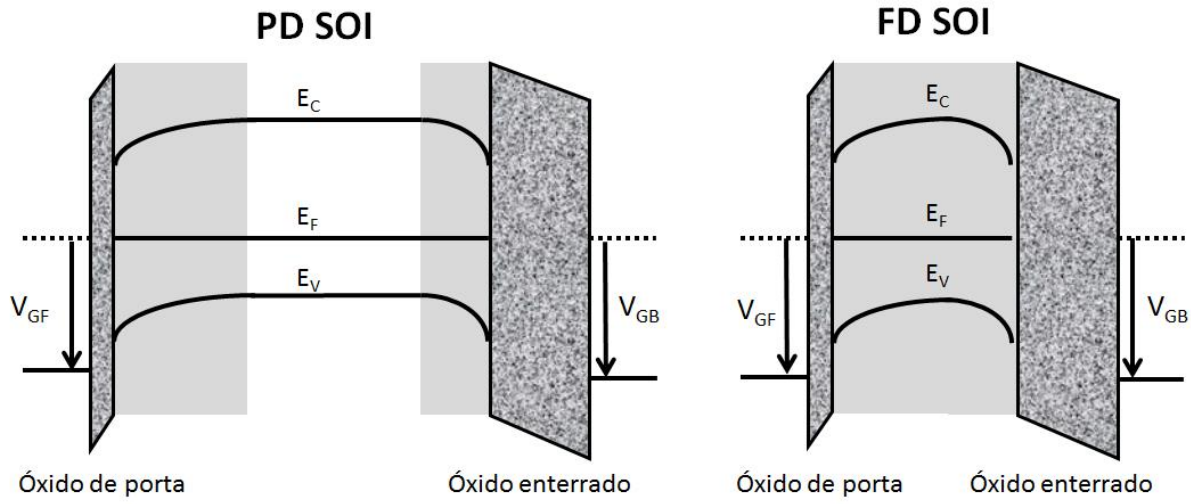


Figura 3 – Diagrama de bandas de energia de transistores SOI canal-n parcialmente e totalmente depletados.
Fonte: Adaptado de Colinge (2004).

A Figura 3 mostra um diagrama de bandas de energia de dispositivos PD e FD SOI. É possível notar as diferenças de interações entre as regiões de depleção de cada interface.

2.1.2 **Tensão de limiar**

A tensão de limiar é definida como a polarização pela qual, se aplicada à porta, é possível criar uma camada de inversão na primeira interface. Para tal, o potencial de superfície na primeira interface (ϕ_{S1}) deve ser igual à $2\phi_F$ (MARTINO et al., 2004).

Nos dispositivos PD SOI, como não há interação entre as regiões de depleção das interfaces, a tensão de limiar segue o mesmo modelamento que um MOSFET convencional (COLINGE, 2004). Desse modo, define-se V_{TH} de um dispositivo PD SOI com substrato tipo-p pela expressão (3):

$$V_{TH}=V_{FB}+2\phi_F+\frac{q\,N_A\,x_{dmáx}}{C_{OX}} \tag{3}$$

onde C_{OX} é a capacitância do óxido de porta por unidade de área e V_{FB} é a tensão de faixa plana (*flatband*), que é definida pela expressão (4):

$$V_{FB} = \Phi_{MS1} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} \tag{4}$$

Na equação, Φ_{MS1} é a diferença entre a função trabalho do metal de porta e o semicondutor e Q_{OX} é a densidade efetiva de cargas no óxido de porta.

No caso totalmente depletado, tanto a tensão de porta quanto a de substrato influenciam os potenciais de superfície de ambas as interfaces, pois existe interação entre as regiões de depleção (COLINGE, 2004). Para se obter as expressões da tensão de limiar, usa-se o modelo de Lim e Fossum (LIM; FOSSUM, 1983) a seguir:

$$V_{GF} = \Phi_{MS1} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} + \left(1+\frac{C_{Si}}{C_{OX}}\right)\phi_{S1} - \frac{C_{Si}}{C_{OX}}\phi_{S2} - \frac{\frac{1}{2}Q_{depl}+Q_{inv1}}{C_{OX}} \tag{5}$$

$$V_{GB} = \Phi_{MS2} - \frac{Q_{BOX}}{C_{BOX}} - \frac{C_{Si}}{C_{BOX}}\phi_{S1} + (1+\frac{C_{Si}}{C_{BOX}})\phi_{S2} - \frac{\frac{1}{2}Q_{depl}+Q_{S2}}{C_{BOX}} \quad (6)$$

Nas equações (5) e (6), C_{Si} é a capacitância do silício por unidade de área, ϕ_{S1} e ϕ_{S2} são o potencial de superfície da primeira e segunda interfaces, respectivamente. Q_{depl} é a carga de depleção por unidade de área, Q_{inv1} é a carga de inversão na primeira interface por unidade de área, Φ_{MS2} é a diferença entre as funções trabalho do substrato e silício, Q_{BOX} é o total de cargas no óxido enterrado por unidade de área, C_{BOX} é a capacitância do óxido enterrado por unidade de área e Q_{S2} é a carga na segunda interface por unidade de área.

É notório que o valor da tensão de limiar irá depender do estado da segunda interface. No caso da segunda interface em acumulação, temos $\phi_{S2} = 0$, $Q_{inv1} = 0$ e $\phi_{S1} = 2\phi_F$. Logo, a tensão de limiar é dada pela equação (7).

$$V_{TH,acc2} = \Phi_{MS1} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} + (1+\frac{C_{Si}}{C_{OX}})2\phi_F - \frac{\frac{1}{2}Q_{depl}}{C_{OX}} \quad (7)$$

Quando há inversão na segunda interface, $\phi_{S1} = \phi_{S2} = 2\phi_F$ e $Q_{inv1} = 0$, portanto:

$$V_{TH,inv2} = \Phi_{MS1} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} + 2\phi_F - \frac{\frac{1}{2}Q_{depl}}{C_{OX}} \quad (8)$$

Por fim, quando a segunda interface está em depleção, seu potencial de superfície está no intervalo $0 < \phi_{S2} < 2\phi_F$ e depende da tensão V_{GB}. Considerando-se $\phi_{S1} = 2\phi_F$ e $Q_{inv1} = Q_{S2} = 0$, obtém-se o resultado da expressão (9).

$$V_{TH,depl2} = V_{TH,acc2} - \frac{C_{Si}C_{BOX}}{C_{OX}(C_{Si}+C_{BOX})}(V_{GB}-V_{GB,acc2}) \quad (9)$$

onde $V_{GB,acc2}$ é dado pela equação (10) para $\phi_{S2} = 2\phi_F$, $\phi_{S2} = 0$ e $Q_{S2} = 0$.

$$V_{GB,acc2} = \Phi_{MS2} - \frac{Q_{BOX}}{C_{BOX}} - \frac{C_{Si}}{C_{BOX}}\ 2\phi_F - \frac{Q_{depl}}{2C_{OX}} \quad (10)$$

2.1.3 **Constante de efeito de corpo (n)**

Em dispositivos MOSFET convencionais, o chamado efeito de corpo é a dependência da tensão de limiar com a polarização de substrato. Para esses dispositivos, pode-se escrever (11) (MARTINO et al., 2004):

$$V_{TH} = \Phi_{MS} - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} + 2\phi_F + \frac{\sqrt{2\varepsilon_{S1}qN_A(2\phi_F - V_{GB})}}{C_{OX}} \quad (11)$$

A tensão de limiar com polarização de substrato $V_{TH}(V_{GB})$ em função da tensão de limiar para $V_{GB} = 0$ (V_{TH0}) pode ser escrita como indicado em (12).

$$V_{TH}(V_{GB}) = V_{TH0} + \gamma\left(\sqrt{2\phi_F - V_{GB}} - \sqrt{2\phi_F}\right) \quad (12)$$

onde o parâmetro de efeito de corpo (γ) é:

$$\gamma = \frac{\sqrt{2\varepsilon_{S1}qN_A}}{C_{OX}} \quad (13)$$

Em dispositivos PD SOI, o efeito de corpo segue a mesma descrição do MOSFET convencional caso o corpo do transistor esteja aterrado. No caso de corpo flutuante, o potencial V_{GB} é determinado por efeitos capacitivos e correntes nas junções PN, o que pode resultar em alguns efeitos indesejados (COLINGE, 2004).

Para dispositivos FD SOI, o efeito de corpo pode ser modelado a partir da derivada das equações (7) a (9), como mostrado a seguir (COLINGE, 2004):

$$\frac{dV_{TH,acc2}}{dV_{GB}} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{dV_{TH,inv2}}{dV_{GB}} = 0 \tag{15}$$

$$\frac{dV_{TH,depl2}}{dV_{GB}} = - \frac{C_{Si}C_{BOX}}{C_{OX}(C_{Si}+C_{BOX})} = - \frac{\varepsilon_{Si}C_{BOX}}{C_{OX}(t_{Si}C_{Si}+\varepsilon_{Si})} \equiv - \alpha \tag{16}$$

O parâmetro α é o fator de acoplamento capacitivo do transistor e representa a razão entre C_b, a capacitância entre o canal e substrato, e C_{OX}, a capacitância do óxido de porta. Em um dispositivo MOSFET convencional $\alpha = \frac{C_D}{C_{OX}} = \frac{\varepsilon_{Si}}{x_{dmáx}C_{OX}}$, onde C_D é a capacitância da região de depleção. Já para um transistor FD SOI com segunda interface acumulada, $\alpha = \frac{C_{Si}C_{BOX}}{C_{OX}(C_{Si}+C_{BOX})}$.

Por se tratar de uma associação série de capacitores, C_b é menor em dispositivos FDSOI com 2ª interface depletada em relação a dispositivos PD SOI e MOSFETs convencionais (*bulk*), logo reduzindo α. Isso traz vantagens como menor constante de efeito de corpo, definida como n = 1 + α. Seguindo essa relação, é possível constatar que $n_{FD} < n_{PD,bulk}$ (COLINGE, 2004).

2.1.4 **Transcondutância (g_m)**

A transcondutância (g_m) mede a eficiência do controle da tensão de porta sobre a corrente de dreno. É definida como a variação da corrente de dreno em função da tensão aplicada na porta (MARTINO et al., 2004):

$$g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} \tag{17}$$

Para $V_{DS} > V_{Dsat}$ (saturação), a transcondutância de um transistor SOI MOSFET totalmente depletado pode ser expressa por (18) (COLINGE, 2004):

$$g_m = \frac{\mu_n . C_{OX}}{n} . \frac{W}{L} . (V_{GF} - V_{TH}) \tag{18}$$

onde μ_n representa a mobilidade do elétron.

2.1.5 **Inclinação de sublimiar (S)**

A inclinação de sublimiar é definida como o inverso da inclinação da curva I_D *versus* V_{GS} em escala logarítmica:

$$S = \frac{dV_{GS}}{d(\log I_{DS})} \tag{19}$$

O parâmetro é expresso em milivolts por década e indica a velocidade com que o dispositivo vai do estado desligado para o ligado. Quanto menor o valor de S, mais rápida é essa transição (MARTINO, 2004).

Se desconsideradas as armadilhas de interface, podemos expressar S pela equação (20). Nota-se o aparecimento do fator de corpo n, que indica uma menor inclinação de sublimiar quanto menor for o acoplamento capacitivo do dispositivo. Portanto os transistores FD SOI com segunda interface em depleção possuem maior velocidade de transição entre os estados ligado e desligado (COLINGE, 2004).

$$S = \frac{kT}{q} ln(10) n \tag{20}$$

2.2 ^{BE}SOI (*BACK ENHANCED*) MOSFET

O ^{BE}SOI (*Back Enhanced*) é um novo dispositivo MOSFET construído em uma lâmina SOI (*Silicon-on-Insulator*) e tem como principal característica a operação reconfigurável, isto é, pode funcionar tanto como canal-p quanto canal-n. A alteração entre os modos de operação é feita por meio da polarização de segunda porta (V_{GB}), como será discutido posteriormente.

Esse novo tipo de transistor foi concebido e fabricado pelo Grupo SOI CMOS do Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Universidade e São Paulo (USP) (Patente requerida: J.A. Martino, R.C. Rangel, n° BR 10 2015 020974 6, 28/08/2015). A nova tecnologia usa um processo de fabricação muito simples. Além dos dispositivos serem planares, não é implementada nenhuma etapa de dopagem intencional, i.e., difusão e implantação iônica, na sua fabricação, apenas estão presentes os dopantes naturais da lâmina SOI. Desse modo, são usadas apenas três

etapas de fotolitografia convencional, o que deixa sua fabricação mais acessível. Essa simplificação do BESOI é uma grande vantagem, já que outros dispositivos reconfiguráveis usam processos mais complexos e caros (HEINZIG et al., 2012) (WESSELY et al., 2013) (TROMMER et al., 2016) (SIMON et al., 2016).

A primeira versão do dispositivo conta com eletrodos de fonte e dreno de alumínio (RANGEL et al., 2015), já na segunda geração esses contatos foram fabricados com níquel. Este metal foi usado para promover um maior equilíbrio entre as barreiras Schottky de elétrons e lacunas, o que melhora a característica de operação reversível (YOJO et al., 2017a) (YOJO et al., 2017b) do BESOI MOSFET.

Para a fabricação dos dispositivos foi utilizada uma lâmina OI com óxido enterrado de SiO_2 e 200 nm de espessura. O dispositivo caracterizado tem dimensões de 100 µm tanto para a largura (W) quanto para o comprimento (L) de canal. Na primeira geração do dispositivo, com fonte e dreno de alumínio, o óxido de porta é composto de SiO_2 e tem 15 nm de espessura (t_{OX}) e a camada de silício tem espessura (t_{Si}) de 23 nm (RANGEL, 2015). Na segunda geração, com fonte e dreno de níquel, tais dimensões são mais finas, tanto o óxido de porta, também de SiO_2, quanto a camada de silício têm 10 nm de espessura (YOJO et al., 2017a) (YOJO et al., 2017b). A Figura 4 ilustra o perfil esquemático da realização do BESOI com suas dimensões e

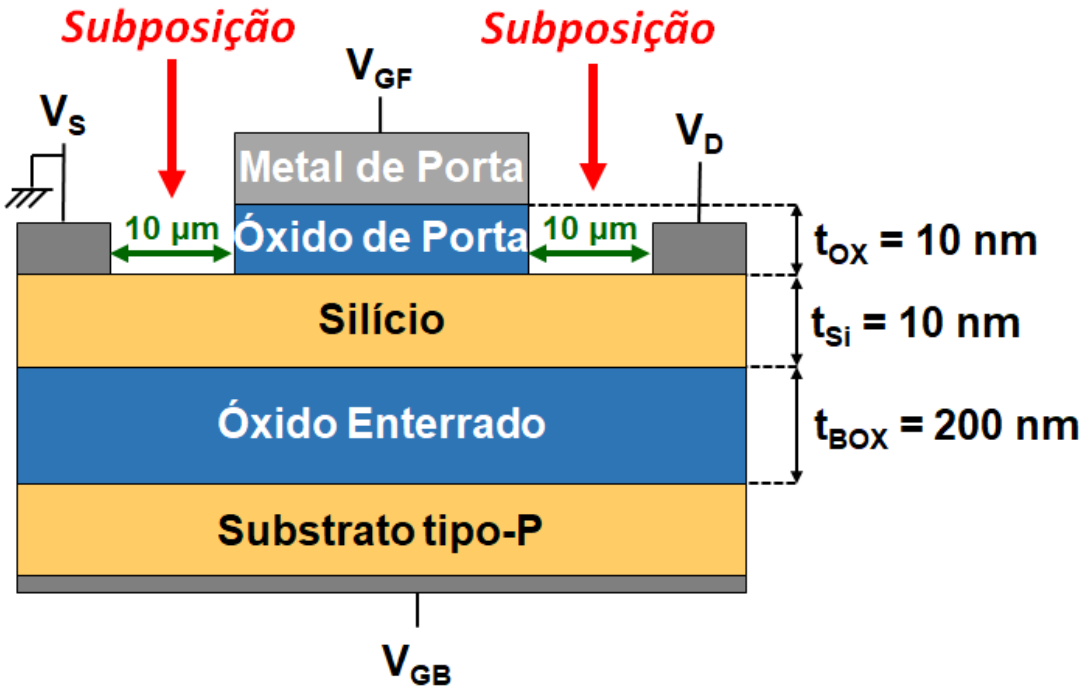


Figura 4 – Desenho esquemático da realização do BESOI (2ª geração).
Fonte: Autor.

a Figura 5 mostra uma foto de um dos dispositivos fabricado na USP, ambos referentes ao ^{BE}SOI segunda geração.

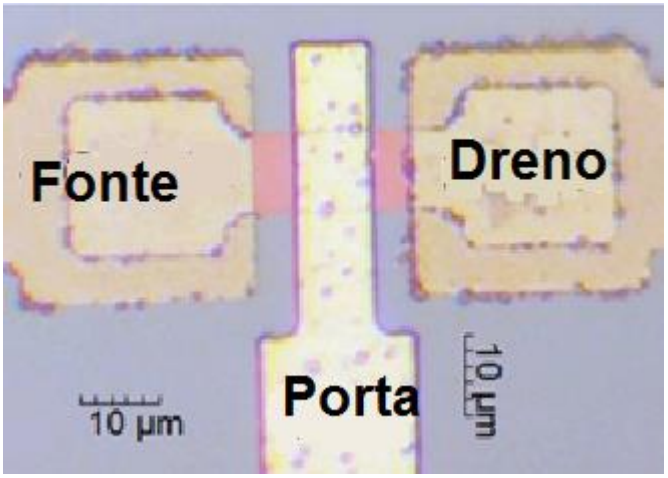
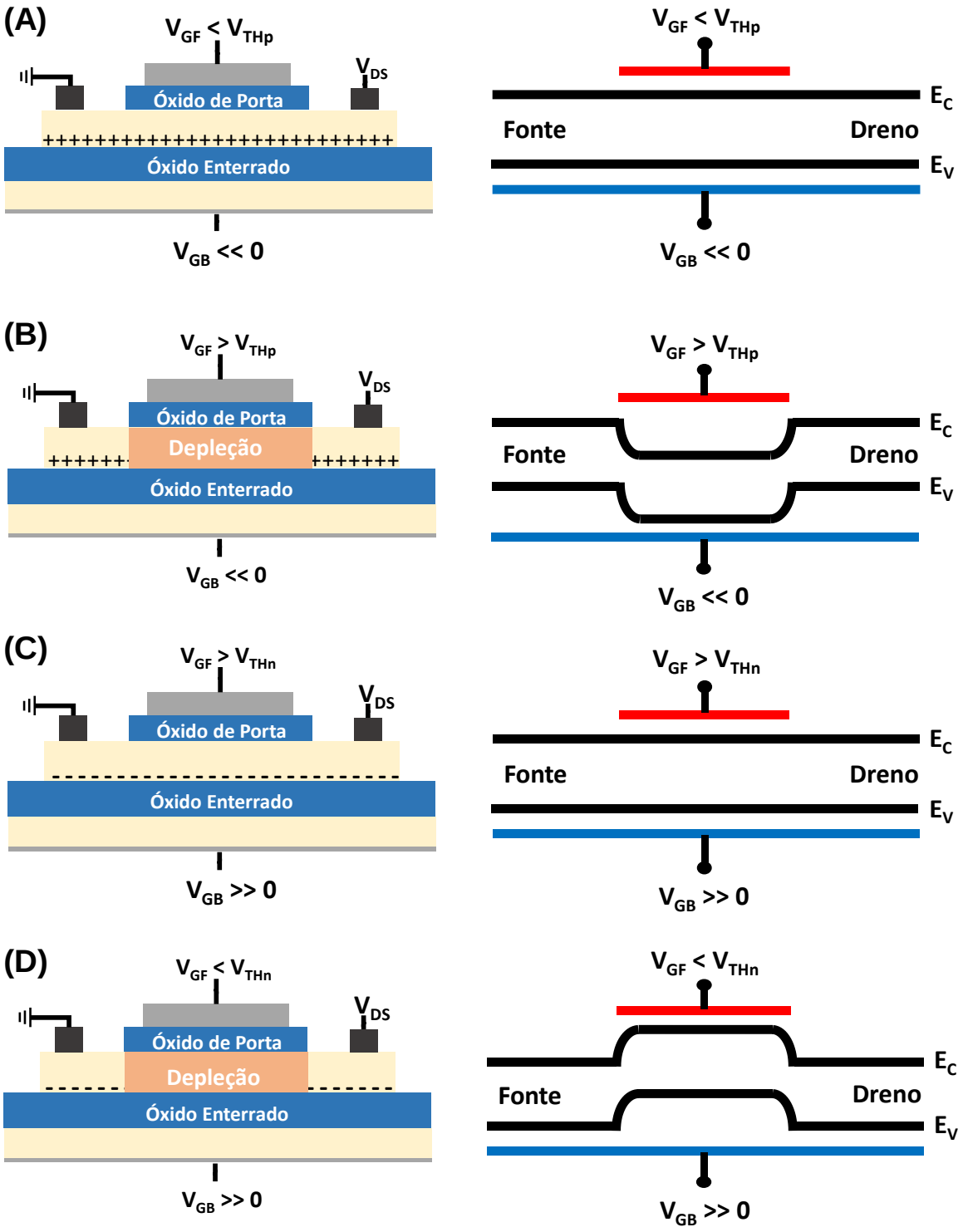


Figura 5 – Foto de um dispositivo ^{BE}SOI MOSFET (2ª geração; L = W = 10 µm) fabricado na Universidade de São Paulo.
Fonte: Autor.

2.2.1 **Princípio de operação**

O princípio de operação do ^{BE}SOI MOSFET é baseado na polarização da segunda porta (V_{GB}). Devido à presença do óxido enterrado, é possível induzir cargas na segunda interface (camada de silício – óxido enterrado) a fim de criar uma camada de portadores que conecte fonte e dreno. Assim, permite-se a passagem da corrente se uma tensão for aplicada entre esses terminais (V_{DS}). Obtém-se os diferentes modos de operação (canal-p ou -n) dependendo do tipo de portador induzido na segunda interface. Se V_{GB} for negativo o suficiente ($V_{GB} < -10$ V), são induzidas lacunas e o dispositivo funciona como canal-p. No caso contrário, se V_{GB} for positivo o suficiente ($V_{GB} > 10$ V), cria-se uma camada de elétrons e o transistor opera como canal-n. A corrente de dreno, decorrente da aplicação de V_{DS}, percorre majoritariamente pela segunda interface e pode ser modulada pela tensão de porta (V_{GF}).

A operação do ^{BE}SOI é melhor compreendida visualmente pela sequência da Figura 6. A figura (A) e (C) representam o perfil e diagrama de bandas de energia do dispositivo em condução para diferentes tensões na segunda porta (V_{GB}).



A) Dispositivo canal-p ligado, com formação de camada de lacunas na segunda interface.
B) Dispositivo canal-p desligado, com canal depletado, que interrompe a camada de lacunas na segunda interface.
C) Dispositivo canal-n ligado com formação de camada de elétrons na segunda interface.
D) Dispositivo canal-n desligado com canal depletado, que interrompe a camada de elétrons na segunda interface.

Figura 6 – Esquemáticos dos diagramas de cargas (esquerda) e de bandas de energia (direita) do ^{BE}SOI em diferentes regiões de operação.

Fonte: Adaptado de Yojo (2018).

É possível observar a camada de portadores na segunda interface formada por lacunas em (A) e elétrons em (C). Cada uma representa a operação canal-p e canal-n, respectivamente. Já nas figuras (B) e (D) nota-se que a tensão de porta (V_{GF}) depletou a região do canal que interrompe a passagem de corrente. É possível definir valores distintos de tensão de limiar tanto para o caso canal-p quanto canal-n. Como em um transistor MOSFET convencional, se $V_{GF} > V_{THp}$ no caso pMOS (figura B) ou $V_{GF} < V_{THn}$ no caso nMOS (figura D), o campo originado pela porta é elevado o suficiente para depletar toda a região do canal abaixo do eletrodo de porta. Isso extingue a camada de portadores da segunda interface, logo interrompendo a passagem da corrente I_{DS}.

Nota-se que as tensões aplicadas na segunda porta são altas se comparadas às comumente utilizadas em circuitos integrados. Isso se deve ao fato de que a lâmina SOI usada na fabricação do dispositivo tem óxido enterrado muito espesso. Assim, é necessária uma maior polarização V_{GB} para induzir as cargas na segunda interface. Se o dispositivo ^{BE}SOI for construído em uma lâmina SOI com óxido enterrado mais fino, o alto valor de V_{GB} pode ser reduzido drasticamente.

As características da corrente de dreno em função da tensão de porta são um pouco diferentes das observadas em transistores SOI MOSFETs tradicionais. Uma curva I_{DS} *versus* V_{GF} esquemática de um ^{BE}SOI canal-p é mostrada na Figura 7, de onde é possível definir três regiões de operação: região A (V_{GF1}) representa o transistor em corte; a região B (V_{GF2}) tem uma característica parecida com a região de

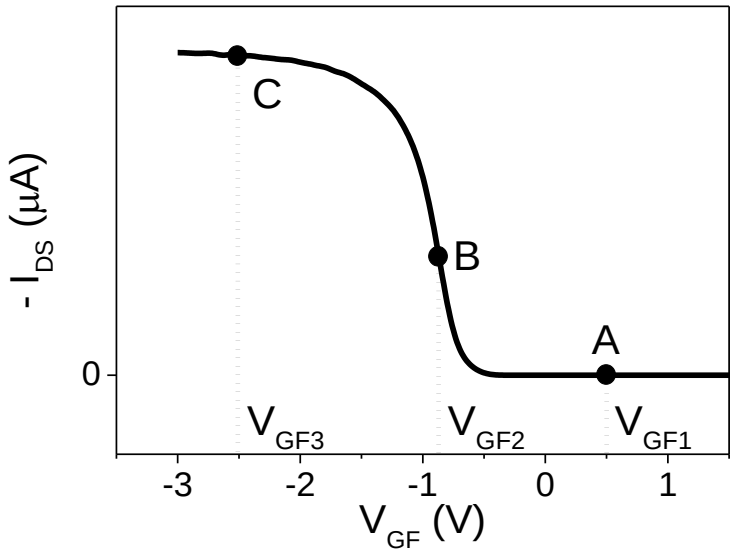


Figura 7 – Curva de transferência esquemática de um dispositivo ^{BE}SOI canal-p.
Fonte: Autor.

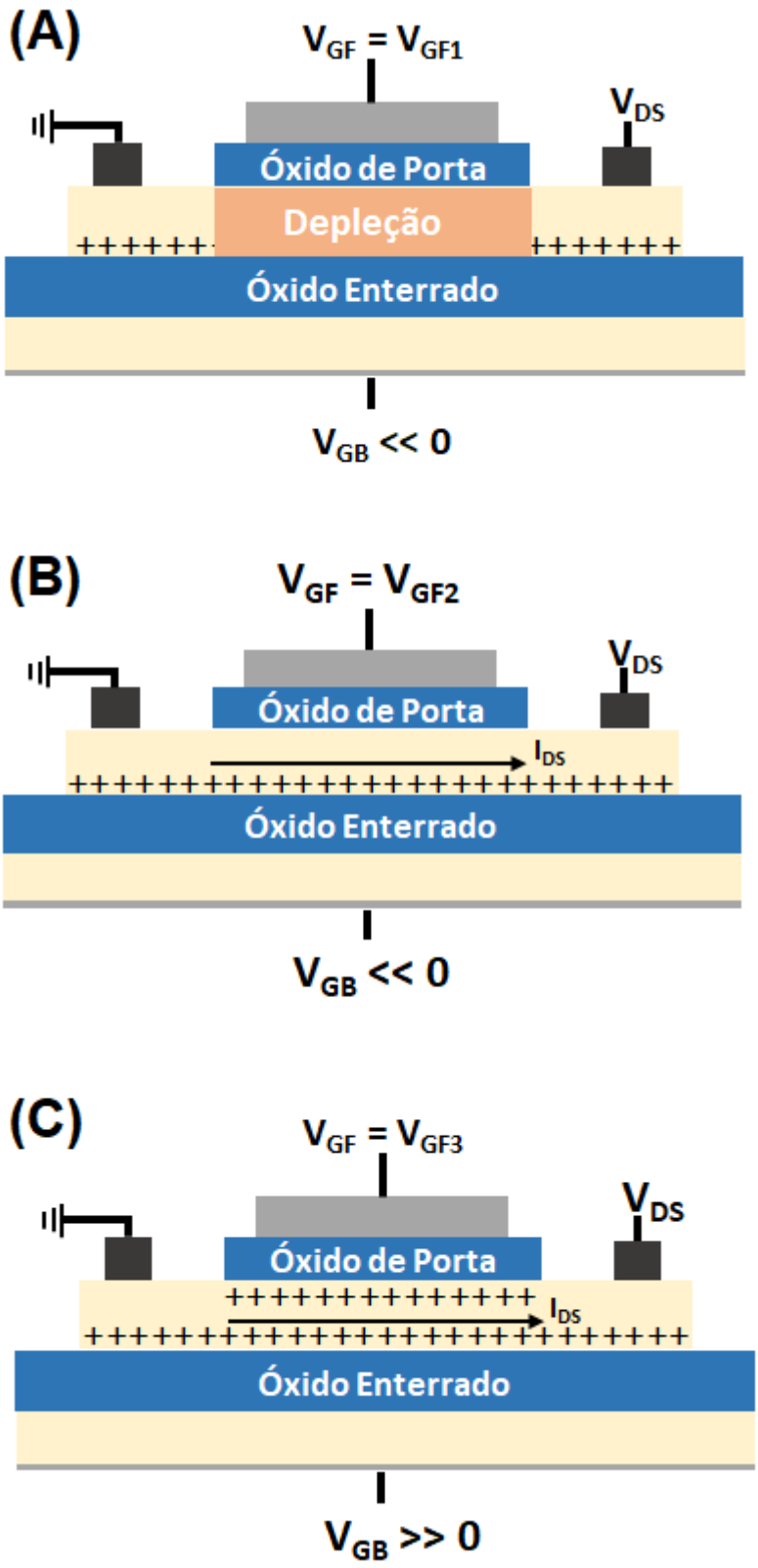
triodo de dispositivos MOSFETs convencionais; por fim, na região C (V_{GF3}) a corrente de dreno tende a se estabilizar. O caso do transistor em corte (região A), como já comentado anteriormente é a situação onde a tensão de porta é suficiente para depletar todo o canal. Desse modo, não há condução de corrente, pois a camada de portadores da segunda interface foi extinta.

Já o aumento gradual da corrente observado na região B é decorrente da redução da região de depleção causada pela polarização de porta. Isso aumenta a concentração de cargas no canal, especialmente na segunda interface, que permitem a passagem de corrente. Nessa região a curva é semelhante à observada na região de triodo de dispositivos MOSFET convencionais, pois seguem a mesma tendência: um aumento linear de I_{DS} com V_{GF}.

Por fim, a região C representa a situação onde não há mais depleção induzida pela porta. A partir desse momento, no caso canal-p, reduções em V_{GF} (aumentos se for canal-n) contribuem para a geração de portadores também na primeira interface, abaixo do eletrodo de porta. Porém, a concentração de cargas na segunda interface fica estagnada, pois é proporcional principalmente à polarização fixa na segunda porta. Como a corrente circula majoritariamente pela segunda interface, o resultado é a tendência de estabilização também de I_{DS}.

A razão pela qual as cargas induzidas na primeira interface não contribuem significativamente para a corrente de dreno é devida à grande resistência entre canal e eletrodo de fonte/dreno na primeira interface, que tem baixa dopagem. Como V_{GF} induz cargas apenas sob o eletrodo de porta, a concentração de portadores entre o eletrodo de porta e os terminais de fonte e dreno continua muito baixa na primeira interface. Não acontece como a segunda porta, que induz portadores em toda segunda interface, conectando fonte e dreno. Perfis esquemáticos do ^{BE}SOI operando nas três regiões citadas são mostrados na Figura 8.

Essa região com reduzida concentração de portadores é denominada por subposição (*underlap*). Prevê-se que algum efeito que cause geração de pares elétron-lacuna consiga aumentar significativamente a concentração de cargas nessa região, reduzindo sua resistência e, portanto, aumentando a corrente de dreno. Isso indica uma possível aplicação do ^{BE}SOI como sensor, que será explorada neste trabalho para a radiação luminosa.



A) Estado desligado.
B) Estado ligado com corrente linear.
C) Estado ligado com corrente tendendo à estabilização (não convencional).

Figura 8 – Perfil esquemático do dispositivo ^{BE}SOI canal-p em diferentes regiões de operação.
Fonte: Adaptado de Yojo (2018a).

2.3 CONCEITOS EM ÓPTICA

Nesta seção são apresentados alguns conceitos básicos em óptica para a sustentação teórica do trabalho. São abordados temas como comparação entre unidades foto e radiométricas além de algumas propriedades ópticas do silício.

2.3.1 **Definições em fotometria e radiometria**

A diferença entre as grandezas radiométricas e fotométricas é explicada a seguir. Enquanto a radiometria descreve as propriedades físicas da radiação eletromagnética, incluindo a luz visível, a fotometria mede a percepção da radiação óptica pelo olho humano (LESCHHORN; YOUNG, 2017). Na Tabela 1 e Tabela 2 são listadas algumas grandezas radiométricas e fotométricas, respectivamente, junto com uma breve descrição de cada uma.

Embora as grandezas físicas de cada área apresentem semelhanças, há uma distinção fundamental. A unidade básica da radiometria é o watt (W), que quantifica uma potência elétrica, enquanto na fotometria as grandezas são em função do lúmen (lm), uma unidade fisiológica relacionada à percepção do olho humano à radiação óptica. A relação entre watt e lúmen é dada pela chamada função de eficiência luminosa ($\bar{y}(\lambda)$), que depende do comprimento de onda e é normalizada a um valor

Tabela 1 – Grandezas radiométricas importantes.

Radiometria			
Grandeza	**Símbolo**	**Unidade**	**Descrição**
Potência radiante	Φ_e	W	Energia proveniente de uma fonte de radiação óptica por unidade de tempo.
Intensidade radiante	I_e	W/sr	Potência radiante por unidade de ângulo sólido.
Irradiância	E_e	W/m^2	Potência radiante incidente em uma superfície por unidade de área.
Radiância	L_e	$W/(m^2.sr)$	Potência radiante proveniente de uma superfície por unidade de ângulo sólido, por unidade de área da área projetada.

Fonte: Adaptado de Leschhorn e Young (2017).

Tabela 2 – Grandezas fotométricas importantes.

Fotometria			
Grandeza	**Símbolo**	**Unidade**	**Descrição**
Fluxo luminoso	Φ_v	lúmen (lm)	Energia luminosa por unidade de tempo.
Intensidade luminosa	I_v	lm/sr = candela (cd)	Fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido.
Iluminância	E_v	lm/m^2 = lux (lx)	Fluxo luminoso incidente em uma superfície por unidade de área (densidade de fluxo luminoso).
Luminância	L_v	cd/sr	Intensidade luminosa por unidade de área projetada.

Fonte: Adaptado de Leschhorn e Young (2017).

unitário. O valor máximo de $\bar{y}$ corresponde a uma radiação monocromática com λ = 555 nm, pelo qual uma potência de 1 W corresponde a um fluxo luminoso de 683 lm (LESCHHORN; YOUNG, 2017). A função de eficiência luminosa (JUDD, 1951) é mostrada na Figura 9. Desse modo, é possível converter uma grandeza radiométrica G_e para a fotométrica equivalente G_v usando a seguinte relação:

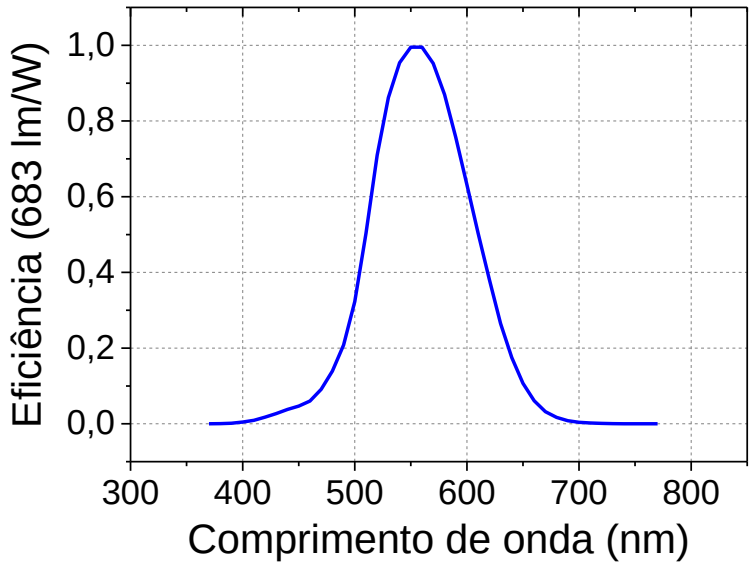


Figura 9 – Função de eficiência luminosa.
Fonte: Judd (1951)

$$G_v = 683\ lm.W^{-1} \int_{360\ nm}^{830\ nm} G_e(\lambda).\bar{y}(\lambda).dx \qquad (21)$$

2.3.2 **Propriedades ópticas do silício**

Em materiais semicondutores, quando a luz incide em sua superfície, parte dela é refletida e o restante é absorvido pelo material, gerando pares elétron-lacuna (OHTA, 2008). A geração de portadores pode ser por transição entre as bandas de condução e valência, também chamada de excitação intrínseca, ou por transições envolvendo níveis de energia dentro da faixa proibida (defeitos e armadilhas), denominada excitação extrínseca (SZE, 1981).

Para que ocorra a geração óptica é necessário que os fótons absorvidos pelo semicondutor tenham, no caso intrínseco, energia superior à separação entre as bandas (*bandgap*). Desse modo, podemos definir um comprimento de onda máximo que pode ser absorvido pelo material como:

$$\lambda_c = \frac{h\ .\ c}{E_G} \qquad (22)$$

onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vácuo e E_G é a energia de separação entre as bandas. O valor de λ_c para o silício é por volta de 1,1 μm. Quando a radiação luminosa tem comprimento de onda maior que λ_c, os fótons não têm energia suficiente para realizar uma excitação intrínseca e a geração de pares ocorre apenas por meio de níveis dentro da faixa proibida, o que degrada a geração óptica.

É possível expressar o fenômeno de absorção com o índice de refração, um número adimensional que descreve como a luz se propaga em um meio material (HECHT, 2002). Quando não há absorção, o índice de refração é a relação de velocidades da equação (23):

$$n_{Re} = \frac{c}{v} \qquad (23)$$

onde v é a velocidade no meio.

Quando há absorção, define-se um índice de refração complexo $\underline{n}$:

$$\underline{n} = n_{Re} + j.\, n_{Im} \tag{24}$$

onde a parte real n_{Re} é o índice de refração da equação (23) e a componente imaginária n_{Im} é o coeficiente de extinção.

Para ilustrar o significado dessa parte complexa, supõe-se uma onda eletromagnética viajando na direção *x* em um meio com índice de refração $\underline{n}$ (HECHT, 2002; OKAMOTO, 2006):

$$E_x(x,t) = E_{0,x}.Re\,\{exp\,[j\,(K_x.x - \omega.t)]\} \tag{25}$$

onde K_x é a componente x do vetor de onda definido por $K = 2\pi/\lambda$ e ω é a frequência angular $\omega = 2\pi f$. É possível então relacionar K_x com $\underline{n}$ da seguinte forma:

$$\begin{gathered} v = f\,.\,\lambda \\ K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega.\underline{n}}{c} \end{gathered} \tag{26}$$

Assim, é possível reescrever a equação (25) como:

$$\begin{aligned} E_x(x,t) &= E_{0,x}.\ Re\left\{exp\ \left[j\ \left(\frac{\omega.\underline{n}}{c}.x - \omega.t\right)\right]\right\} \\ &= E_{0,x}.\ Re\ \left\{exp\ \left[j\ \left(\frac{\omega.(n_{Re} + j.\ n_{Im})}{c}.x - \omega.t\right)\right]\right\} \\ &= E_{0,x}.\ Re\left\{exp\ \left[-\frac{\omega.n_{Im}.x}{c} + j\ \left(\frac{\omega.n_{Re}.x}{c} - \omega.t\right)\right]\right\} \\ \therefore E_x(x,t) &= E_{0,x}.exp\left(-\frac{\omega.\ n_{Im}\ .\ x}{c}\right)\ .\ Re\{exp\,[j\,(K_x\ .\ x - \omega.t)]\} \end{aligned} \tag{27}$$

A equação (27) indica que a propagação de uma onda eletromagnética em um meio é igual ao resultado usando a parte real do índice de refração multiplicado

por um fator de atenuação, que reduz a amplitude da onda exponencialmente em função da propagação. Desse modo, é possível definir um coeficiente de absorção (β) como na equação (28):

$$\beta = \frac{2 \,.\, \omega \,.\, n_{Im}}{c} = \frac{4\pi \,.\, n_{Im}}{\lambda} \tag{28}$$

Caso β seja nulo, não haveria absorção e subsequente geração de pares elétron-lacuna no semicondutor. Nesse caso o material seria transparente ao comprimento de onda.

A partir da equação (28), também se define o comprimento de penetração, que indica a distância que a onda se propaga até a sua intensidade ser reduzida por um fator de 1/e (cerca de 63%) (HECHT, 2002).

$$L_\beta = \frac{1}{\beta} \tag{29}$$

Na maioria dos materiais, o valor do índice de refração complexo varia conforme a frequência da radiação eletromagnética. Desse modo, o mesmo material pode absorver uma grande quantidade de luz em um comprimento de onda e ser quase transparente para outro comprimento de onda. Para o silício, são expostos na Figura 10 os valores das partes real e imaginária do índice de refração desse material (ASPNES; STUDNA, 1983). Estes dados foram usados nas simulações ao longo deste trabalho.

A partir das equações (28) e (29) é possível associar a parte complexa do índice de refração com o coeficiente de absorção e o comprimento de penetração, respectivamente. Desse modo, tais grandezas foram calculadas a partir dos dados da Figura 10 e mostradas na Figura 11. Como mostra o gráfico, o coeficiente de absorção é reduzido quando se aumenta o comprimento de onda. O valor de corte superior para o silício é definido teoricamente como λ_c = 1,1 μm através da energia de separação entre bandas (*bandgap*) do material. Já para comprimentos de onda muito curtos também ocorre um corte devido à baixa penetração da radiação no silício. Nesse caso, os pares elétron-lacuna são gerados muito perto da superfície, onde o tempo de vida dos portadores é menor (OHTA, 2008).

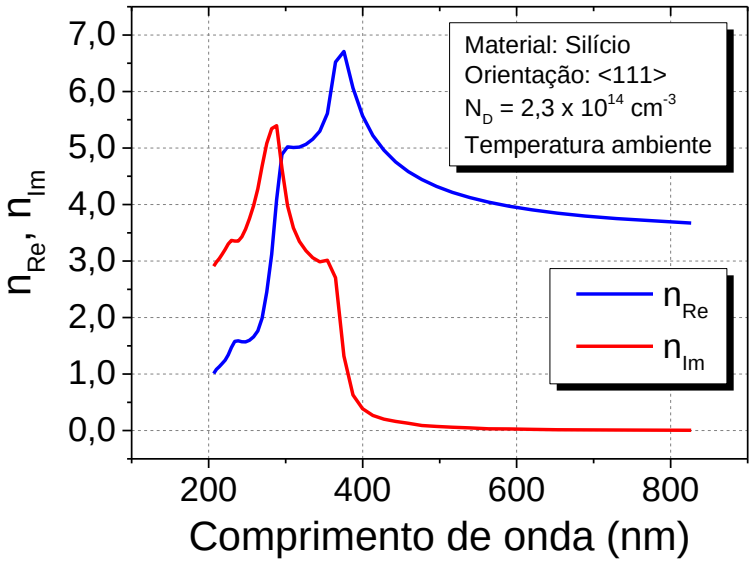


Figura 10 – Índice de refração do silício em temperatura ambiente.
Fonte: Aspnes e Studna (1983).

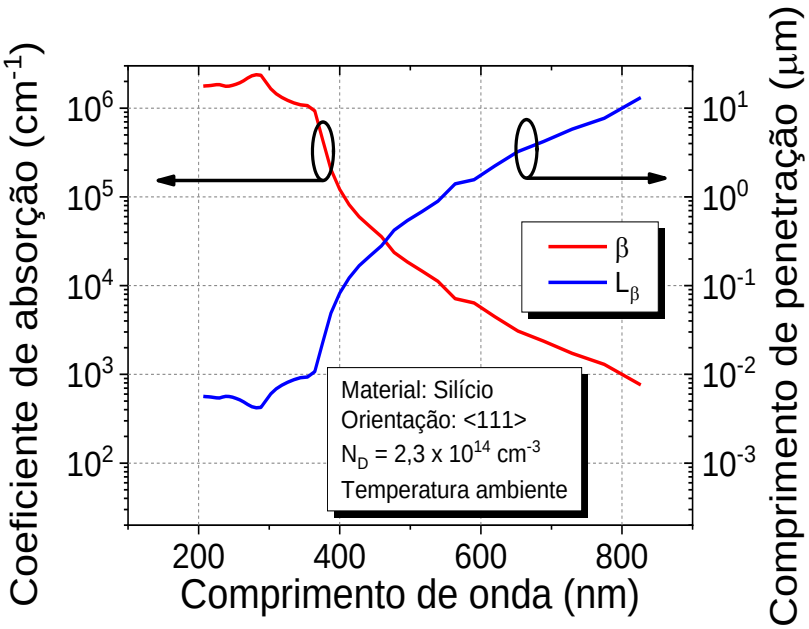


Figura 11 – Coeficiente de absorção e comprimento de penetração do silício em temperatura ambiente.
Fonte: Autor, com dados de Aspnes e Studna (1983).

2.4 DISPOSITIVOS FOTODETETORES

As características de absorção de luz por materiais semicondutores têm ampla aplicação prática, especialmente em sistemas de comunicação por fibra óptica. Usa-se tais propriedades físicas para construir fotodetetores, dispositivos em

microeletrônica que conseguem detectar sinais ópticos. O funcionamento de um fotodetetor genérico pode ser resumido em três processos: (1) geração de pares elétron-lacuna devido incidência de luz, (2) transporte de cargas ópticas (corrente óptica, I_{op}) e eventualmente sua multiplicação se houver algum mecanismo de ganho de corrente no dispositivo e (3) interação da corrente com o circuito externo para produzir o sinal de saída (SZE, 1981).

Para medir o desempenho de um fotodetetor, uma das figuras de mérito mais comum é a eficiência quântica (η), que indica o número de pares gerados por fóton incidente (SZE, 1981). A equação (30) define a grandeza:

$$\eta = \frac{I_{op} / q}{P_{op} / (h \,.\, f)} \tag{30}$$

onde I_{op} é a corrente decorrente da geração óptica e P_{op} é a potência radiante incidente no dispositivo para um determinado comprimento de onda λ (correspondente ao nível energético dos fótons hf).

Da eficiência quântica é possível derivar a responsividade (R), que também é uma figura de mérito largamente usada. A responsividade é definida como a razão entre a corrente óptica e a potência radiante incidente (SZE, 1981), como mostra a equação (31):

$$R = \frac{I_{op}}{P_{op}} = \frac{\eta \,.\, q}{h \,.\, f} = \frac{\eta \,.\, \lambda(\mu m)}{1{,}24} \quad [A/W] \tag{31}$$

onde λ é o comprimento de onda em micrometros.

A seguir serão apresentados alguns fotodetetores a fim de discutir seu funcionamento básico.

2.4.1 **Fotocondutor**

O fotocondutor, comercialmente conhecido como resistor dependente de luz ou LDR (*light dependent resistor*), tem uma estrutura bastante simples, consistindo de uma placa de material semicondutor com contatos ôhmicos nas extremidades como mostrado na Figura 12.

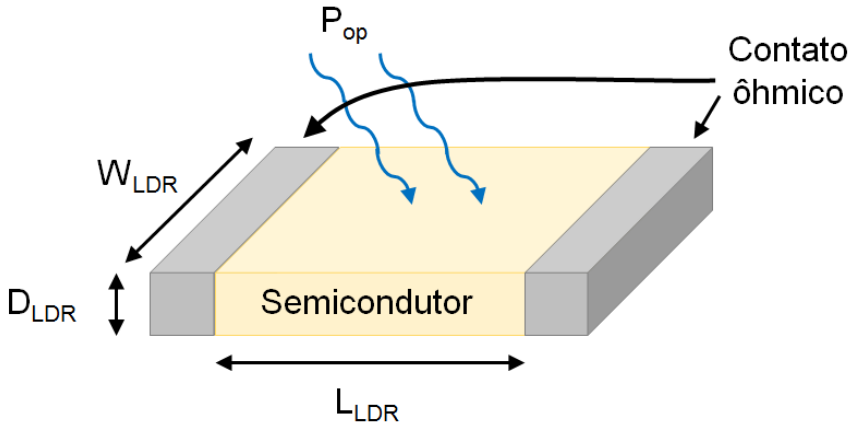


Figura 12 – Desenho esquemático de um fotocondutor.
Fonte: Adaptado de Sze (1981).

Quando a luz incide sobre o material, sua condutividade, dada por $\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$, aumenta devido ao maior número de portadores decorrente da geração óptica. Em um fotocondutor com área $L_{LDR} \cdot W_{LDR}$ e fluxo de fótons incidentes uniforme, o número total de fótons chegando à superfície por unidade de tempo é P_{op} / hf. Assumindo que a diferença de concentração de elétrons e lacunas devido a geração óptica, Δn e Δp, respectivamente, sejam iguais, em regime estacionário a taxa de geração de portadores deve ser igual à taxa de recombinação e, portanto, pode ser escrita como (SZE, 1981):

$$G = \frac{\Delta n}{\tau} = \frac{\eta \cdot (P_{op} / hf)}{W_{LDR} \cdot L_{LDR} \cdot D_{LDR}} \tag{32}$$

onde τ é o tempo de vida dos portadores e W_{LDR}, L_{LDR} e D_{LDR} são as dimensões do fotocondutor como indicadas pela Figura 12. Podemos escrever então:

$$\Delta n = \frac{\tau \cdot \eta \cdot (P_{op} / hf)}{W_{LDR} \cdot L_{LDR} \cdot D_{LDR}} \tag{33}$$

A corrente óptica entre os contatos pode ser escrita como:

$$I_{op}=(\sigma E)\, W_{LDR}D_{LDR}=\left(q\,[\mu_n+\mu_p]\,\Delta n\,E\right)W_{LDR}D_{LDR} = \left(q\,[v_n+v_p]\,\Delta n\right)W_{LDR}D_{LDR} \tag{34}$$

onde E é o campo elétrico dentro do fotocondutor e v_n e v_p é a velocidade de deriva dos elétrons e lacunas, respectivamente. Substituindo (33) em (34) obtemos:

$$I_{op} = q\left(\eta\frac{P_{op}}{hf}\right)\left(\frac{\tau\,[\mu_n+\mu_p]\,E}{L_{LDR}}\right) \tag{35}$$

Definindo a corrente óptica primária como

$$I_{op,\,prim} \equiv q\left(\eta\frac{P_{op}}{hf}\right) \tag{36}$$

obtém-se o ganho do fotocondutor:

$$A_{LDR} = \frac{I_{op,\,prim}}{I_{op}} = \frac{\tau\,[\mu_n+\mu_p]\,E}{L_{LDR}} = \frac{\tau}{t_r} \tag{37}$$

onde $t_r = L_{LDR} / (v_p+v_n)$ é o tempo de trânsito dos portadores através do fotocondutor. Usualmente t_r será determinado por v_e, já que a mobilidade de elétrons é muito maior que a de lacunas na maioria dos materiais. Observa-se que para aumentar o ganho é necessário um tempo de recombinação longo e um dispositivo de pequeno comprimento para minimizar o trânsito dos portadores. No entanto, como o tempo de resposta é determinado pelo tempo de vida, há um compromisso entre ganho e velocidade (SZE, 1981).

Também é possível determinar a responsividade do fotocondutor, que também é afetada pelo ganho:

$$R = \frac{I_{op}}{P_{op}} = \left(\frac{\eta\, q}{h\, f}\right)\left(\frac{\tau\,[\mu_n+\mu_p]\,E}{L_{LDR}}\right) = \frac{\eta\,.\,\lambda(\mu m)}{1{,}24}A_{LDR} \tag{38}$$

2.4.2 **Fotodiodos**

O fotodiodo é um dispositivo sensor de luz muito usado em várias aplicações, que se beneficiam da sua alta sensibilidade à radiação luminosa e rápido tempo de resposta. Esse fotodetetor se baseia em uma junção p-n polarizada reversamente, onde o alto campo elétrico da subsequente região de depleção separa os pares elétron-lacuna gerados pela luz, que serão posteriormente coletados pelos terminais aumentado a corrente reversa (OHTA, 2008).

Um fotodiodo também pode operar em modo fotovoltaico quando não polarizado e conectado a uma carga, assim operando como uma célula solar. Nessa situação, um fotodiodo sob iluminação funciona como uma bateria, isto é, fornece uma tensão entre a junção p-n. No entanto, a estrutura usada para as aplicações sensora e fotovoltaica são fundamentalmente diferentes. Enquanto um fotodiodo sensor é projetado para uma estreita faixa de comprimentos de onda e com pequenas dimensões para minimizar a capacitância de junção; as células solares são construídas para terem boa resposta na grande amplitude de comprimentos de onda da luz solar além de serem dispositivos com grande área (SZE, 1981).

No projeto de um fotodiodo a definição da largura de depleção (W_i) é importante para determinar seu desempenho. A fim de que o fotodetetor tenha boa eficiência quântica, uma depleção larga promove maior absorção de luz. É desejável que W_i seja da ordem do comprimento de penetração (inverso do coeficiente de absorção β) para o comprimento de onda que se deseja detectar. No entanto, uma depleção muito grande prejudica a velocidade de resposta, uma vez que o tempo trânsito dos portadores gerados opticamente aumenta. Também não é desejável que W_i seja muito fino ou a capacitância de junção se torna muito grande, aumentando a constante de tempo do circuito e degradando a velocidade de resposta. Além disso, os pares gerados fora da depleção precisam difundir para a junção, o que acrescenta um atraso considerável, que pode ser minimizado ao fabricar a junção o mais próximo possível da superfície da lâmina (SZE, 1981).

Conforme visto, uma otimização da eficiência quântica e da velocidade de resposta é obtida por meio da definição da largura de depleção. A estrutura de diodo p-i-n torna mais fácil esse ajuste ao inserir uma região intrínseca ou pouco dopada entre a junção p-n. O funcionamento tanto do fotodiodo p-i-n quanto o de junção p-n é equivalente e pode ser explicado pelo diagrama de bandas apresentado na Figura

13. Como mencionado anteriormente, os pares gerados pela absorção de luz – dentro da região de depleção ou nas regiões de difusão p ou n – eventualmente serão separados pelo campo elétrico, causando uma corrente no circuito externo conforme os portadores atravessam (por deriva) a camada de depleção (SZE, 1981).

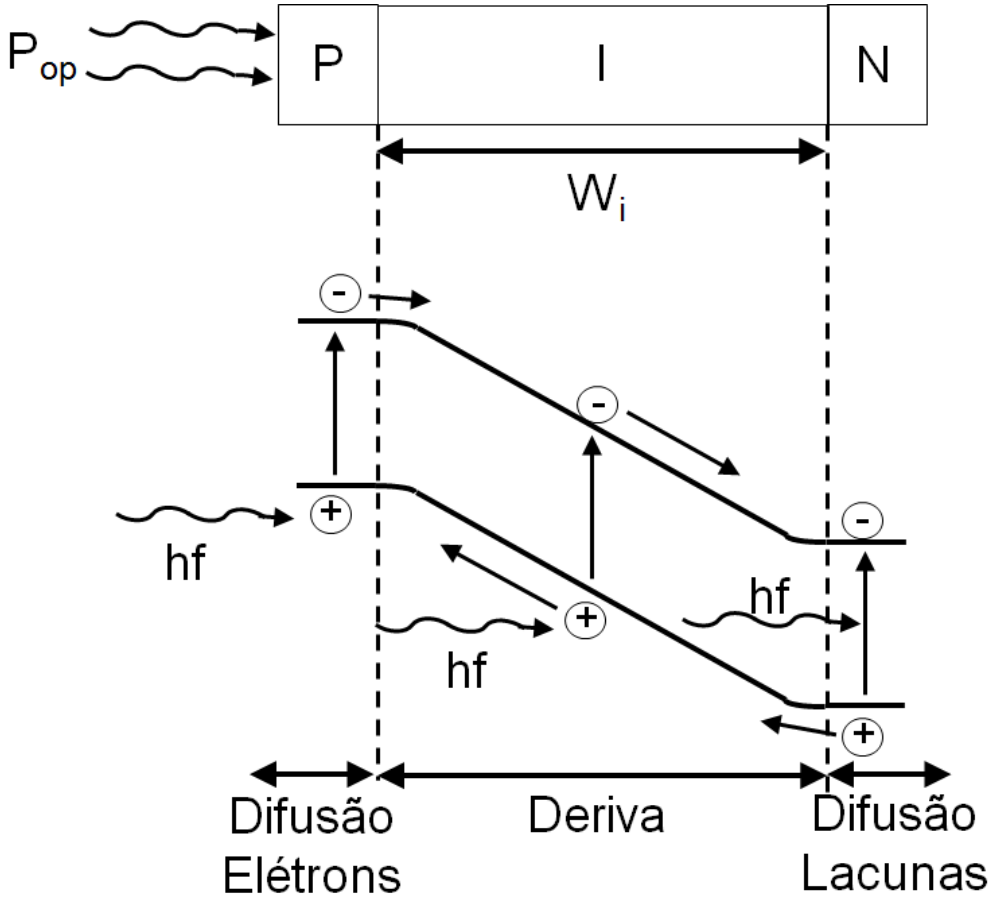


Figura 13 – Desenho esquemático de um fotodiodo e o respectivo diagrama de bandas.
Fonte: Adaptado de Sze (1981).

Supondo uma condição estacionária, a densidade da corrente óptica dentro da região de depleção reversamente polarizada pode ser escrita como:

$$J_{op} = J_{der} + J_{dif} \tag{39}$$

onde J_{der} é a corrente de deriva causada pelos portadores gerados dentro da região de depleção e J_{dif} é referente à corrente de difusão dos portadores gerados no substrato, que difundem para a junção.

Supondo que a corrente por geração térmica é negligenciável e que a camada de difusão tipo-p da superfície é muito fina comparada com a região de depleção é possível obter a corrente óptica total. A geração óptica é dada por

$$G = \Phi_{op} \, . \, \beta \, . \, exp(-\beta x) \tag{40}$$

onde Φ_{op} é o fluxo de fótons incidentes por unidade de área, dado por $P_{op}/A_{pd}hf$, onde A_{pd} é a área do diodo. Desse modo, a corrente de deriva pode ser escrita como:

$$J_{der} = -q \int_0^{W_i} G(x)dx = q \, \Phi_{op}(1 - exp[-\beta W_i]) \tag{41}$$

Para $x > W_i$ considera-se a difusão de portadores minoritários da região tipo-n do substrato (lacunas). A densidade de corrente de difusão é dada por:

$$J_{dif} = q \, \Phi_{op} \frac{\beta L_p}{1+ \beta L_p} exp[-\beta W_i] + q p_{n0} \frac{D_p}{L_p} \tag{42}$$

onde D_p e L_p são, respectivamente, a constante e comprimento de difusão das lacunas e p_{n0} é a concentração de lacunas no equilíbrio.

A densidade de corrente óptica total é, portanto:

$$J_{op} = q \, \Phi_{op} \left(1 - \frac{exp[-\beta W_i]}{1+ \beta L_p} \right) + q p_{n0} \frac{D_p}{L_p} \tag{43}$$

Em condições normais de operação, o segundo termo da equação é muito pequeno e pode ser desconsiderado. Dessa forma, a corrente óptica é proporcional à potência de luz incidente e podemos obter a eficiência quântica:

$$\eta = \frac{J_{op}/qA_{pd}}{P_{op}/hf} = \left(1 - \frac{exp[-\beta W_i]}{1+ \beta L_p} \right) \tag{44}$$

É possível adicionar um ganho de corrente a fotodiodos mediante a polarização dentro da região de ruptura. Para altas tensões reversas, ocorre o efeito de multiplicação por avalanche (ou ionização por impacto) e a corrente reversa aumenta abruptamente. Os fotodiodos avalanche (APDs) usam esse efeito para multiplicar os portadores gerados opticamente a fim de aumentar a eficiência quântica do fotodetetor, que pode chegar a ser maior do que a unidade. São especialmente úteis em aplicações que requerem detecção de sinais ópticos muito baixos, como sinais biológicos, ou que requerem alta velocidade de resposta, como em sistemas de comunicação por fibra óptica. No entanto, a necessidade de se aplicar altas tensões limita seu uso em tecnologias de fabricação comuns (OHTA, 2008).

2.4.3 **Fototransistor**

É possível usar a estrutura de um transistor bipolar (BJT) para detectar luz a fim de aproveitar o ganho de corrente dessa topologia. O chamado fototransistor difere de um BJT convencional pela grande área da sua junção coletor-base, que será o elemento sensível à radiação luminosa. Apesar do alto ganho permitido pela estrutura, seu desempenho em altas frequências é degradado devido à sua grande área em comparação a um fotodiodo convencional (OHTA, 2008; SZE, 1981). A Figura 14 mostra uma ilustração da estrutura de um fototransistor e, ao lado, o esquemático de seu circuito equivalente.

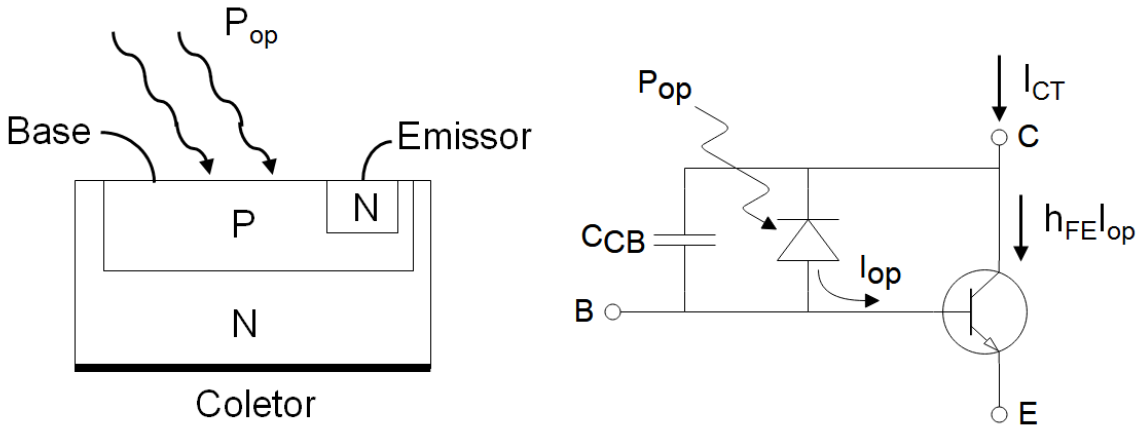


Figura 14 – Desenho esquemático da estrutura de um fototransistor e o respectivo circuito equivalente.
Fonte: Adaptado de Sze (1981).

Sob iluminação, quando o contato de base está flutuando, a corrente total no coletor do fototransistor pode ser escrita como:

$$I_{CT} = I_{op} + h_{FE} I_{op} = (1 + h_{FE}) I_{op} \quad (45)$$

onde h_{FE} é o ganho em corrente de emissor comum. O ganho da estrutura é então $(1 + h_{FE})$, termo que multiplicará a eficiência quântica do fotodiodo equivalente na junção base-coletor (SZE, 1981).

2.4.4 **ICPD (*Interface Coupled Photodetector)***

Foi desenvolvido por Deng (2017) e Wan (2018) um fotodetetor baseado na tecnologia SOI chamado *Interface Coupled Photodetector* (ICPD, em português, Fotodetetor de Interface Acoplada). O objetivo foi conceber um sensor que tivesse as vantagens inerentes da tecnologia SOI, como resistência à radiação do ambiente, e.g., aplicações aeroespacial e nuclear, e também com um ganho intrínseco, uma vez que a eficiência quântica dos fotodetetores é degradada em circuitos SOI CMOS modernos devido à fina espessura da camada de silício.

A Figura 15 mostra o perfil do fotodetetor. O ICPD é construído sobre uma lâmina SOI com óxido enterrado de SiO_2 de 500 nm de espessura. O canal de silício é dopado com boro e concentração de 10^{15} cm^{-3} e sua espessura é de 200 nm. O óxido de porta tem 30 nm de espessura e é feito com óxido de alumínio (Al_2O_3). O fotodetetor ainda conta com contatos fabricados em alumínio e um espaçamento entre os eletrodos de fonte/dreno e de porta de 5 µm em cada lado (subposição).

O princípio de funcionamento se baseia no efeito de acoplamento de interfaces. Uma polarização de segunda porta negativa ($V_{GB} < 0$) é usada para induzir lacunas na interface entre o óxido enterrado e canal (segunda interface), o que forma uma camada de portadores entre fonte e dreno capaz de conduzir corrente. Essa concentração de lacunas é afetada pela polarização de porta (V_{GF}) por meio do efeito de acoplamento. Quando V_{GF} é suficientemente positivo, são induzidos elétrons sob o eletrodo de porta. Essa concentração de cargas negativas na primeira interface possibilita que os elétrons gerados opticamente sejam atraídos para baixo do eletrodo de porta, aumentando a sua concentração nesta região, causando um deslocamento

da tensão de limiar da curva I_{DS} *versus* V_{GB}. Na Figura 15 as cargas mostradas no perfil do ICPD são referentes à polarização descrita acima.

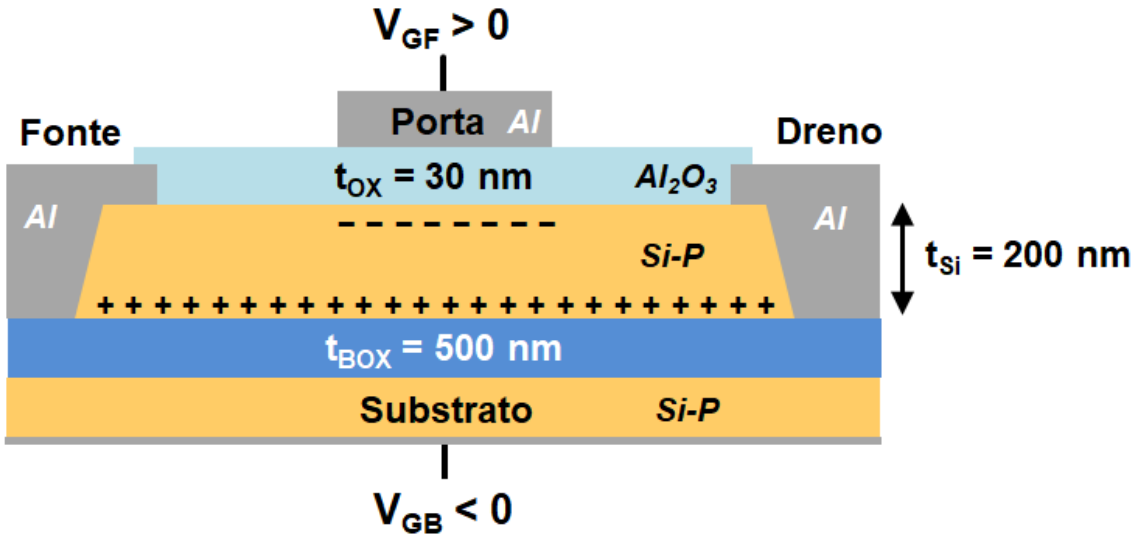


Figura 15 – Desenho esquemático do perfil do ICPD, mostrando as cargas presentes no canal na polarização de operação.
Fonte: Adaptado de Deng (2017).

O desempenho do ICPD foi determinado tanto experimentalmente por meio de um dispositivo fabricado quanto por simulações numéricas. Em ambos os casos, as polarizações de porta (V_{GF}) e entre e fonte e dreno (V_{DS}) usadas foram V_{GF} = 1,5 V e V_{DS} = −1 V, respectivamente. Nas simulações obteve-se uma responsividade de $2{,}2.10^4$ A/W para uma polarização de segunda porta V_{GB} = −9 V. Neste caso a radiação luminosa simulada tinha comprimento de onda de λ = 520 nm e irradiância 50 μW/cm^2 (WAN, 2018). Já a responsividade obtida no experimento foi de 10^4 A/W usando polarizações segunda porta V_{GB} = −12 V e iluminação com comprimento de onda também de λ = 520 nm mas com irradiância de 700 μW/cm^2 (WAN, 2018).

2.4.5 **Fototransistor *junctionless* (sem junção)**

A formação de junções p-n é um grande desafio de fabricação em microeletrônica para dispositivos com dimensões da ordem de nanômetros. Nessa escala, os mecanismos de difusão limitam processos térmicos e dificultam a formação de junções rasas com alto gradiente de concentração. Além disso, há problemas de reprodutibilidade causados pela flutuação na distribuição dos átomos dopantes

(COLINGE, 2009). Com o intuito de simplificar os processos de dopagem em transistores com dimensões nanométricas, foi proposto por Colinge et al. (2009) o *junctionless* (sem junção) SOI MOSFET, um novo dispositivo que, como o nome já diz, não tem junção p-n para a definição de fonte e dreno nem gradiente de concentração de dopantes. Este dispositivo é compatível com a tecnologia CMOS e é construído com nanofios (*nanowires*) de silício.

Como mostra o perfil da Figura 16, o dispositivo *junctionless* é formado por um filme de silício dopado uniformemente e com alta concentração de impurezas. O eletrodo de porta é formado por silício policristalino (Si-poli) com dopagem inversa ao do canal. O funcionamento do transistor *junctionless* é parecido a um resistor onde a densidade de cargas é modulada pela porta. Para uma tensão de porta (V_{GF}) nula, canal do dispositivo é totalmente depletado devido à diferença entre as funções trabalho do material de porta e do canal de silício, o que impede a passagem de corrente. O dispositivo atinge a tensão de limiar quando parte do silício se torna neutra (não depletada), formando um canal por onde passa a corrente de dreno. No caso nMOS, ao aumentar V_{GF} a depleção continua a diminuir enquanto a espessura dessa região neutra aumenta. Quando a polarização de porta atinge a tensão de faixa plana, todo o canal de silício se torna neutro (COLINGE et al., 2011).

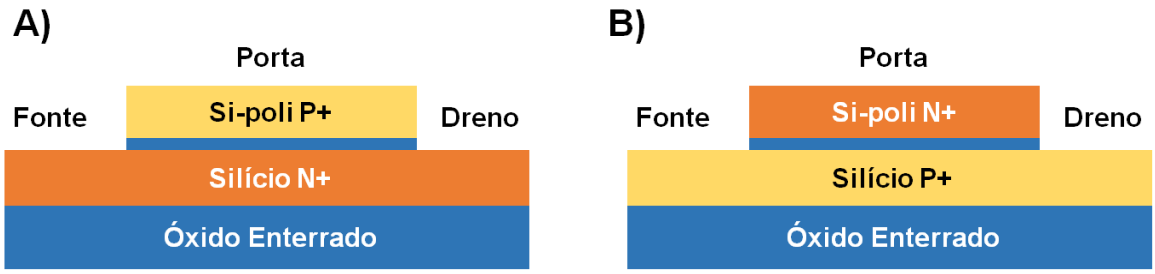


Figura 16 – Desenho esquemático do perfil de transistores *junctionless* tipo-n (A) e tipo-p (B).
Fonte: Adaptado de Colinge (2009).

Para que o *junctionless* SOI MOSFET tenha um desempenho desejável, é necessário que o filme de silício seja fino o suficiente para permitir a depleção total de portadores quando o dispositivo esteja desligado. Também é desejável uma alta concentração de dopantes para que se obtenha um nível de corrente apreciável quando o transistor está ligado. Portanto, a fabricação desse tipo de dispositivo requer o uso de dimensões nanométricas e altas concentrações de dopantes (COLINGE et al., 2011). No dispositivo construído por Colinge et al. (2009), a espessura do filme de

silício foi de 10 nm, a largura do nanofio foi de 30 nm e a concentração de dopantes foi da ordem de 10^{19} cm^{-3}.

Os transistores *junctionless* podem ser usados em aplicações para detecção de luz. Além da fabricação simplificada, esse tipo de dispositivo traz a vantagem de ter uma baixa corrente no caso sem iluminação quando comparado a estruturas similares como o fotocondutor. No entanto, a pequena área de sua seção transversal degrada a absorção de luz do fototransistor *junctionless* e, portanto, sua eficiência quântica (ROUDSARI et al., 2014). Por outro lado, a baixa absorção pode ser contornada pela presença de ganho inerente da estrutura.

O funcionamento de um fototransistor *junctionless* é similar ao de um dispositivo bipolar, como o da seção 2.4.3. Quando a polarização de porta induz uma região de depleção por todo o canal (estado desligado), o diagrama de bandas de energia de um dispositivo tipo-n é semelhante ao de uma junção n-p-n, como mostra a Figura 17. Quando a luz incide sobre a porta, pares elétron-lacuna são gerados no canal. Ao contrário do ^{BE}SOI, cuja porta é de alumínio, o eletrodo de porta do *junctionless* não reflete totalmente a luz, pois é feito em silício policristalino. Os portadores majoritários gerados opticamente (elétrons, neste caso) são atraídos para os contatos devido ao campo elétrico gerado pela polarização entre fonte e dreno. Já os portadores minoritários gerados opticamente (lacunas) são armadilhados pela barreira de potencial criada pela porta. Desse modo, para satisfazer o princípio de neutralidade de cargas, o nível da barreira é reduzido. Esse efeito não só ajuda na

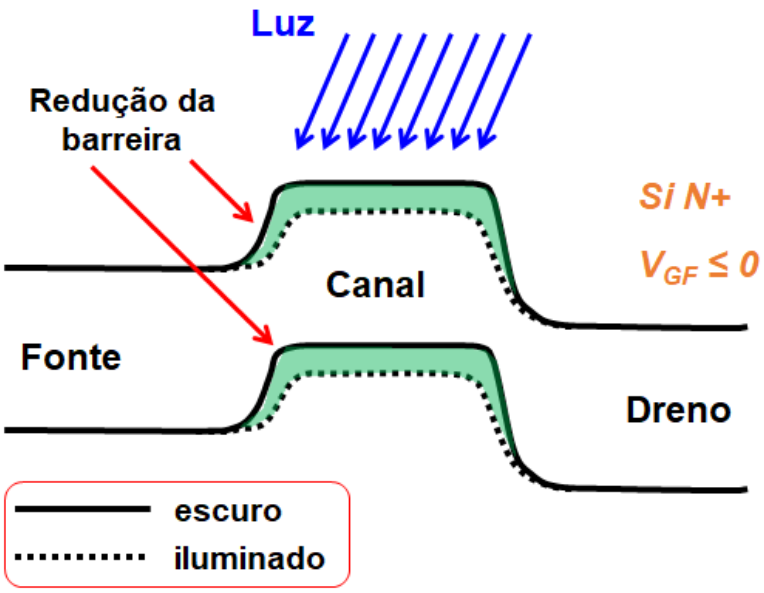


Figura 17 – Diagrama de bandas de energia de um fototransistor *junctionless* tipo-n sob iluminação.
Fonte: Adaptado de Das (2016).

difusão das lacunas para a região de fonte, mas também facilita de uma maneira geral a condução de portadores, induzindo o fototransistor ao estado ligado (redução da depleção de canal). Como resultado, a corrente óptica aumenta (ROUDSARI et al., 2014) (DAS et al., 2016).

Foi construído por Das et al. (2016) um fototransistor *junctionless* usando uma topologia de nanofio. O canal do dispositivo tem 1 µm de comprimento e 40 nm de largura. A espessura do filme de silício é de 10 nm com dopagem de arsênio e concentração de 3 10^{19} cm^{-3}. É usado como material de porta o silício policristalino largamente dopado com boro e com espessura de 50 nm. O óxido de porta é de SiO_2 e tem 10 nm de espessura. O desempenho do dispositivo foi medido para uma polarização V_{GF} = −0,35 V e V_{DS} = 0,3 V e usando uma fonte de luz monocromática com comprimento de onda de 710 nm e irradiância de 1 µW/cm^2. A responsividade do fototransistor *junctionless* obtida nesse caso foi de 0,18 A/W e o ganho da corrente óptica da estrutura foi de 10 (DAS et al., 2016).

Devido à semelhança de funcionamento com uma junção n-p-n, é possível melhorar o desempenho do fototransistor *junctionless* usando uma técnica de projeto de transistores bipolares (ROUDSARI et al., 2014). A fim de obter uma eficiência de emissor elevada, a concentração de dopantes do emissor em transistores bipolares deve ser bem maior que a da base (COLINGE, J. P.; COLINGE C. A., 2002). No caso do fototransistor *junctionless*, temos o canal e a fonte com operação análoga à da base e do emissor, respectivamente, do dispositivo bipolar. Como não é desejável ter um gradiente de concentração de dopantes na tecnologia *junctionles* pelo seu princípio de simplificação de processos, foi proposto por Roudsari et al. (2014) adicionar uma segunda porta entre o canal e o eletrodo de fonte. Assim como a primeira porta controla as cargas no canal, depletando os portadores, essa segunda porta controla as cargas na região de fonte. Deseja-se aplicar uma polarização de segunda porta que cause uma acumulação de portadores na região de fonte e, assim, aumentar artificialmente a concentração de portadores majoritários nessa região.

O dispositivo simulado por Roudsvari et al. (2014) tem filme de silício pouco dopado tipo-p com concentração uniforme de 10^{15} cm^{-3} e espessura de 850 nm. O canal tem comprimento e largura de 200 nm e a polarização na porta principal é de 1,0 V. A tensão entre fonte e dreno (V_{DS}) é −0,5 V e a da segunda porta é de −2,0 V. Para uma fonte de luz monocromática de comprimento de onda 630 nm e irradiância 10^{-4} W/cm^2 é obtido uma responsividade de 209,7 A/W e um ganho de 2053.

3 INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO LUMINOSA NO BESOI MOSFET

Nesta etapa do trabalho, a sensibilidade à luz de dispositivos BESOI MOSFET é analisada experimentalmente e por meio de simulações no TCAD Sentaurus. Dentro do espectro estudado, é dado maior foco para os comprimentos de onda na região Ultravioleta-A (UV-A, λ = 400 nm) e vermelho (λ = 635 nm).

O dispositivo BESOI MOSFET usado na caracterização experimental foi fabricado no Laboratório de Sistemas Integrados da Universidade de São Paulo, seguindo as etapas de processo descritas em Rangel e Martino (2015).

3.1 SENSIBILIDADE DO BESOI P-MOSFET À RADIAÇÃO UV

3.1.1 **Resultados experimentais**

A sensibilidade de dispositivos BESOI pMOSFET à radiação ultravioleta na região UV-A (λ = 400 nm) foi medida experimentalmente. O arranjo usado é mostrado esquematicamente na Figura 18 e consistiu em 16 LEDs colocados a cerca de 2,5 cm da lâmina contendo os dispositivos. Os LEDs utilizados tinham diâmetro de 5 mm com pico de potência espectral em λ = 400 nm. A corrente de polarização direta em cada LED foi de 20 mA. A densidade de fluxo radiante incidente sobre o dispositivo (irradiância) foi 0,19 W/cm^2, calculada segundo as considerações apresentadas detalhadamente no Apêndice A.

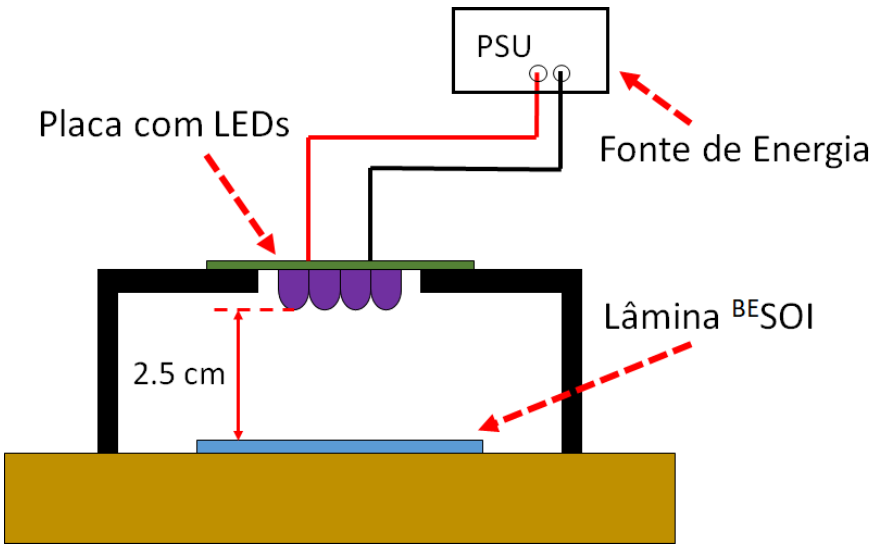


Figura 18 – Desenho esquemático do arranjo experimental.
Fonte: Autor.

Foram levantadas de transferência (I_{DS} *versus* V_{GF}) com e sem irradiação luminosa para o mesmo dispositivo operando como canal-p ($V_{GB} < 0$). As polarizações utilizadas no experimento foram $V_{DS} = -100$ mV e $V_{GB} = -20$ V. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 19, que indicam que, quando a luz UV é ligada, a corrente de dreno cresce em módulo (fica mais negativa) em comparação com o caso onde os LEDs estão desligados. Ainda se observa pelas curvas extraídas uma maior diferença entre as correntes na região C, quando a corrente de dreno tende à estabilização. Para melhor visualização, na mesma figura é também representada a diferença (ΔI_{DS}) entre as duas correntes de dreno. Obteve-se para uma polarização na primeira interface entre −2,5 e −3,0 V valores de ΔI_{DS} por volta de 30 nA. A responsividade obtida em $V_{GF} = -2,5$ V foi R = 7,7 mA/W (o cálculo realizado é apresentado em detalhes no Apêndice B).

O desempenho do ^{BE}SOI é menor que outros fotodetetores com espessura de silício semelhantes e, portanto, com pouca absorção de luz. O fototransistor *junctionless* de Das et al. (2016) usa outra polarização para detectar luz e alta concentração de dopantes, mas a espessura de sua camada de silício também é de 10 nm e apresenta responsividade de 180 mA/W para uma radiação de λ = 710 nm.

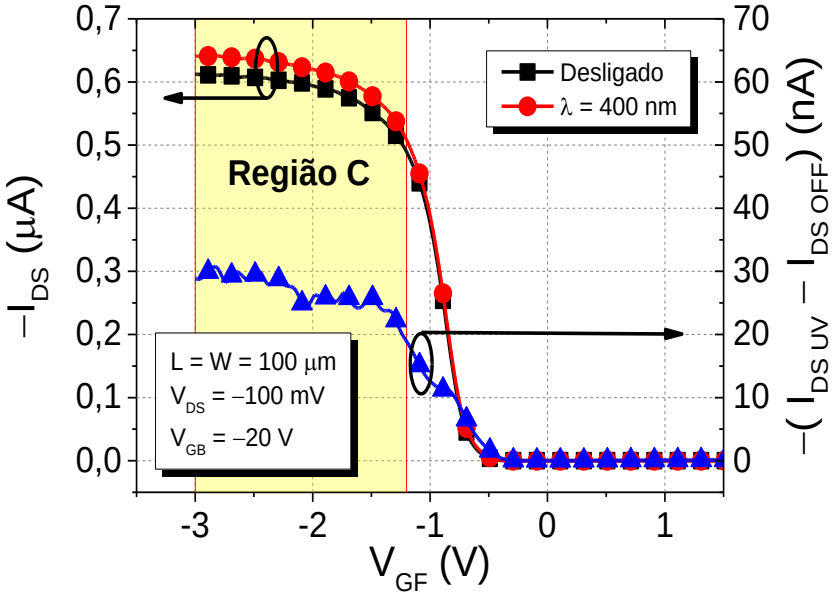


Figura 19 – Curvas experimentais da corrente de dreno versus tensão de porta do ^{BE}SOI pMOSFET com e sem irradiação ultravioleta. A diferença entre elas também é apresentada.
Fonte: Autor.

Com estes resultados, constata-se que o ^{BE}SOI pMOSFET é praticamente insensível quando a corrente flui apenas pela segunda interface. Uma maior influência

é observada na região C, onde os portadores são induzidos também na primeira interface pela polarização de porta. Os pares elétron-lacuna gerados pela luz ultravioleta reduzem a resistência na região entre os eletrodos de porta e fonte/dreno. Isto afeta principalmente os portadores induzidos na primeira interface, que, com a menor resistência do canal, contribuem mais com a corrente de dreno. Logo, o aumento de I_{DS} é maior na região C, quando esses portadores são mais relevantes.

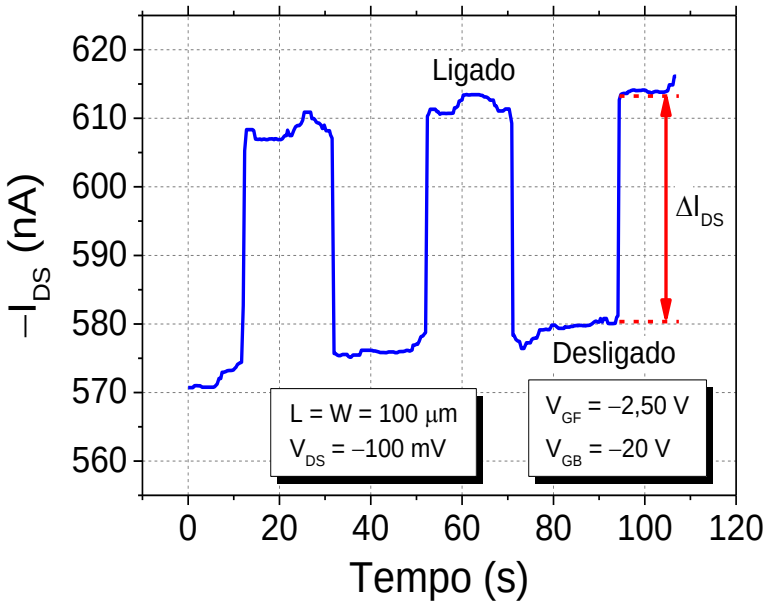


Figura 20 – Curva experimental da corrente de dreno versus tempo medida enquanto se ligava e desligava a luz ultravioleta para o dispositivo canal-p.
Fonte: Autor.

Considerando esta polarização com maior variação na corrente de dreno, foi medido I_{DS} em função do tempo onde a luz ultravioleta foi ligada e desligada periodicamente. A polarização utilizada foi V_{GB} = −20 V e V_{GF} = −2,5 V. Os resultados

Tabela 3 – Valores das variações da corrente de dreno observados na Figura 20.

Tempo (s)	Sentido	Variação de corrente (nA)	Responsividade (mA/W)
12,4	Ligando	27,4	7,21
31,9	Desligando	34,2	9,0
52,4	Ligando	35,9	9,45
71,1	Desligando	33,1	8,71
94,4	Ligando	35,0	9,21

Fonte: Autor.

experimentais são mostrados na Figura 20. É possível notar que os saltos de corrente são bem similares entre si, apesar da variação do nível de corrente em estabilização. As amplitudes medidas, como mostra a Tabela 3, ficaram por volta de 34 nA, o que condiz com o resultado notado na curva I_{DS} *versus* V_{GF} da Figura 19.

3.1.2 **Resultados simulados (modelo bidimensional)**

O dispositivo ^{BE}SOI pMOSFET operando sob irradiação ultravioleta também foi simulado com um modelo bidimensional usando o programa TCAD Sentaurus da Synopsys (Synopsys TCAD, 2013) para verificar os resultados experimentais. A geração óptica foi calculada usando o método *Optical Beam Absorption*, integrado ao simulador. Os índices de refração em função do comprimento de onda para o silício foram retirados de Aspnes e Studna (1983) e para o óxido de silício de Gao, Lemarchand e Lequime (2013).

O dispositivo simulado tem características muito semelhantes ao original que foi usado nos experimentos. A razão entre largura e comprimento de canal (W/L) manteve-se unitária, bem como os materiais e dimensões da camada de silício e óxidos enterrado e de porta. Ambas as regiões de subposição (distância entre a borda do eletrodo de porta e os contatos de fonte ou dreno) são idênticas e cada uma mede 10% do comprimento de canal. O código da descrição do dispositivo usado nas simulações foi listado no Apêndice C. Para simular os eletrodos de Níquel nos

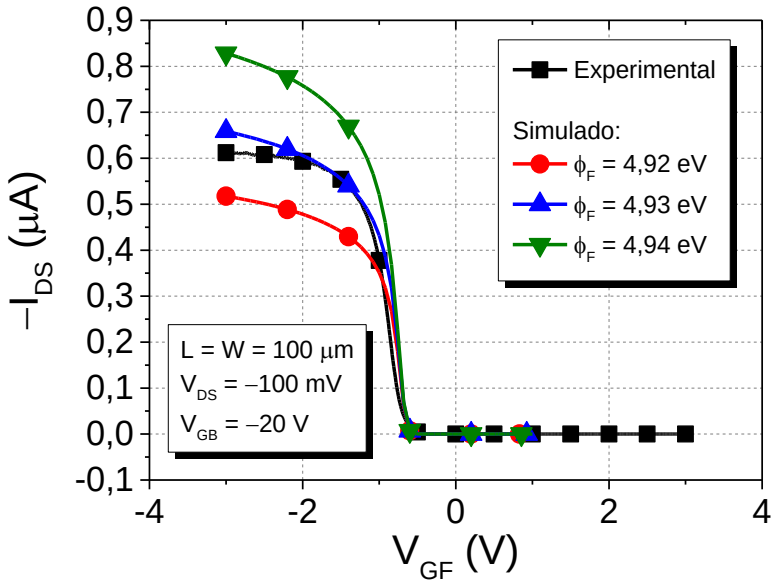


Figura 21 – Ajuste da função trabalho usando curvas I_{DS} versus V_{GF} experimental e simuladas.
Fonte: Autor.

terminais de fonte e dreno foi selecionado um contato tipo Schottky com função trabalho ajustada para Φ_M = 4,93 eV. A Figura 21 mostra este ajuste comparando curvas de transferência simuladas com a experimental, todas sem iluminação UV.

A iluminação se deu apenas na região de subposição e com incidência normal (perpendicular). Não foram levadas em consideração rugosidade ou falhas na superfície do dispositivo. Foi simulada uma luz ultravioleta monocromática com comprimento de onda λ = 400 nm e irradiância de 0,20 W/cm^2.

Foram simuladas curvas de transferência com e sem iluminação ultravioleta para o dispositivo funcionando como canal-p. As polarizações utilizadas foram as mesmas empregadas anteriormente no experimento (V_{DS} = −100 mV e V_{GB} = −20 V). Os resultados obtidos são mostrados na Figura 22 e o código da simulação está disponível no Apêndice D.

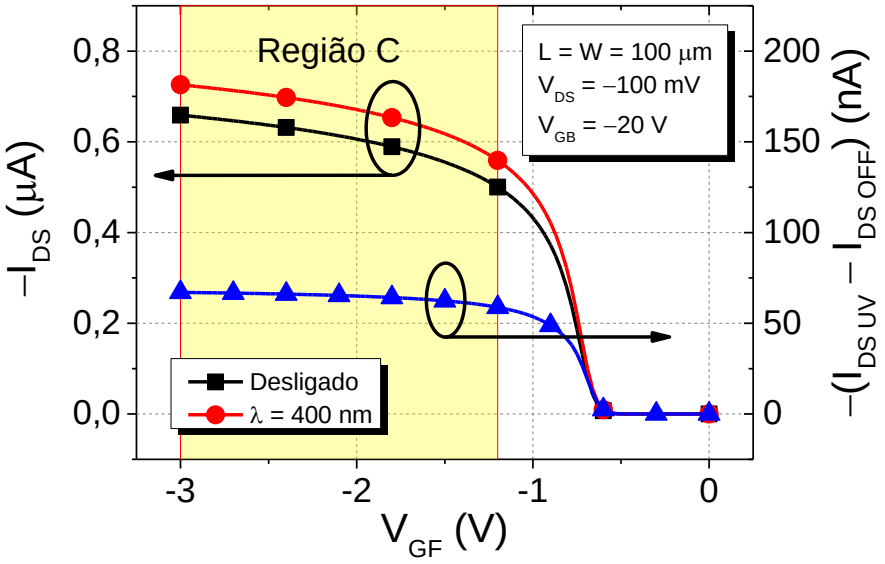


Figura 22 – Curvas simuladas da corrente de dreno versus tensão de porta do ^{BE}SOI MOSFET canal-p com e sem irradiação ultravioleta. A diferença entre elas também é mostrada.
Fonte: Autor.

Analisando as curvas de transferência simuladas percebe-se a mesma tendência observada experimentalmente. A radiação ultravioleta causa um aumento na corrente de dreno muito mais significativo na região C, isto é, quando I_{DS} começa a estabilizar. A variação de corrente na polarização V_{GF} = −2,5 V foi 66,2 nA e obteve-se uma responsividade de 165 A/W no mesmo ponto. O maior desempenho do dispositivo simulado em relação ao experimental se deve ao fato da maior variação de corrente obtida na simulação e pelo menor comprimento da subposição no modelo (0,1 µm). Com uma área iluminada reduzida e maior variação de corrente, a

responsividade do dispositivo simulado aumenta, como calculado no Apêndice B. Apesar de usarem métodos de detecção diferentes, o ^{BE}SOI mostrou responsividade semelhante ao fototransistor *junctionless* simulado por Roudsari et al. (2014), que tem responsividade de 210 A/W.

A maior sensibilidade à radiação ultravioleta dos dispositivos ^{BE}SOI operando na região C pode ser explicada analisando a densidade de corrente nas interfaces. Para tal, foram feitos dois cortes entre os contatos de fonte e dreno no dispositivo operando com polarização de porta igual a −2,5 V. As outras polarizações foram idênticas às simulações apresentadas anteriormente. O primeiro corte foi feito 1 nm abaixo do óxido de porta e o segundo a 1 nm acima do óxido enterrado para evitar efeitos de interface. Cada um permite visualizar, respectivamente, a primeira e segunda interfaces. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 23.

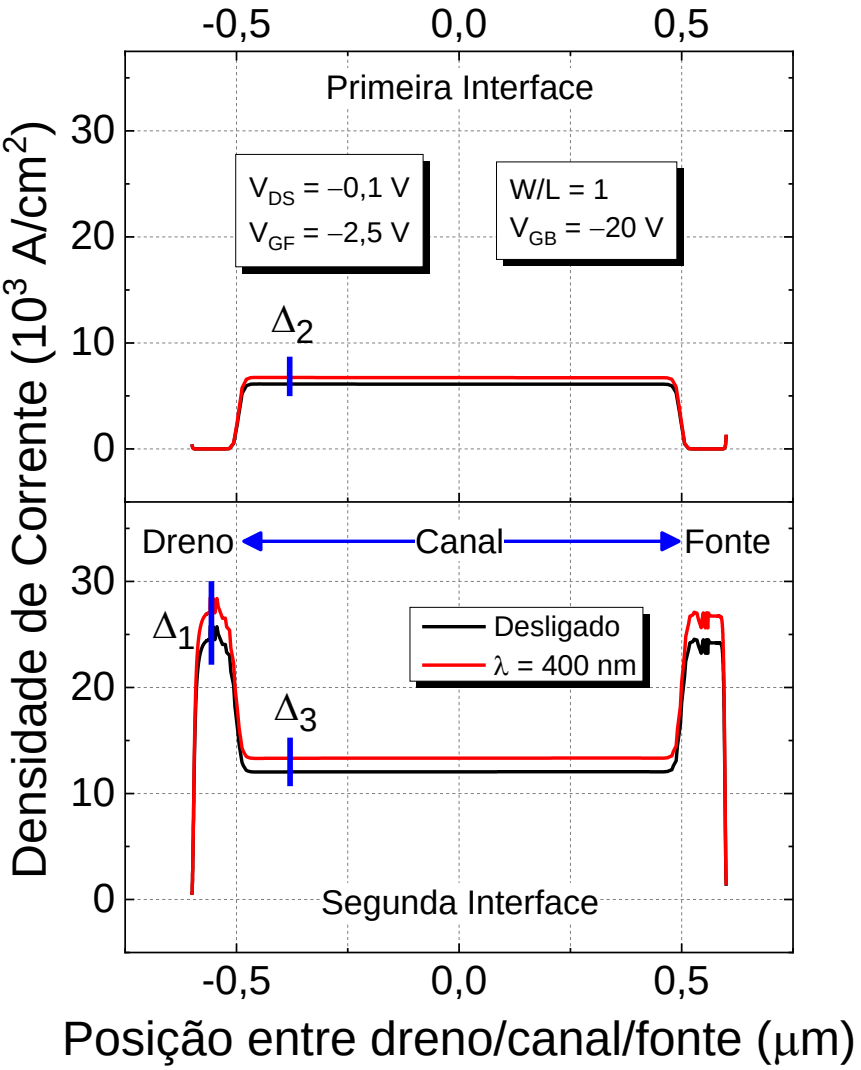


Figura 23 – Densidade de corrente nas primeira e segunda interfaces para os casos com e sem irradiação ultravioleta.
Fonte: Autor.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de Δ_1, Δ_2 e Δ_3.

Tabela 4 – Valores das variações da densidade de corrente observados na Figura 23.

Delta	Variação da densidade de corrente (10^3 A/cm^2)
Δ_1	2,54
Δ_2	0,68
Δ_3	1,25

Fonte: Autor.

A partir dos gráficos é possível explicar o aumento da corrente de dreno da seguinte forma: a luz ultravioleta gera pares elétron-lacuna ao longo de toda espessura de silício, mas apenas na região de subposição, ou seja, entre o canal e contatos de fonte/dreno, pois o eletrodo de porta, de alumínio, reflete a luz incidente, impedindo sua absorção pelo silício na região de canal. No entanto, nestas regiões onde há geração óptica, a influência da polarização da primeira porta é muito menor que a de segunda porta, pois o campo elétrico da primeira porta é bem menor fora do canal. Decorrente deste fato, percebe-se apenas um aumento na densidade de corrente na região de subposição na segunda interface (indicado por Δ_1), pois a polarização de segunda porta atrai para a segunda interface todas as lacunas geradas. Já na região do canal, os portadores em excesso se dividem entre as interfaces, o que aumenta tanto a corrente na primeira, como indicado por Δ_2, quanto na segunda interfaces, como indicado por Δ_3. Um desenho esquemático que ilustra o efeito é mostrado na Figura 24.

Os gráficos da Figura 23 mostram que a polarização do ^{BE}SOI na região C melhora a sensibilidade desse dispositivo à radiação luminosa. Observa-se que a indução de cargas na primeira interface ajuda os portadores gerados opticamente a serem conduzidos pela corrente de dreno. Por esse motivo, a variação da corrente entre os casos com e sem irradiação luminosa é maior na região C, onde a camada de cargas abaixo do óxido de porta está presente, tornando essa polarização a mais indicada para a aplicação do ^{BE}SOI como sensor de luz.

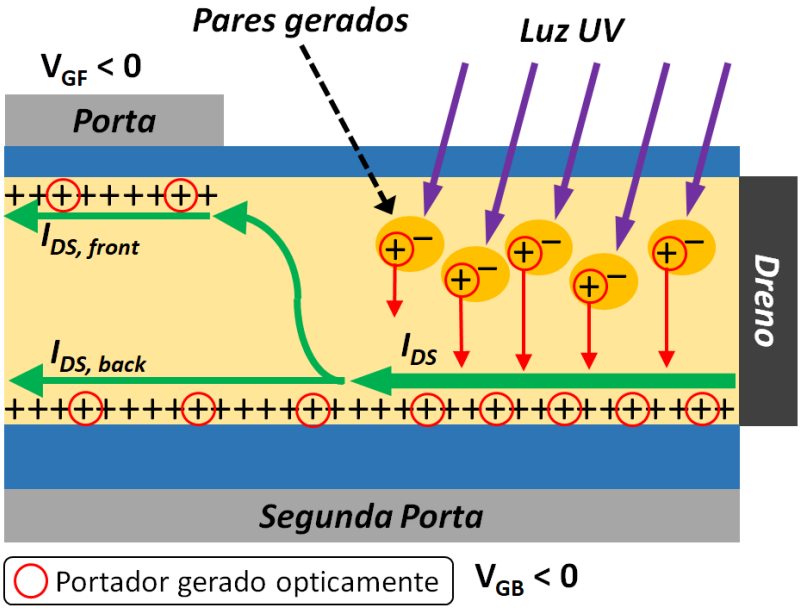


Figura 24 – Desenho esquemático do efeito de divisão de corrente entre as interfaces.
Fonte: Autor.

3.2 A INSENSIBILIDADE DO DISPOSITIVO ^{BE}SOI N-MOSFET

A sensibilidade do dispositivo ^{BE}SOI operando como canal-n ($V_{GB} > 0$) também foi verificada por meio de experimentos e simulações. No entanto, os resultados foram consideravelmente diferentes do caso de operação como canal-p.

Primeiro, extraiu-se experimentalmente curvas I_{DS} *versus* V_{GF} do mesmo dispositivo utilizado nos ensaios apresentados anteriormente, no entanto com as polarizações diferentes para alterar o modo de operação de pMOS para nMOS. Usou-se V_{DS} = 1,0 V e V_{GB} = 20 V. A maior tensão (em módulo) entre fonte e dreno justifica-se para aumentar o nível de corrente do dispositivo canal-n, que, pelo substrato ser dopado com Boro, é menor em comparação com o canal-p.

São apresentadas as curvas de transferência extraídas com e sem irradiação luminosa na Figura 25, no entanto a variação de I_{DS} não parece ser proveniente de geração óptica. O gráfico de ΔI_{DS} é positivo na região linear do ^{BE}SOI (região B) mas, quando a corrente tende a estabilizar (região C), a curva sem irradiação tem maior nível de corrente que no caso com os LEDs ultravioleta ligados. Isso leva a considerar que o dispositivo ^{BE}SOI sofre de alguma degradação na região C quando operando como transistor canal-n. É provável que esse efeito adverso seja causado por alguma instabilidade da liga Níquel silício.

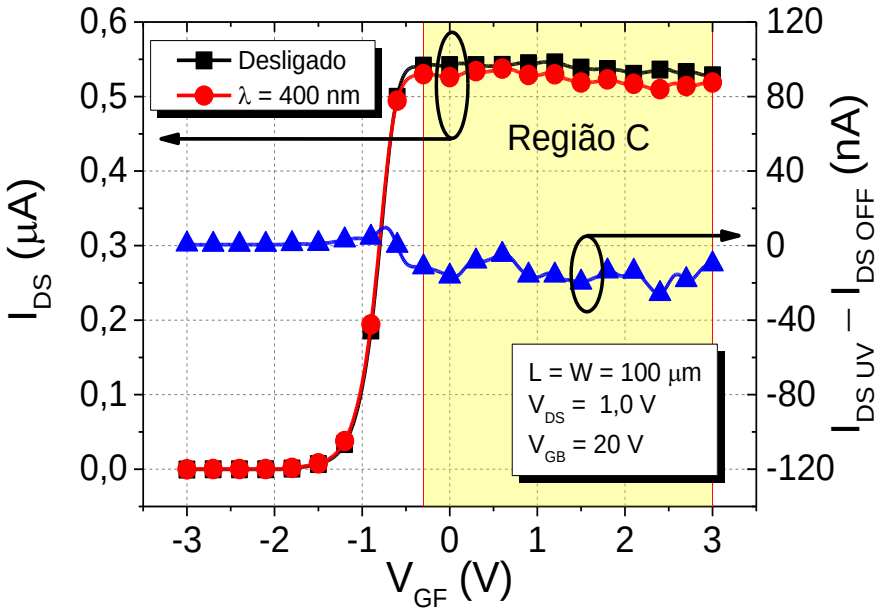


Figura 25 – Curvas experimentais da corrente de dreno versus tensão de porta do ^{BE}SOI nMOSFET com e sem irradiação ultravioleta. A diferença entre elas também é mostrada.
Fonte: Autor.

Assim como o dispositivo canal-p, também foi feita para o canal-n a extração da corrente de dreno ao longo do tempo usando uma polarização constante enquanto ligava e desligava os LEDs periodicamente. A tensão de porta foi fixada em 2,5 V enquanto se mantiveram iguais ao outro experimento as demais polarizações. Este tipo de análise é importante, pois resolve o problema de variação do patamar da corrente de estabilização que o ^{BE}SOI nMOSFET apresentou no experimento anterior.

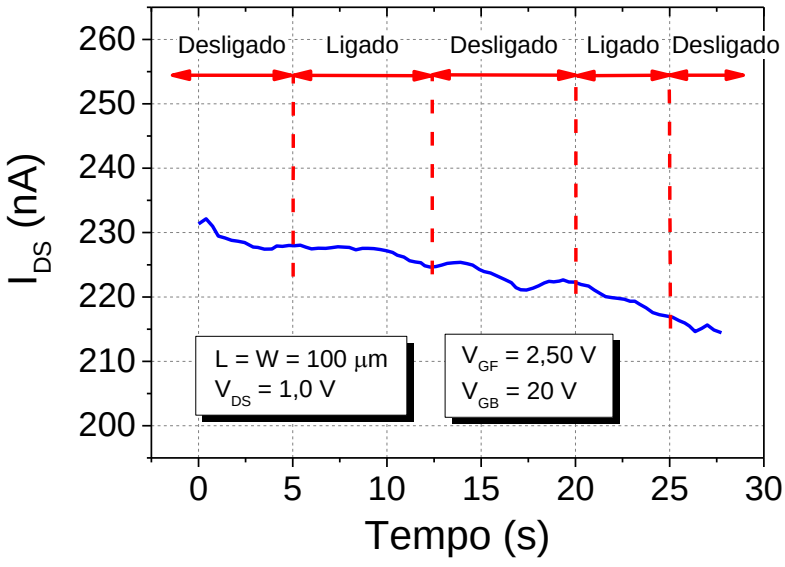


Figura 26 – Curva experimental da corrente de dreno versus tempo medida enquanto se ligava e desligava a luz ultravioleta para o dispositivo canal-n.
Fonte: Autor.

Por medir uma variação instantânea, o salto de corrente está imune aos problemas de variação no patamar de I_{DS} entre as medidas estáticas. No entanto, ao observar o resultado do experimento apresentado na Figura 26, não se percebe nenhuma variação na corrente de dreno quando a luz ultravioleta é ligada ou desligada.

3.2.1 **Alteração da dopagem de substrato**

Uma investigação mais profunda foi feita com a ajuda de simulações para explicar a insensibilidade do ^{BE}SOI à radiação ultravioleta enquanto opera como canal-n. Primeiro foi simulada uma extração de curvas de transferência com e sem incidência luminosa, mostrada na Figura 27. O dispositivo demonstra a mesma tendência do experimento anterior: não é notada nenhuma variação considerável entre as curvas. O fato é corroborado pela curva de ΔI_{DS}, que permanece nulo em toda a extração.

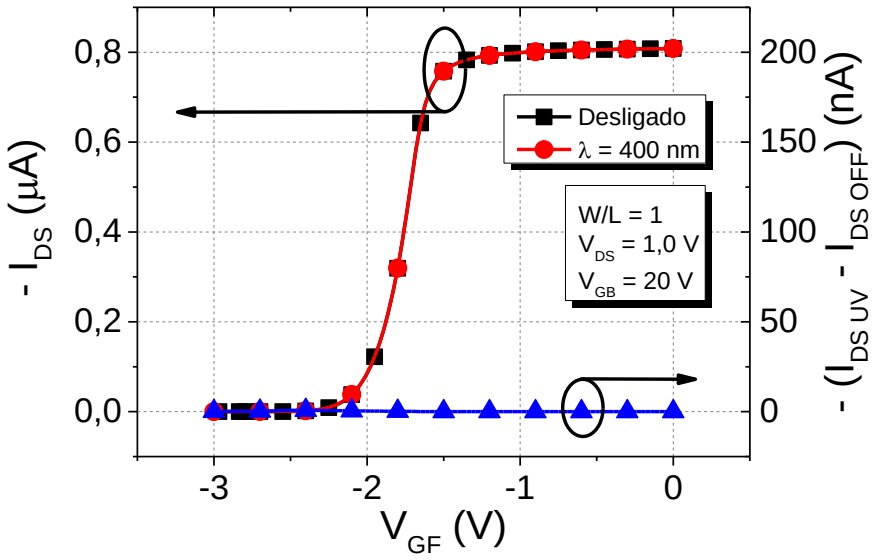


Figura 27 – Curvas simuladas da corrente de dreno versus tensão de porta dispositivo canal-n com e sem irradiação ultravioleta. A diferença entre elas também é mostrada.
Fonte: Autor.

Intuindo que a dopagem natural da lâmina teria influência sobre a sensibilidade à luz do ^{BE}SOI, posteriormente foram feitas as mesmas simulações, mas trocando o elemento dopante da lâmina de Boro para Fósforo. Dessa maneira, o substrato do ^{BE}SOI se tornou do tipo-n e com concentração igual a 10^{15} átomos/cm^3. As curvas de transferência, mostradas na Figura 28, foram extraídas com e sem

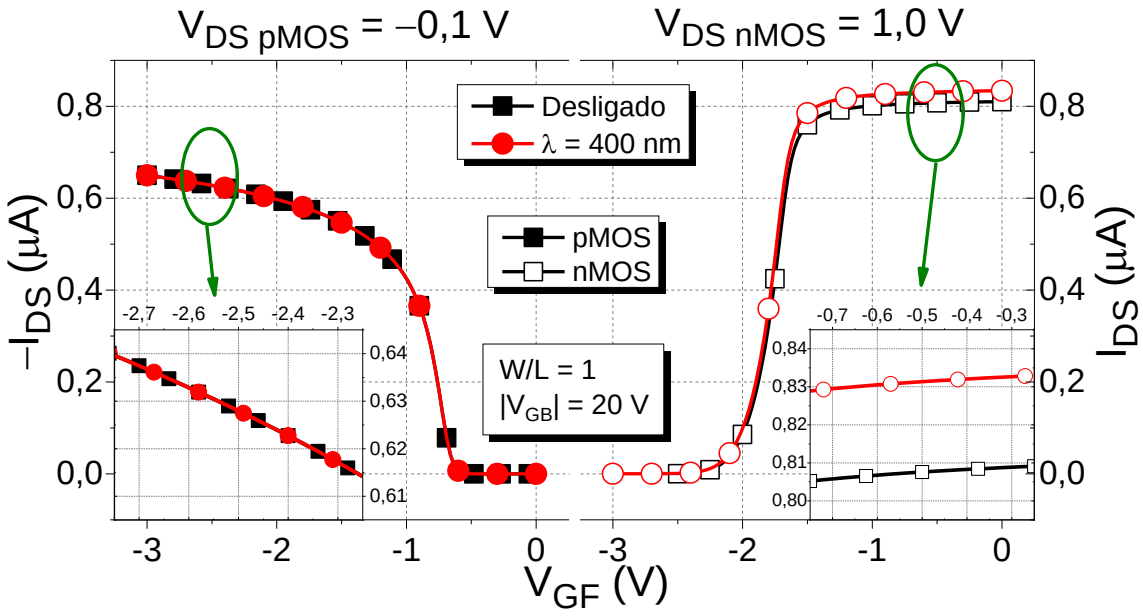


Figura 28 – Curvas I_{DS} versus V_{GF} simuladas de um dispositivo ^{BE}SOI construído em substrato dopado com Fósforo (tipo-p). São mostrados ambos os casos canal-p e -n com e sem irradiação ultravioleta.
Fonte: Autor.

luminosidade empregando polarizações V_{DS} = −100 mV e V_{GB} = −20 V, para o caso pMOS, e V_{DS} = 1,0 V e V_{GB} = 20 V, para o caso nMOS.

Os resultados obtidos nesta simulação mostraram exatamente o contrário do que havia sido observado anteriormente. Com o substrato tipo-n, a luz ultravioleta causou a variação do nível de corrente do dispositivo canal-n enquanto o transistor tipo-p permaneceu insensível à essa radiação. Isso corrobora a hipótese de que as impurezas do substrato, mesmo que em pequena concentração – está presente apenas a dopagem natural da lâmina – têm uma grande influência na sensibilidade do ^{BE}SOI.

Pode-se explicar os fatos apresentados usando a seguinte hipótese. Se a camada de cargas induzidas na segunda interface for composta por portadores minoritários, i.e., elétrons no substrato P e lacunas no substrato N, o portador gerado opticamente que efetivamente contribui para a corrente de dreno também será minoritário. Devido a um menor tempo de vida deste tipo de carga, os pares elétron-lacuna provenientes da geração óptica se extinguem mais rápido. Isso impossibilita que estes portadores consigam viajar pela região de subposição (*underlap*) a fim de formarem a corrente na segunda interface. Nos cortes feitos no dispositivo pMOS (Figura 23) viu-se que fora do canal não há corrente na primeira interface, portanto,

se a geração óptica não contribuir para a corrente na segunda interface na região de subposição, o resultado é que a corrente de dreno total não sofrerá variação e o dispositivo será insensível à radiação luminosa.

3.3 SENSIBILIDADE PARA OUTROS COMPRIMENTOS DE ONDA NO ESPECTRO VISÍVEL

Baseando-se no índice de refração do silício para diferentes comprimentos de onda (ASPNES; STUDNA, 1983) foram feitas simulações adicionais a fim de verificar uma frequência luminosa para qual o ^{BE}SOI pMOSFET fosse mais sensível. Extraiu-se curvas I_{DS} *versus* V_{GB} para diferentes comprimentos de onda e depois calculou-se a diferença entre as correntes de dreno com e sem luminosidade (ΔI_{DS}) para uma polarização de porta fixa em −2,5 V. As outras polarizações eram V_{DS} = −100 mV e V_{GB} = −20 V. Os resultados são mostrados abaixo na Figura 29, de onde se pode concluir que a radiação ultravioleta por volta de λ = 400 nm provoca uma variação de corrente ligeiramente maior neste dispositivo.

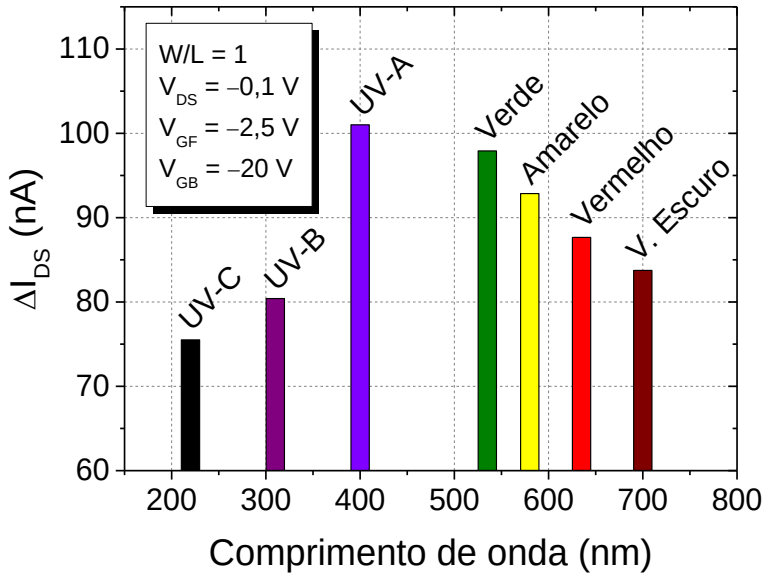


Figura 29 – Comparação entre valores simulados de ΔI_{DS} usando irradiações luminosas monocromáticas com diferentes comprimentos de onda.
Fonte: Autor.

Também foi medida experimentalmente a sensibilidade do ^{BE}SOI pMOSFET à luz vermelha. Usou-se um arranjo experimental muito semelhante ao feito no caso do ultravioleta, apenas com a diferença nos LEDs, que tinham pico de potência por volta

do comprimento de onda λ = 635 nm. Por falta de uma medida de intensidade radiante consistente, tentou-se normalizar a intensidade luminosa a partir da corrente de polarização dos LEDs. De uma perspectiva fotométrica, o método resulta em fluxos luminosos (iluminância) parecidos, sendo 180 e 200 mcd para o LED ultravioleta e vermelho, respectivamente, segundo as folhas de especificações (*datasheets*).

Foram então extraídas as curvas de transferência tanto para a radiação UV quanto vermelha para o mesmo dispositivo e polarizações usados nos experimentos anteriores. Os resultados apresentados na Figura 30 mostram a mesma tendência apresentada na simulação anterior, onde a radiação vermelha (λ = 635 nm) causa uma variação no nível de corrente de dreno menor que a ultravioleta (λ = 400 nm). A característica de maior ΔI_{DS} na região C também foi observada.

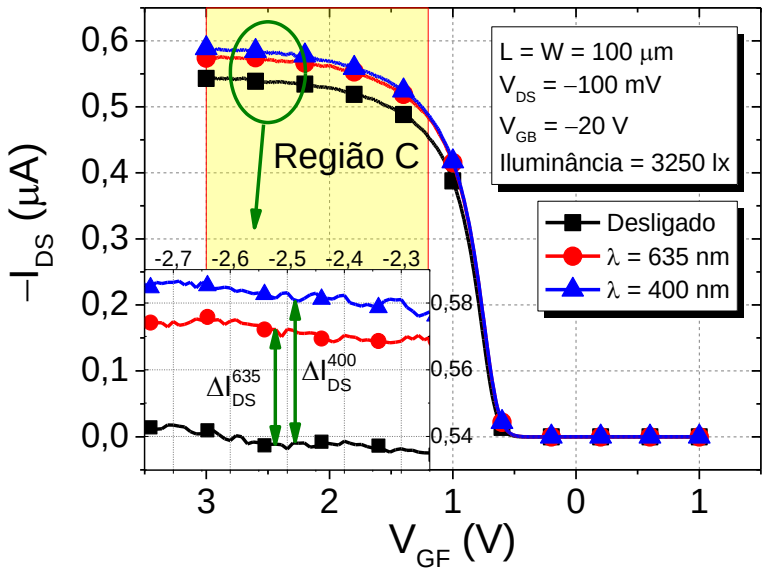


Figura 30 – Curvas experimentais da corrente de dreno versus tensão de porta do ^{BE}SOI pMOSFET com irradiação ultravioleta e vermelha e sem nenhuma radiação.
Fonte: Autor.

As mesmas tendências são observadas também nas curvas I_{DS} *versus* V_{GF} simuladas, representadas na Figura 31.

Outro experimento realizado também para a radiação vermelha foi a medida da corrente de dreno em função do tempo enquanto se ligava e desligava os LEDs para uma polarização de porta fixa em −2,5 V. Nesse caso, no entanto, também foi variado a corrente de polarização dos diodos. Foram extraídos os saltos de correntes para ambas cores de LED e manteve-se as polarizações de V_{GB} e V_{DS} dos experimentos anteriores. Os saltos de corrente obtidos são mostrados na Tabela 5

para o ultravioleta e vermelho, separadas pela corrente de polarização dos LEDs e sentido do salto (ligar/desligar).

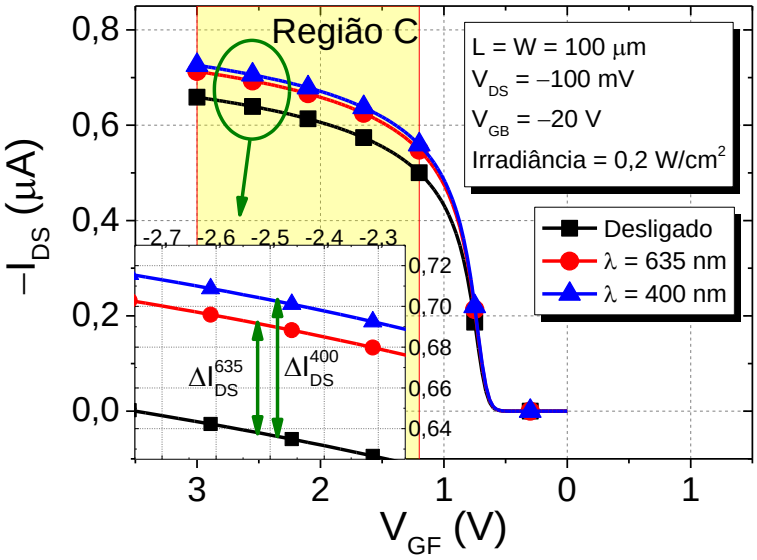


Figura 31 – Curvas simuladas da corrente de dreno versus tensão de porta do BESOI pMOSFET com irradiação ultravioleta e vermelha e sem nenhuma radiação.
Fonte: Autor.

Tabela 5 – Valores experimentais de ΔI_{DS} para irradiações ultravioleta e vermelha.

Corrente direta I_F (mA)	Sentido	Variação de corrente ultravioleta $\Delta I_{DS,\,400}$ (nA)	Variação de corrente vermelha $\Delta I_{DS,\,635}$ (nA)
2,5	Ligando	31,3	26,8
	Desligando	25,8	22,8
5	Ligando	33,4	28,0
	Desligando	26,4	28,5
10	Ligando	33,4	31,0
	Desligando	34,2	29,6
15	Ligando	33,9	31,6
	Desligando	33,7	30,2
20	Ligando	33,9	32,3
	Desligando	34,1	33,8

Fonte: Autor.

Observa-se que a variação causada pela luz ultravioleta foi maior que no caso de irradiação vermelha. Também é notório que a variação da corrente de polarização dos LEDs não causou efeito significativo em ΔI_{DS} para valores de I_F maiores que 10 mA. Apenas foi observada alguma variação no salto de corrente quando a corrente nos LEDs foi 2,5 e 5 mA.

3.4 INFLUÊNCIA DO EFEITO DE ACOPLAMENTO ENTRE INTERFACES

Na seção 2.4.4 é apresentado o ICPD, um fotodetetor muito semelhante ao ^{BE}SOI MOSFET: estão presentes características como o uso da tecnologia SOI, canal pouco dopado, condução de corrente pela segunda interface e presença de regiões de subposição. A canal de silício no fotodetetor é, porém, mais espesso com t_{Si} = 200 nm. Como já descrito, o funcionamento do ICPD se baseia no efeito de acoplamento entre interfaces: altera-se a tensão de limiar do canal condutivo de lacunas na interface adjacente ao óxido enterrado por meio da indução de elétrons gerados opticamente abaixo da porta.

Até agora, os experimentos e simulações feitos com o ^{BE}SOI consideravam uma operação onde era induzido o mesmo tipo de portador em ambas interfaces, cujo mecanismo de condução, descrito na seção 3.1, se baseia na passagem de corrente tanto na primeira quanto segunda interfaces, o que ajuda a conduzir os pares elétron-lacuna gerados opticamente, aumentando a sensibilidade. No entanto, foi detectado em experimentos com dispositivos de menor dimensão presentes na mesma lâmina que há uma variação na tensão de limiar na curva I_{DS} *versus* V_{GF} quando irradiados

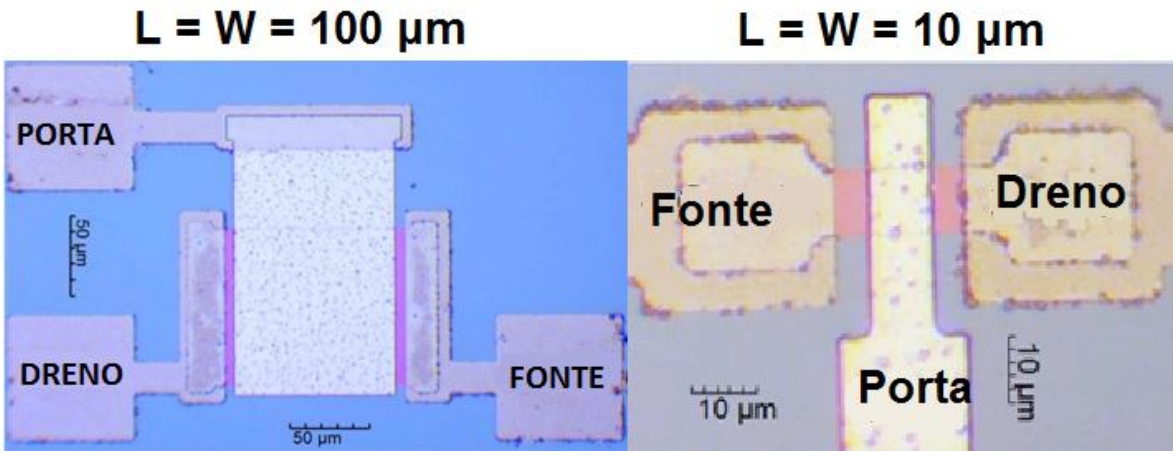


Figura 32 – Dispositivos ^{BE}SOI MOSFET de diferentes dimensões presentes na mesma lâmina.
Fonte: Autor.

com luz, indicando uma influência dos portadores minoritários (elétrons no caso de substrato tipo-p) e, portanto, a presença do efeito de acoplamento. Na Figura 32 são mostradas fotos de ambos os dispositivos com diferentes dimensões, que estão presentes na lâmina.

O gráfico à esquerda da Figura 33 mostra as curvas I_{DS} versus V_{GF} com e sem iluminação do dispositivo com L = W = 100 µm e de outro, menor, com L = W = 10 µm. Ambos os dispositivos são da primeira geração do ^{BE}SOI, ou seja, os eletrodos de fonte e dreno são fabricados em alumínio. Nesse caso, são aplicados −1 V entre fonte e dreno e a polarização de segunda porta é −10 V. É perceptível que o nível de corrente do dispositivo maior é significativamente mais alto, apesar da relação comprimento e largura de canal serem iguais. A maior variação de corrente com a radiação luminosa também é notória, o que é comprovado pelo gráfico à direita, que mostra a variação de corrente entre os casos com e sem luz em função de V_{GF}. Para uma tensão de porta igual a −2,7 V (dentro da região C), obtemos ΔI_{DS} = 1,5 µA e R = 0,39 A/W para o transistor L = W = 100 µm e ΔI_{DS} = 0,72 µA com R = 1,90 A/W no caso L = W = 10 µm. Como o dispositivo pequeno tem área de subposição dez vezes menor que o dispositivo grande, a sua responsividade é maior, uma vez que a variação de corrente não diminui na mesma proporção.

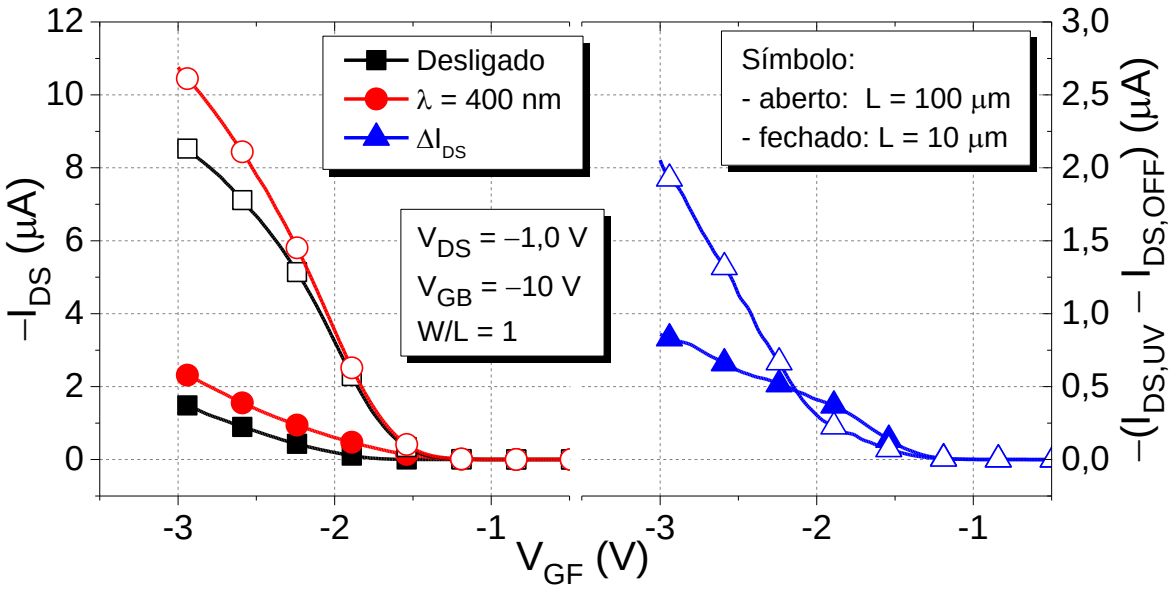


Figura 33 – Curvas experimentais da corrente de dreno versus tensão de porta de dispositivos ^{BE}SOI com L = W = 100 µm e L = W = 10 µm com e sem iluminação. A diferença entre as curvas também é apresentada.
Fonte: Autor.

Ambas as regiões de subposição, do lado do dreno e do lado da fonte, em cada dispositivo têm comprimento de 10 µm, cada uma. Já a largura é igual ao W do dispositivo, portanto cada região mede (L x W) 10x100 µm e 10x10 µm, para o transistor maior e menor, respectivamente. Como essa polarização induz portadores do mesmo tipo em ambas as interfaces, é mais relevante para o aumento da corrente a quantidade de pares elétron-lacuna gerados opticamente. O maior ΔI_{DS} que o dispositivo com L = 100 µm apresenta é, portanto, decorrente à maior área das regiões de subposição e, por consequência, o superior número de portadores gerados opticamente.

As mesmas curvas de transferência são mostradas na Figura 34, mas em escala logarítmica. Nesses gráficos é possível ver uma considerável variação da tensão de limiar do transistor com L = W = 10 µm entre os casos com e sem iluminação. Para uma corrente $I_{DS} = 10^{-7}$ A foram observadas variações de V_{TH} de 0,40 V para o dispositivo com L = 10 µm, mais de dez vezes maior que o observado quando L = 100 µm (0,03 V). Este fato leva à conclusão que há a presença do efeito de acoplamento entre interfaces, que causa a variação de V_{TH}. Inclusive, é possível pressupor que a variação de corrente reportada na Figura 33 se deve majoritariamente ao efeito de variação da tensão de limiar enquanto o efeito da divisão de corrente é menos influente.

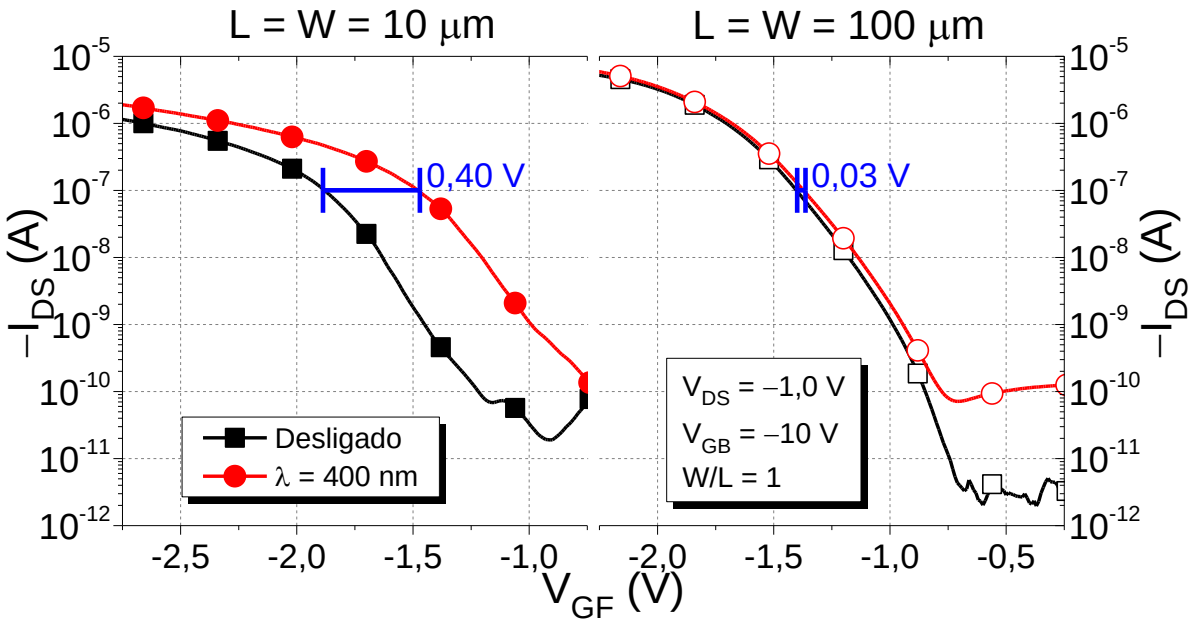


Figura 34 – Curvas experimentais em escala logarítmica da corrente de dreno versus tensão de porta de dispositivos BESOI com L = W = 100 µm e L = W = 10 µm com e sem iluminação.
Fonte: Autor.

Conjectura-se que a razão da presença do acoplamento deva-se à presença de uma alta concentração de cargas no óxido de porta. Desse modo, como as cargas são positivas, é possível que seja induzida alguma concentração de elétrons na primeira interface, especialmente nas regiões de subposição, que não estão sob influência do campo elétrico da porta ($V_{GF} < 0$). Por consequência os elétrons gerados opticamente são atraídos para a primeira interface e causam a variação da tensão de limiar. Quando L = 10 µm, a área das regiões de subposição é parecida com a área total do dispositivo, portanto, a quantidade de pares gerados em relação ao total de portadores que formam o canal é proporcionalmente maior quando comparado com o dispositivo com L = 100 µm. Logo, os portadores minoritários (elétrons) são mais influentes no transistor pequeno.

Assim sendo, usando uma polarização de porta negativa observam-se dois efeitos quando o dispositivo é iluminado a depender das suas dimensões. Para grandes dimensões, o efeito de divisão de corrente descrito na seção 3.1 é mais influente devido ao maior número absoluto de pares elétron-lacuna gerados opticamente. Enquanto que para dispositivos pequenos, devido à presença de cargas no óxido de porta, há maior influência dos portadores minoritários gerados, que são atraídos para a primeira interface e alteram a tensão de limiar.

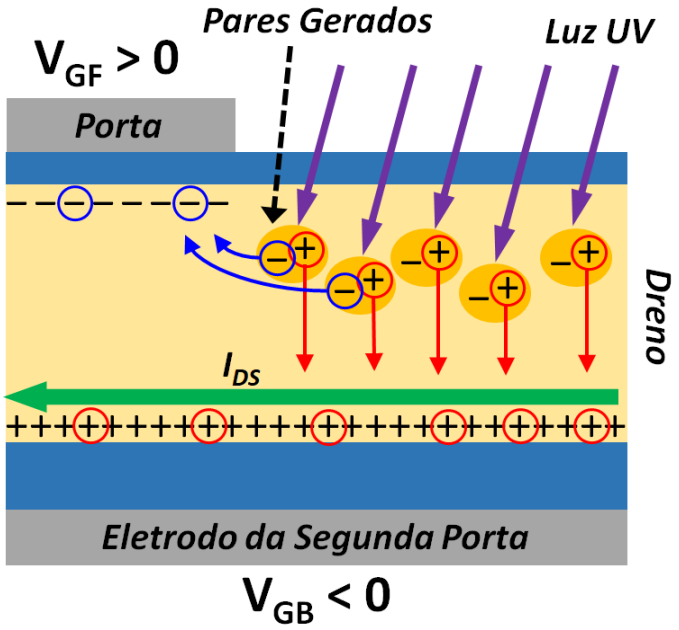


Figura 35 – Desenho esquemático do efeito de acoplamento de interfaces no ^{BE}SOI MOSFET.
Fonte: Autor.

O ^{BE}SOI também foi polarizado de modo similar ao ICPD para estudar o efeito de acoplamento entre interfaces, ou seja, usando V_{GB} negativo para criar um canal condutivo de lacunas na segunda interface e V_{GF} positivo para induzir elétrons sob a porta. O princípio, como explicado na seção 2.4.4, se baseia no aumento da concentração de elétrons na primeira interface devido à geração óptica, que causa a variação da tensão de limiar do canal condutivo na segunda interface (V_{TH2}). Uma ilustração do efeito também é apresentada na Figura 35.

O gráfico da Figura 36 mostra uma varredura da corrente de dreno em função da polarização de segunda porta do dispositivo L = W = 10 µm com e sem iluminação para duas polarizações de porta diferentes. Extraindo a tensão de limiar da segunda interface pelo método do valor de corrente de dreno constante $I_{DS} = 10^{-7}$ A, nota-se que para $V_{GF} = -1,5$ V a variação de V_{TH2} é consideravelmente pequena, apenas 0,3 V. Quando é usada uma polarização positiva, $V_{GF} = 0,5$ V, a luz causa uma variação de V_{TH2} muito maior, chegando a 1,85 V. Mesmo havendo alguma concentração de elétrons quando $V_{GF} > 0$ devido à presença de cargas no óxido, a concentração desses portadores sob a porta é muito maior quando V_{GF} é positivo, o que permite mais elétrons gerados opticamente aumentarem a carga negativa na primeira interface.

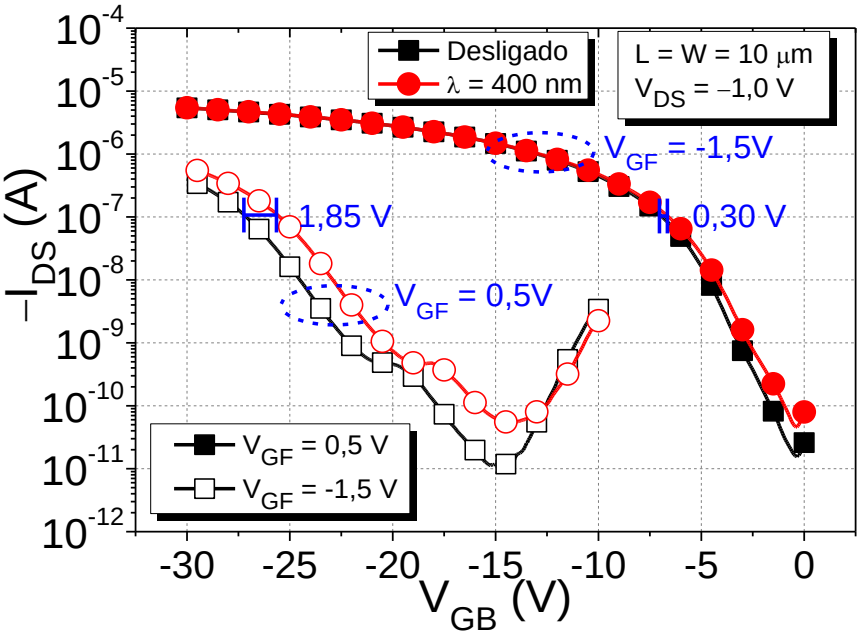


Figura 36 – Curva experimental da corrente de dreno versus tensão de segunda porta para o dispositivo L = W = 10 µm com e sem iluminação para duas polarizações de porta.
Fonte: Autor.

O mesmo experimento foi feito para o dispositivo de grandes dimensões e os resultados são mostrados na Figura 37. Usando o mesmo método de extração da

tensão de limiar, observa-se que o deslocamento de V_{TH2} devido à iluminação foi muito pequeno para ambas as polarizações de porta. Obteve-se apenas 0,45 V para V_{GF} = −1,5 V e 0,40 V para V_{GF} = 0,5 V.

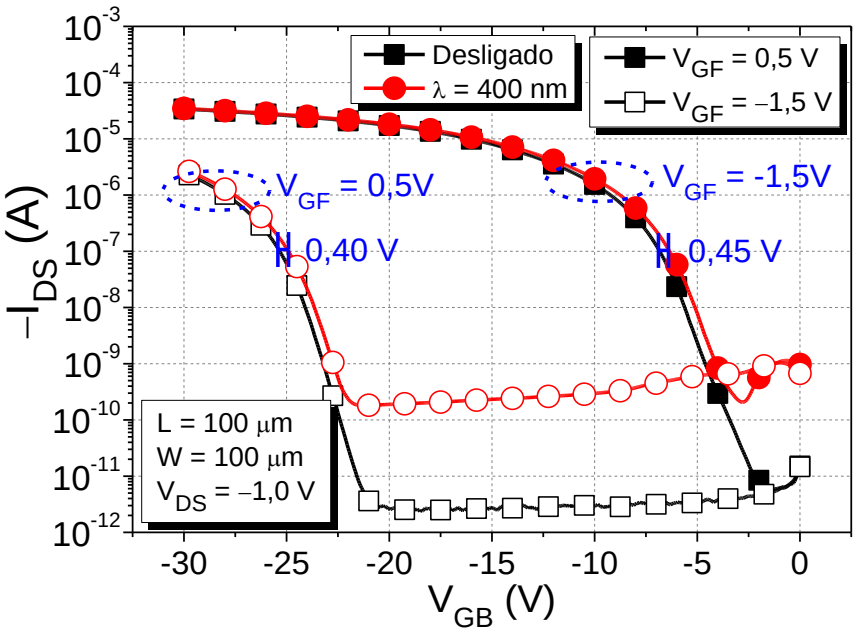


Figura 37 – Curva experimental da corrente de dreno versus tensão de segunda porta para o dispositivo L = W = 100 μm com e sem iluminação para duas polarizações de porta.
Fonte: Autor.

O experimento foi ampliado para outras polarizações de porta bem como para outro transistor, esse com dimensões L = 30 μm e W = 10 μm. A Figura 38 mostra a variação de V_{TH2} para todos os três dispositivos estudados em função de V_{GF}. Nota-se que apenas para o transistor com L = 10 μm existe um deslocamento de V_{TH2} considerável quando $V_{GF} > 0$, se $V_{GF} \leq 0$ tal variação é pequena. Já os dispositivos com L = 30 μm e L = 100 μm não seguem essa tendência e mantém um deslocamento de V_{TH2} constante para todos os valores de V_{GF} testados.

A baixa variação da tensão de limiar da segunda interface em dispositivos de grandes dimensões é explicada de maneira similar ao que foi discutido anteriormente nesta seção. Nos transistores grandes, a quantidade de elétrons gerados opticamente é menor em comparação com o total de cargas dentro do canal. Isso é decorrente da menor proporção entre as áreas das regiões de subposição (onde há geração óptica) e a área total do dispositivo. Desse modo, a variação da concentração de elétrons na primeira interface é menor, causando baixo deslocamento de V_{TH2}. Em contrapartida, quando as dimensões são pequenas, os portadores minoritários são mais influentes sobre a tensão de limiar da segunda interface, pois a quantidade de portadores

gerados opticamente é proporcionalmente maior em relação ao total de cargas no canal.

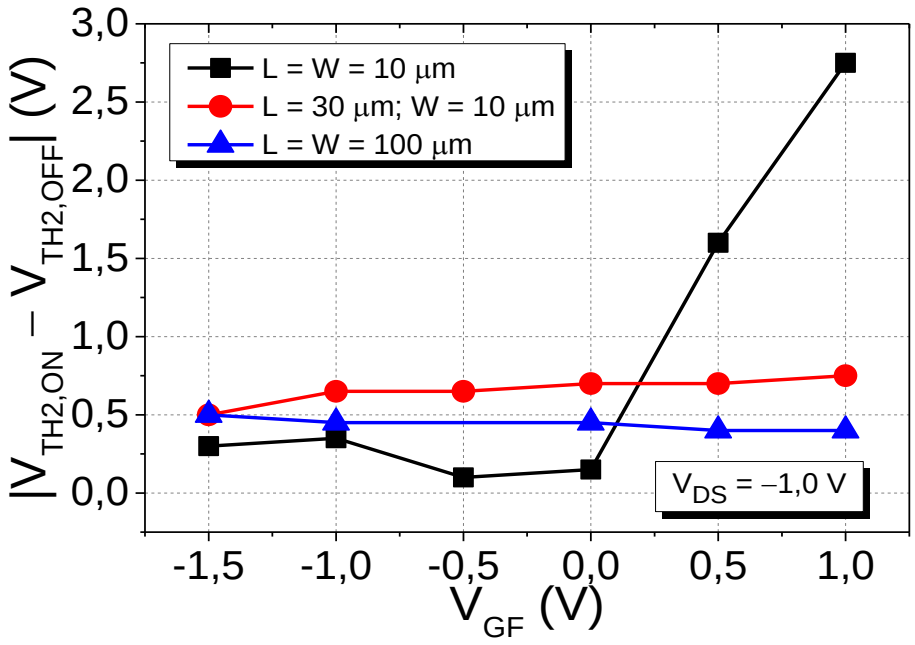


Figura 38 – Variação decorrente da iluminação da tensão de limiar da segunda interface em função da tensão de porta aplicada.
Fonte: Autor.

4 OTIMIZAÇÃO DO ^{BE}SOI MOSFET COMO SENSOR DE LUZ

Esta seção se dedica a buscar maneiras de melhorar a sensibilidade óptica do dispositivo ^{BE}SOI pMOSFET. Nesse sentido, foi verificado o impacto de diferentes espessuras da camada de silício na variação de corrente devido à geração óptica. A alteração do tipo e concentração de dopantes no canal também foi estudada. Por se tratarem de alterações na estrutura do transistor, os resultados obtidos são provenientes exclusivamente de simulações numéricas pelo TCAD Sentaurus, que, no capítulo anterior, se mostraram consistentes ao seguirem as tendências observadas experimentalmente.

4.1 ESPESSURA DA CAMADA DE SILÍCIO

Na tentativa de melhorar a sensibilidade do ^{BE}SOI pMOSFET à radiação luminosa, variou-se, por meio de simulações, a espessura da camada de silício (t_{Si}) entre 5 e 30 nm. Foram extraídas para os dispositivos modificados as curvas de transferência usando polarizações V_{DS} = −100 mV e V_{GB} = −20 V. A partir disso, mediu-se a variação da corrente de dreno entre os casos com e sem radiação luminosa para uma tensão de porta V_{GF} = −2,5 V. Em cada ensaio usou-se excitações luminosas

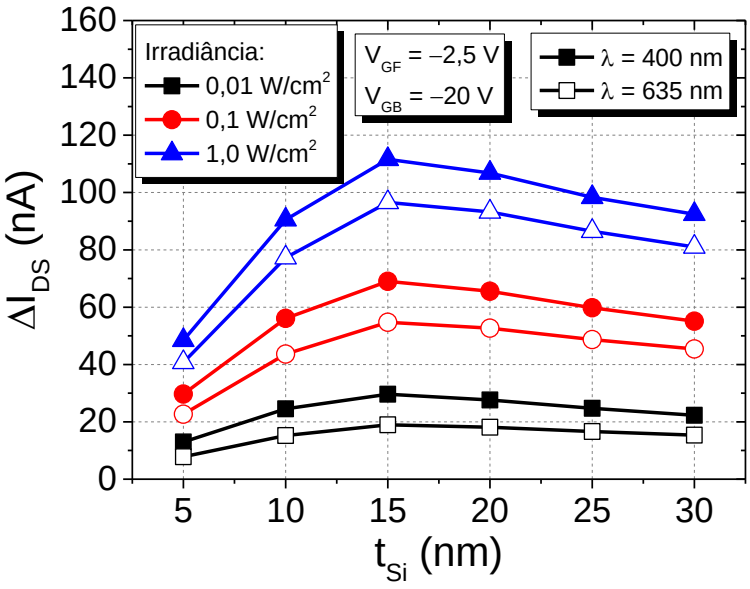


Figura 39 – Valores simulados de ΔI_{DS} versus t_{Si} para uma polarização V_{GF} = - 2,5 V. As irradiações de 400 nm e 635 nm são parametrizados em função do fluxo luminoso recebido.
Fonte: Autor.

monocromáticas ou na região do vermelho (λ = 635 nm) ou ultravioleta (λ = 400 nm). Em cada caso variou-se a irradiância entre 0,01, 0,10 e 1,0 W/cm^2. São apresentados os valores aferidos de ΔI_{DS} em função de t_{Si} na Figura 39.

Os resultados mostram que a variação de corrente é crescente até t_{Si} = 15 nm, após esse ponto, incrementos na espessura do silício reduzem a sensibilidade do ^{BE}SOI à radiação luminosa. Este efeito é contra intuitivo, como ambas as frequências de luz atravessam o silício mais do que 30 nm era esperado que um maior volume de silício produzisse mais pares elétron-lacunas, logo, aumentado ΔI_{DS}. Supõe-se que há competição entre dois efeitos contrários, um que aumenta a variação da corrente de dreno e outro que a diminui. Isso explica a existência de um ponto de máximo ΔI_{DS}.

Para estudar os fenômenos foi feito um corte vertical na região de subposição (*underlap*) do lado do dreno logo na borda do canal, a 1 nm do eletrodo de porta. A Figura 40 mostra um esquemático do ^{BE}SOI com o corte, denominado aqui por A-A'. A partir dele é possível obter maiores detalhes sobre o comportamento da corrente de dreno quando ela se divide entre as interfaces.

O efeito que incrementa a variação de corrente é causado pelo aumento do número de pares elétron-lacuna gerados opticamente na região de subposição (*underlap*). Como comentado anteriormente, ao expandir a espessura da camada de

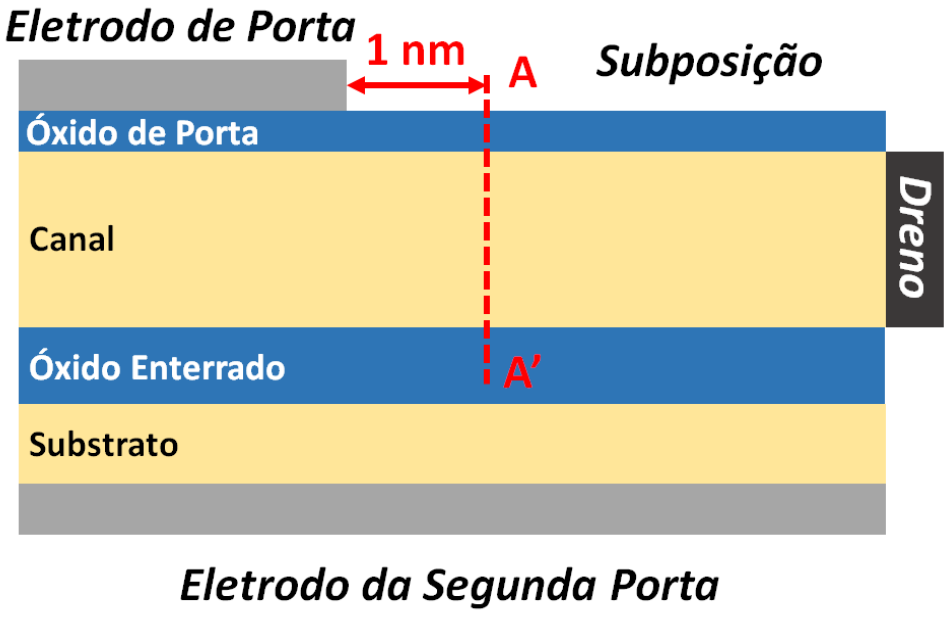


Figura 40 – Desenho esquemático da região de subposição (*underlap*) do ^{BE}SOI indicando a posição do corte A-A'.
Fonte: Autor.

silício, portanto seu volume, mais luz é absorvida por esta região. Assim sendo, mais pares são gerados opticamente, que contribuem para o crescimento total da corrente, portanto aumentando ΔI_{DS}.

Para comprovar o efeito, foi extraído o total de pares gerados ao longo do corte A-A' tanto pela luz vermelha quanto ultravioleta. O resultado é apresentado na Figura 41 e corrobora a tese do aumento de ΔI_{DS} devida à maior geração óptica. É evidente o crescimento linear do número de pares gerados junto com a espessura do silício para ambos os comprimentos de onda utilizados. Também é notória que a geração óptica devido à luz vermelha é menor que no caso ultravioleta, que é a causa de ΔI_{DS} ser maior para este último caso, como constatado anteriormente.

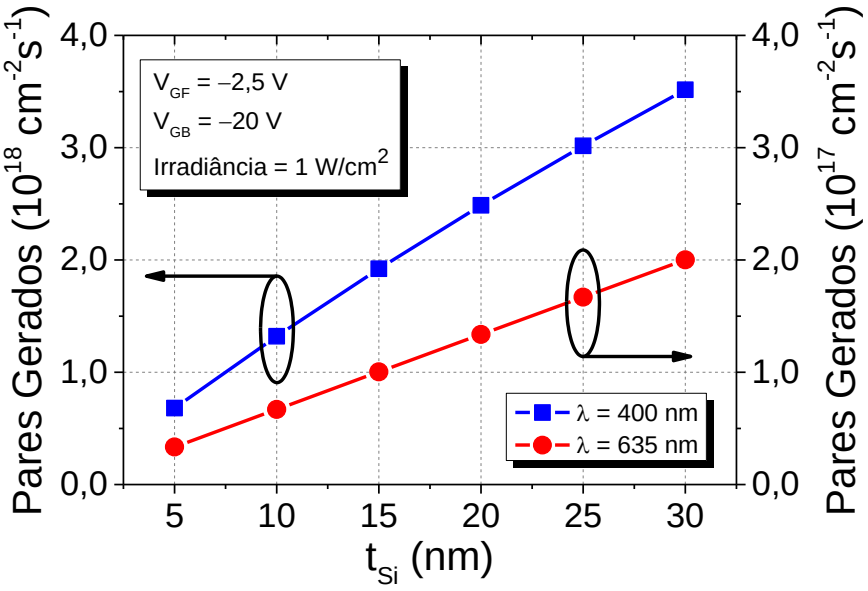


Figura 41 – Total de pares gerados devido radiação luminosa ao longo do corte A-A'.
Fonte: Autor.

Já o segundo efeito, que reduz a variação da corrente de dreno, é causado pela maior chance dos portadores majoritários – lacunas, no caso estudado – de se recombinarem quando se aumenta a espessura da camada de silício. O número total de pares recombinados ao longo do corte A-A' é mostrado na Figura 42. Nota-se que, assim como a geração de pares, a recombinação de portadores aumenta junto com a espessura da camada de silício para ambas os comprimentos de onda. No entanto, a característica desse crescimento é exponencial: a partir de t_{Si} = 15 nm há um aumento abrupto do número de pares recombinados. Fica evidente, portanto, que ambos os efeitos competem entre si e, a partir de certo ponto, o fenômeno que diminui ΔI_{DS}

supera o seu concorrente. O resultado dessa disputa leva ao aparecimento de um ponto de máximo em t_{Si} = 15 nm.

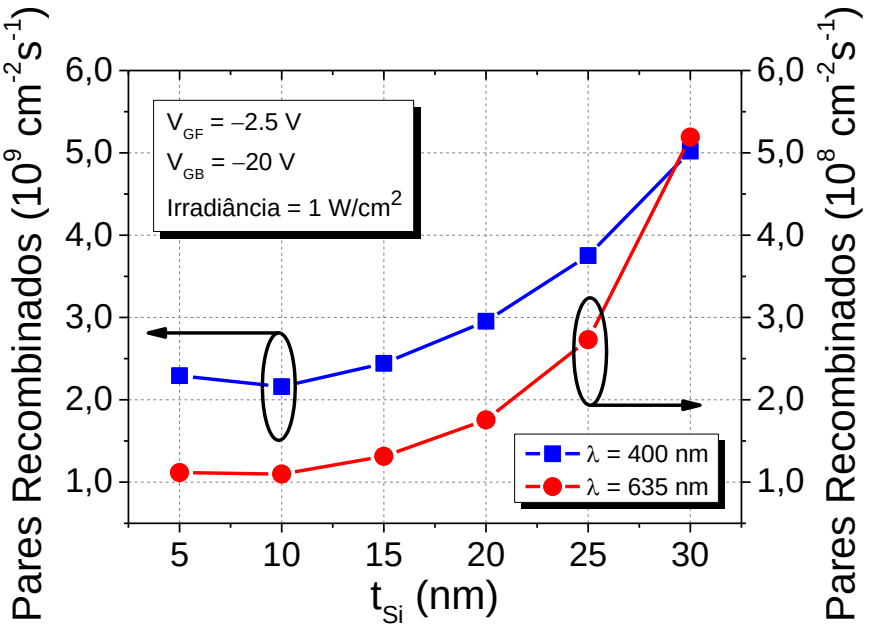


Figura 42 – Total de pares recombinados devido à recombinação ao longo do corte A-A'.
Fonte: Autor.

Para melhor entender os dois efeitos constatados anteriormente é necessário analisar a concentração de lacunas e elétrons ao longo do corte A-A', que são ilustradas na Figura 43 e Figura 45, respectivamente. Na região do corte será possível analisar o que ocorre com a corrente de dreno quando esta se divide entre as interfaces.

Como afirmado anteriormente, na região de subposição a corrente de dreno flui quase que exclusivamente pela segunda interface. No entanto, o campo elétrico da porta – caso a polarização $|V_{GF}|$ seja suficientemente alta – atrai as lacunas também para a primeira interface, formando, dentro do canal, uma corrente abaixo do óxido de porta. Como o corte A-A' é muito perto da borda do canal, a influência do campo elétrico de porta é grande, portanto é possível ver na Figura 43 uma alta concentração de lacunas em ambas as interfaces. Parte dessas lacunas contribuirão para a corrente de dreno em suas respectivas interfaces. Apesar disso, mais longe da porta, as lacunas na região de subposição estão concentradas quase que unicamente próximas do óxido enterrado, pois a influência do campo elétrico da segunda porta é muito forte em relação ao campo elétrico da porta. Desse modo, fica notório que para

formar a corrente na primeira interface, os portadores precisam viajar ao longo da espessura de silício para se concentrarem também abaixo do óxido de porta.

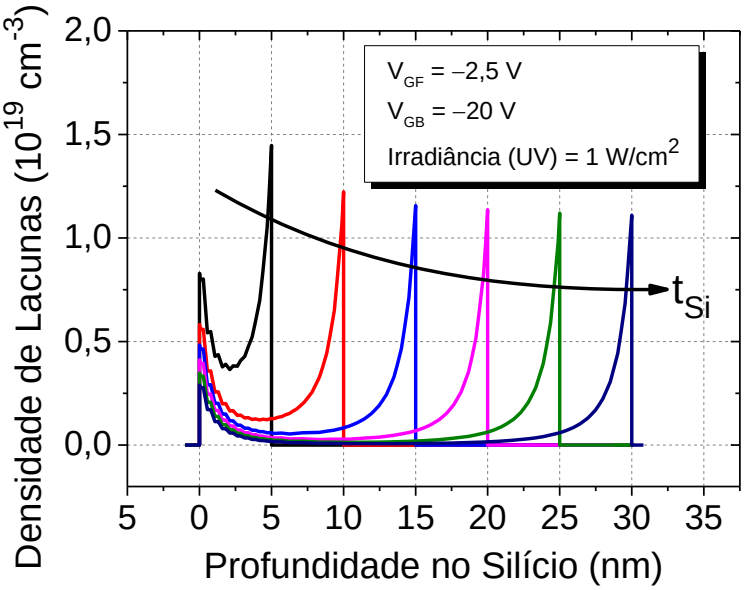


Figura 43 – Concentração de lacunas na extensão do corte A-A' em função da profundidade no canal para vários valores de t_{Si}.
Fonte: Autor.

Esse deslocamento de portadores majoritários entre interfaces é a causa para o aumento do número de pares recombinados apresentado anteriormente. O fenômeno de redução de ΔI_{DS} ocorre devido à presença de portadores minoritários (elétrons) ao longo da camada de silício, especialmente na região central e perto da primeira interface, como mostra a Figura 45. Esses portadores são naturais do material, no entanto a geração óptica aumenta sua concentração. Além disso, os elétrons ficam confinados na camada de silício devido ao isolante enterrado e às polarizações de primeira e segunda portas, que os repelem.

Quando as lacunas percorrem o caminho vertical entre as interfaces, há a possibilidade que esses portadores recombinem com os elétrons espalhados pela camada de silício. Se o silício for fino o suficiente ($t_{Si} \leq 15$ nm), a distância percorrida é menor e é mais fácil para o portador majoritário percorrer o caminho sem se recombinar. Somado a isso, o acoplamento eletrostático é melhor nesse caso. Também ajuda a prevenir a recombinação o fato de que, como a geração óptica é menor neste caso, há menos elétrons ao longo da camada de silício, reduzindo a chance de dois portadores opostos se encontrarem.

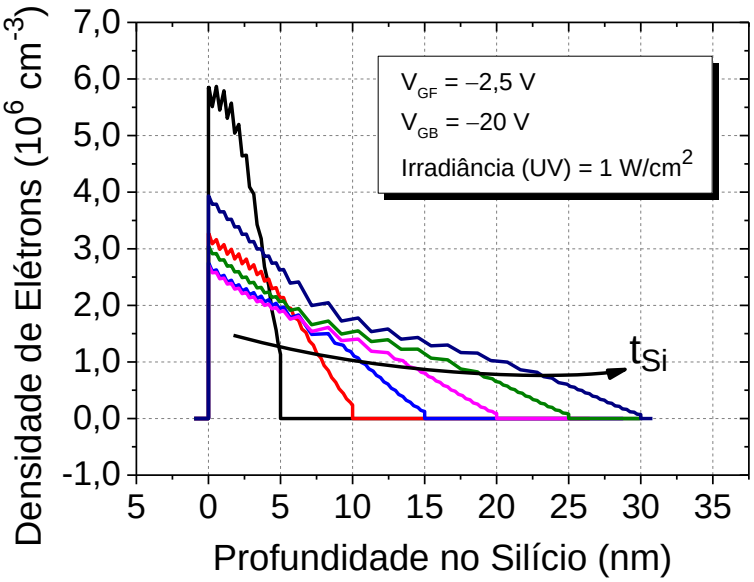


Figura 45 – Concentração de elétrons na extensão do corte A-A' em função da profundidade no canal para vários valores de t_{Si}.
Fonte: Autor.

Quando se aumenta a espessura t_{Si}, a distância entre interfaces é maior, logo as lacunas ficam mais suscetíveis a recombinar com um elétron enquanto se deslocam para a primeira interface. Este fato juntamente com o maior número de pares gerados opticamente e, em consequência, o aumento do número de elétrons ao longo da camada de silício leva a uma maior taxa recombinação, como é mostrado

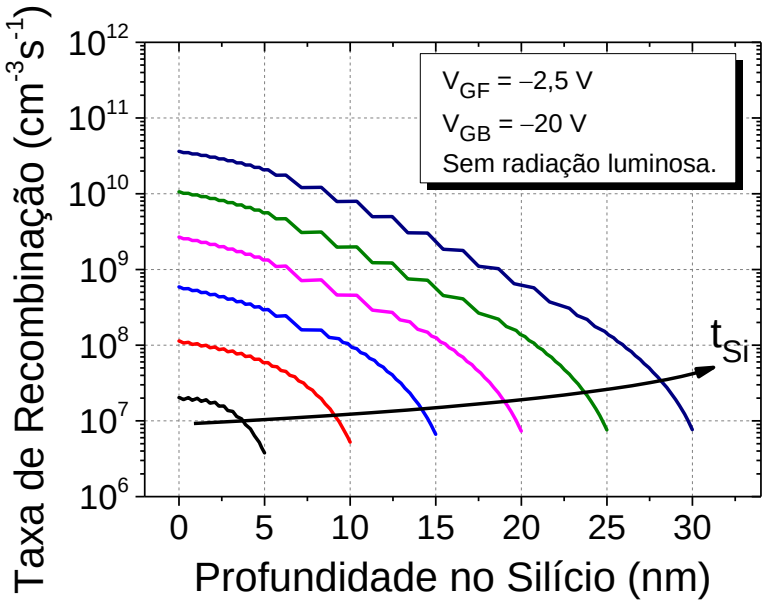


Figura 44 – Taxa de recombinação sem luz incidente na extensão do corte A-A' em função da profundidade no canal para vários valores de t_{Si}.
Fonte: Autor.

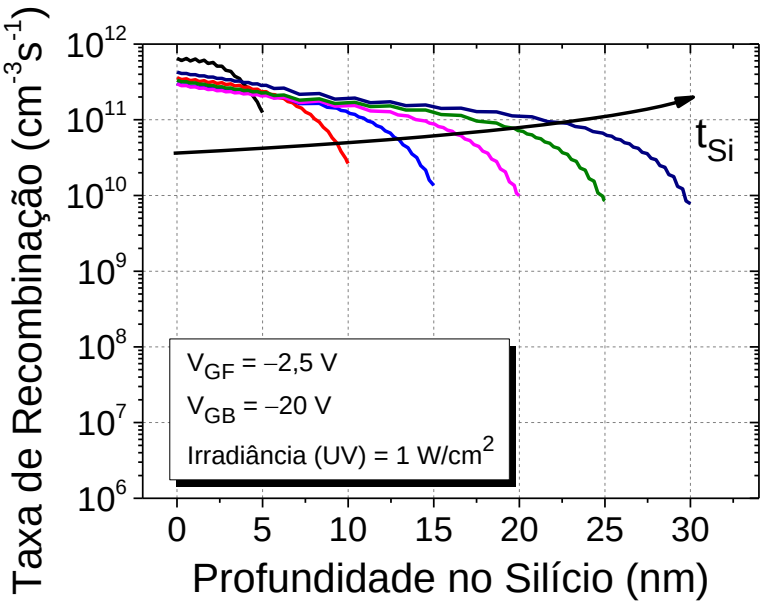


Figura 47 – Taxa de recombinação com luz incidente na extensão do corte A-A' em função da profundidade no canal para vários valores de tSi.
Fonte: Autor.

na Figura 44 e Figura 47 para os casos com e sem luz, respectivamente. Portanto, uma parte dos portadores que contribuem para o aumento da corrente de dreno são recombinados e, por consequência, ΔI_{DS} é reduzido.

A Figura 46 ilustra esses efeitos apresentados anteriormente. No esquemático é possível ver a divisão de correntes entre as interfaces e as diferentes concentrações de portadores ao longo da camada de silício na região entre canal e subposição.

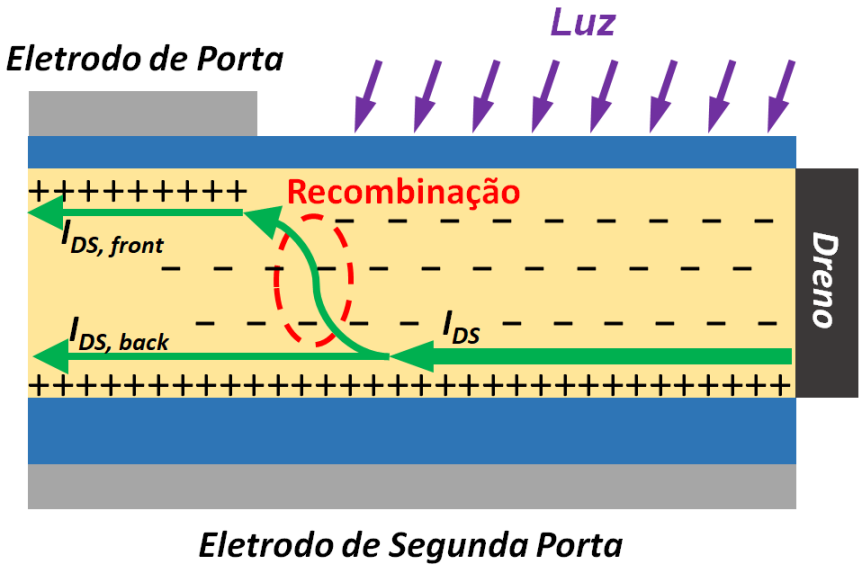


Figura 46 – Desenho esquemático da borda do canal do dispositivo BESOI. A separação da corrente de dreno entre as interfaces é ilustrada pelas setas.
Fonte: Autor.

4.2 DOPAGEM DO CANAL

Na seção 3.2 foi observado que a dopagem do canal no ^{BE}SOI MOSFET protagoniza sua sensibilidade à radiação luminosa. Uma variação de corrente de dreno com a luz só é observável quando o portador que forma o canal condutivo na segunda interface é do mesmo tipo que a dopagem, isto é, operação tipo-n ($V_{GB} >> 0$) e dopagem com fósforo ou operação tipo-p ($V_{GB} << 0$) e dopagem com boro. Para estudar esta influência, foram simuladas várias estruturas com dopagens de diferentes concentrações ora usando boro ora fósforo como o elemento dopante. Na Figura 48 são mostradas as variações de corrente resultantes da iluminação nas curvas I_{DS} *versus* V_{GF} simuladas no ponto de polarização $V_{GB} = -2{,}5$ V para operação tipo-p e $V_{GB} = -0{,}5$ V para operação tipo-n, ambas na região C. O lado direito é referente aos dispositivos dopados com boro e o esquerdo os com fósforo. Para o dispositivo tipo-p foram usadas polarizações $V_{GB} = -20$ V e $V_{DS} = -100$ mV enquanto para o transistor tipo-n $V_{GB} = 20$ V e $V_{DS} = 1{,}0$ V.

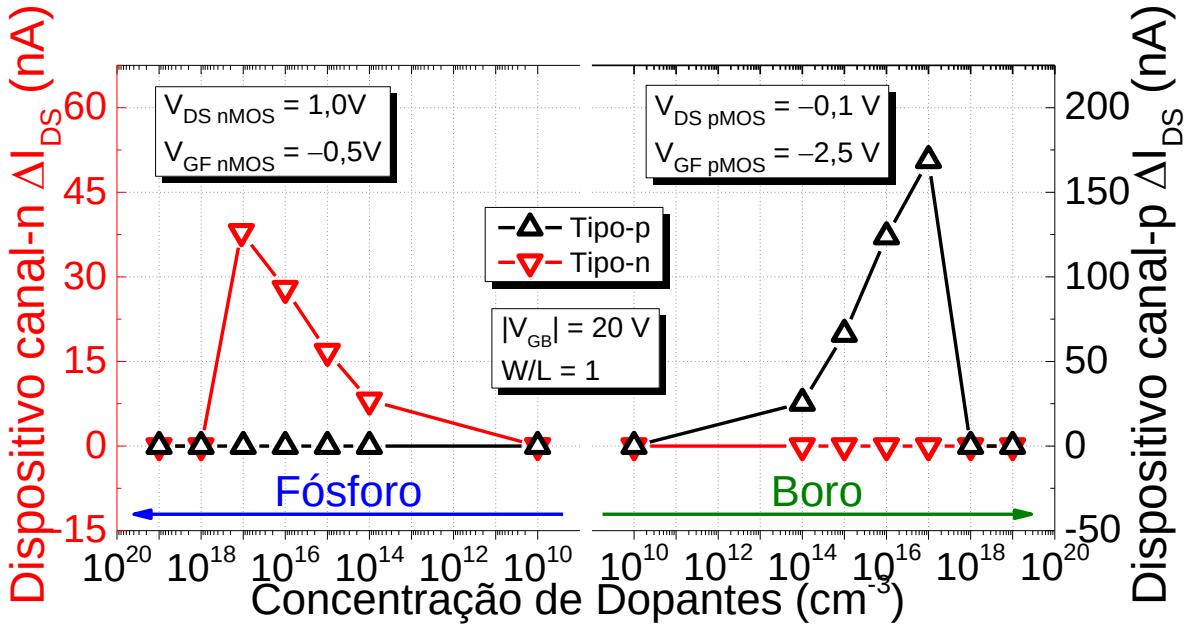


Figura 48 – Variações ΔI_{DS} extraídas das curvas simuladas para canais dopados tanto com boro quando fósforo em várias concentrações.
Fonte: Autor.

Nota-se a mesma tendência observada anteriormente, os dispositivos pMOS são sensíveis apenas quando a dopagem é tipo-p e, analogamente, os dispositivos nMOS só apresentam variação de I_{DS} relevante quando a dopagem é tipo-n. Também é observado que a sensibilidade do ^{BE}SOI conforme aumenta-se a concentração de

dopantes até valores da ordem de 10^{17} cm^{-3}, além disso o dispositivo torna-se praticamente insensível.

Esta tendência é relacionada à camada de acumulação na segunda interface. De fato, conforme mostra o experimento, obtém-se apenas uma sensibilidade relevante quando a segunda interface está em acumulação, o que é verdade tanto para canais dopados em boro quanto em fósforo. As simulações mostram que uma maior concentração de dopantes resulta em uma camada de acumulação com maior concentração de portadores, aumentando ΔI_{DS} até um limite próximo a 10^{17} cm^{-3}. Depois desse ponto, o total de cargas ópticas geradas é baixo em comparação com a quantidade de portadores presentes na camada de silício e, portanto, tem menor influência quando comparado com a corrente de dreno total. Por exemplo, para o dispositivo operando como tipo-p com canal dopado com boro, dentro das regiões de subposição a densidade de lacunas na segunda interface é maior que 10^{19} cm^{-3} para as dopagens de 10^{18} e 10^{19} cm^{-3}. Em contrapartida, a geração óptica produz um incremento na concentração de lacunas na segunda interface de 10^{17} cm^{-3} no máximo. Esse nível muito abaixo de portadores gerados opticamente em comparação com a concentração na camada condutiva torna a variação de corrente devido à incidência de luz insignificante.

Além disso, para canais com alta concentração de dopantes, a tensão de porta não cria uma região de depleção forte o suficiente para desligar o dispositivo e, por conseguinte, a corrente em *off state* aumenta drasticamente. O gráfico na Figura 49 mostra as curvas de transferências simuladas de dispositivos ^{BE}SOI tipo-p com canal dopado com boro em diversas concentrações. Para os casos com níveis de 10^{10} a 10^{17} cm^{-3} há uma corrente de estado desligado muito baixa. Já para altas concentrações, i.e., 10^{18} a 10^{19} cm^{-3}, a corrente de dreno aumenta várias ordens de grandeza na região desligada.

Vale notar que, com altas concentrações de dopantes, a estrutura do ^{BE}SOI se assemelha ao dispositivo *junctionless* da seção 2.4.5, com a diferença de que o ^{BE}SOI não é construído em nanofios de silício (DAS et al., 2016). Conjectura-se, portanto, que é possível obter detecção de luz em canais dopados com concentrações de 10^{18} e 10^{19} cm^{-3}. No entanto, seria necessário alterar a polarização de porta a fim de induzir uma depleção completa no canal. Também seria necessário trocar o material de porta para algum que permita a passagem de luz, uma vez que o alumínio reflete toda radiação luminosa e impede a absorção pelo canal.

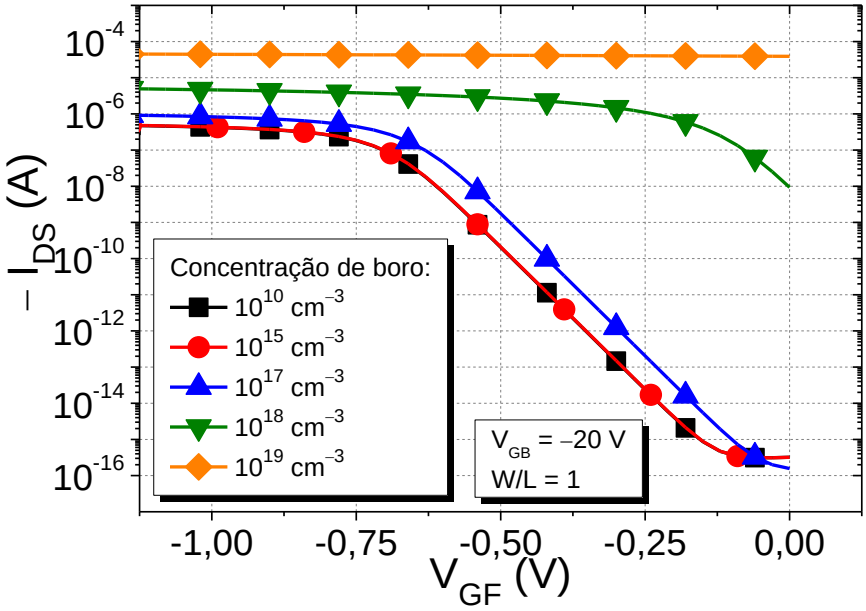


Figura 49 – Curvas simuladas da corrente de dreno em função da tensão de porta para dispositivos ^{BE}SOI pMOSFET com canal dopado com boro em várias concentrações.
Fonte: Autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados e análises apresentados neste trabalho, observou-se algumas características relativas à sensibilidade dos dispositivos ^{BE}SOI MOSFETs à radiação luminosa. Uma delas é a grande dependência das impurezas do substrato para que a geração óptica cause uma variação considerável na corrente de dreno. Observou-se que para obter dispositivos sensíveis é necessário formar a camada de portadores na segunda interface com portadores majoritários (mesmo tipo da dopagem do substrato), i.e., transistor canal-p ($V_{GB} < 0$) em substrato de silício dopado com boro e canal-n ($V_{GB} > 0$) em substrato de silício dopado com fósforo.

Outra característica referente à sensibilidade é que há uma faixa de operação específica para se observar o efeito da variação da corrente de dreno devido a geração óptica, como mostrado tanto pelos experimentos quanto pelas simulações. A referente polarização se caracteriza por uma tensão de porta suficientemente alta a ponto de induzir portadores majoritários na primeira interface (chamada de região C). Os experimentos mostraram uma variação da corrente de 34 nA e responsividade 8,9 mA/W nessa polarização (transistor tipo-p, $V_{GF} = -2{,}5$ V) para a radiação 400 nm. Fora dessa região a sensibilidade dos dispositivos ^{BE}SOI é reduzida – os valores de ΔI_{DS} medidos foram menores que 15 nA nos experimentos (região B, $V_{GF} \geq -1{,}0$ V). As simulações numéricas realizadas apresentaram a mesma tendência e a análise por cortes mostrou que as cargas geradas na primeira interface são cruciais para transportar os portadores gerados opticamente, o que resulta num maior valor de ΔI_{DS}.

Também foram comparadas excitações luminosas de diferentes comprimentos de onda e constatou-se que o ^{BE}SOI é mais sensível no espectro UV-A, próximo dos 400 nm. Experimentalmente foi medida a variação da corrente de dreno da luz vermelha, próxima de 635 nm, e nas simulações a mesma medida foi estendida também para as luzes verde (535 nm), amarela (580 nm) e vermelha (700 nm). Esses resultados, tanto experimentais quanto simulados, concordam entre si e seguem as tendências de absorção do silício, portanto estão dentro das expectativas. Mesmo que haja alguma diferença entre os valores de ΔI_{DS} obtidos a partir de diferentes comprimentos de onda, esta variação se mostrou razoavelmente sutil tanto nos experimentos quanto simulações conduzidas, não deixando o ^{BE}SOI insensível à algum comprimento de onda específico dentro do espectro visível.

Por serem construídos em camadas de silício finas, o desempenho do ^{BE}SOI foi comparado com fototransistores *junctionless*. Apesar de usarem diferentes métodos de detecção de luz, a comparação é válida para situar o ^{BE}SOI entre fotodetetores estudados na literatura que usam camadas de silício finas e, portanto, tem absorção de luz reduzida. A responsividade do ^{BE}SOI fabricado é baixa (8,9 mA/W) em comparação ao fototransistor *junctionless* construído por Das et al. (2016) (180 mA/W). No entanto, as simulações do ^{BE}SOI apresentaram valores de responsividade semelhantes ao fototransistor *junctionless* simulado por Roudsari et al. (2014), sendo obtidos valores de 165 A/W e de 210 A/W, respectivamente.

Posteriormente foi apresentada uma comparação entre o ^{BE}SOI com o ICPD, um novo dispositivo fotodetetor baseado no efeito de acoplamento de interfaces que compartilha com o ^{BE}SOI várias semelhanças em sua estrutura. Ambos contam com canal pouco dopado, uso de tecnologia SOI, condução pela segunda interface e presença de extensões de fonte e dreno (*underlaps*) usadas como elementos sensores de luz. Foi mostrado que é possível detectar luz com o ^{BE}SOI usando o efeito de acoplamento de interfaces mesmo com uma camada de silício extremamente fina, apenas 23 nm (^{BE}SOI primeira geração). No entanto, esse efeito só é relevante quando a área do dispositivo é pequena, sendo observado apenas para o transistor L = W = 10 µm.

Finalmente foi realizado um trabalho para otimizar a sensibilidade do ^{BE}SOI alterando a estrutura do dispositivo por meio de simulações. Primeiro, aumentou-se a espessura da camada de silício, que originalmente era de 10 nm. Esperava-se que um maior volume do material formando o canal aumentaria ΔI_{DS}, porém foi demonstrado que há um ponto de melhor sensibilidade próximo a t_{Si} = 15 nm devido à presença de dois efeitos concorrentes. O primeiro, que tende a aumentar ΔI_{DS} devido à maior geração óptica que ocorre num maior volume de silício e o segundo, que tende a reduzir ΔI_{DS}, decorrente da maior probabilidade das cargas majoritárias recombinarem ao formar a corrente na primeira interface. Também foi estudada a influência da dopagem de canal sobre a sensibilidade. Estruturas com o canal dopado ora com boro ora com fósforo para concentrações variando entre 10^{10} e 10^{19} cm^{-3} foram simuladas. Das curvas I_{DS} *versus* V_{GF} extraídas observou-se que a melhor sensibilidade ocorre para uma concentração de dopantes de 10^{17} cm^{-3}, sendo boro o elemento dopante para o dispositivo canal-p e fósforo para o dispositivo canal-n.

Por fim, os ^{BE}SOI MOSFETs estudados apresentaram boa sensibilidade à radiação luminosa dentro do espectro visível. Conclui-se que esses novos dispositivos podem ser candidatos a um sensor de luz integrado a tecnologias SOI convencionais.

5.1 SUGESTÕES DE SEQUÊNCIA DO TRABALHO

Para a continuação do trabalho são feitas algumas sugestões. Primeiramente, é interessante aprofundar o estudo sobre a insensibilidade do ^{BE}SOI MOSFET à radiação luminosa quando a segunda interface está em inversão – operação tipo-n com dopagem do canal tipo-p ou operação tipo-p com dopagem do canal tipo-n. Simulações numéricas adicionais podem melhorar o entendimento dos mecanismos internos do dispositivo que promovem esse efeito.

Também é proveitoso investigar o uso do método de detecção de luz por variação da tensão de limiar. A versatilidade que as simulações numéricas proporcionam serão úteis para verificar a relação entre área do dispositivo e o efeito de acoplamento entre interfaces, como observado experimentalmente na seção 3.4.

Por fim, é interessante para a aplicação do ^{BE}SOI como sensor de luz um projeto de estrutura mais adequada para tal fim, uma vez que neste trabalho foi estudado um dispositivo que não foi idealizado inicialmente como fotodetetor. Propõe-se que trabalhos futuros continuem os esforços de otimização do dispositivo previamente apresentados e consigam obter uma estrutura que melhore a sensibilidade à radiação luminosa do ^{BE}SOI MOSFET.

REFERÊNCIAS

ASPNES, D. E.; STUDNA, A. A. Dielectric Functions and Optical Parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV. **Physical Review B**, College Park, Maryland, v. 27, n. 2, p. 985-1009, 1983.

CHIARELLA, T. et al. Benchmarking SOI and Bulk FinFET alternatives for planar CMOS scaling succession. **Solid-State Electronics**, Oxford, v. 54, n. 9, p. 855-860, 2010.

COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. **Physics of Semiconductor Devices**. Boston, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2002.

COLINGE, J. P. **Silicon-On-Insulator Technology**: Materials to VLSI. Boston, Massachusetts: Springer US, 2004.

COLINGE, J. P. SOI Gated Resistor: CMOS without Junctions. In: IEEE International SOI Conference, 2009, Foster City, CA. **Proceedings**… Foster City: IEEE, 2009. p. 1-2.

COLINGE, J. P. et al. Junctionless Nanowire Transistor (JNT): Properties and design guidelines. **Solid-State Electronics**, Oxford, v. 65-66, p. 33-37, 2011.

DAS, S.; DHYANI, V.; GEORGIEV, Y. M.; WILLIAMS, D. A. High sensitivity silicon nanowire junctionless phototransistor. **Applied Physics Letters**, Melville, NY, v. 108, n. 6, p. 1-5, 2016.

DENG, J. N. et al. A novel photodetector based on the interface coupling effect in silicon-on-insulator MOSFETs. In: IEEE SOI-3D-SUBTHRESHOLD MICROELECTRONICS TECHNOLOGY UNIFIED CONFERENCE (S3S), 2017, Burlingame, CA. **Proceedings**… Burlingame: IEEE, 2017. p. 1-3.

GAO, L.; LEMARCHAND, F.; LEQUIME, M. Refractive index determination of SiO2 layer in the UV/Vis/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and

bi-layer designs. **Journal of the European Optical Society - Rapid publications**, Hannover, v. 8, jan. 2013.

HECHT, E. **Optics**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 2002.

HEINZIG, A.; SLESAZECK, S.; KREUPL, F.; MIKOLAJICK, T.; WEBER, W. M. Reconfigurable Silicon Nanowire Transistors. **Nano letters**, Washington, DC, v. 12, p. 119-124, 2012.

IONESCU, M.; RIEL, H. Tunnel field-effect-transistors as energy efficient electronic switches. **Nature**, London, v. 479, p. 329-337, 2011.

IWAI, H. Future of Nano CMOS Technology. **Solid-State Electronics**, Oxford, v. 112, p. 56-67, 2015.

JUDD, D. B. Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight. In: SESSION OF THE CIE, 12., 1951, Stockholm. **Proceedings**…, Paris: Bureau Central de la CIE, 1951. v. 1, p. 11.

LE PAILLEUR, L. Fully-Depleted-Silicon-On-Insulator from R&D concept to industrial reality. In: IEEE SOI-3D-SUBTHRESHOLD MICROELECTRONICS TECHNOLOGY UNIFIED CONFERENCE (S3S), 2013, Monterey. **Proceedings**… Monterey: IEEE, 2013. p. 1-2.

LESCHHORN, G. YOUNG, R. **Handbook of LED and SSL Metrology**. Munich: Instruments Systems GmbH, 2017.

LIM, H. K.; FOSSUM, J. G. Threshold voltage of thin-film Silicon-on-insulator (SOI) MOSFET's. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 30, n. 10, p. 1244-1251, 1983.

MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. I. **Caracterização elétrica de tecnologia e dispositivos MOS**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

MOORE, G. E. Cramming more components onto integrated circuits. **Electronics**, v. 38, n. 8, p. 114, 1965.

OHTA, J. **Smart CMOS image sensors and applications**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008

OKAMOTO, K. **Fundamentals of Optical Waveguides**. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2006.

RANGEL, R. C.; MARTINO, J. A. Back Enhanced (BE) SOI pMOSFET. In: SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES (SBMICRO), 30., 2015, Salvador. **Proceedings**… Salvador: IEEE, 2015. p. 1-4.

ROUDSARI, A. F.; SAINI, S. S.; O, N.; ANANTRAM, M. P. Junction-less fototransistor with nanowire channels, a modeling study. **Optics Express**, Washington, DC, v. 22, n. 10, p. 12573-12582, 2014.

SIMON, M.; HEINZIG, A.; TROMMER, J.; BALDAUF, T.; MIKOLAJICK, T.; WEBER, W. M. Bringing reconfigurable nanowire FETs to a logic circuits compatible process platform. In: IEEE NANOTECHNOLOGY MATERIALS AND DEVICES CONFERENCE (NMDC), 2016, Toulouse. **Proceedings**… Tolouse: IEEE, 2016. p. 1-3.

SYNOPSYS, INC. **Sentaurus™ Device User Guide**. Version L-2016.03. Mountain View, CA: Synopsys, Inc., 2016.

SZE, S. M. **Physics of Semiconductor Devices**. 2nd ed. New York, NY: Wiley, 1981.

TROMMER, J.; HEINZIG, A.; SLESAZECK, S.; MIKOLAKICK, T.; WEBER, W. M. Elementary Aspects for Circuit Implementation of Reconfigurable Nanowire Transistors. **IEEE Electron Device Letters**, v. 35, n. 1, p.141-143, 2014.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica. João Antonio Martino; Ricardo Cardoso Rangel. **Transistor com formação de fonte e dreno induzida por efeito de campo elétrico e seu método de fabricação**. BR 10 2015 020974 6, Depósito:

28 ago. 2015. Disponível em: <https://gru.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=1345735>. Acesso em 2 fev. 2018.

WAN, J. et al. Novel photodetector based on FD-SOI substrate with interface coupling effect. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON JUNCTION TECHNOLOGY (IWJT), 18., 2018, Shanghai. **Proceedings**… Shanghai: IEEE, 2018. p. 1-4.

WESSELY, F.; KRAUSS, T.; SCHWALKE, U. Reconfigurable CMOS with undoped silicon nanowire midgap Schottky-barrier FETs. **Microelectronics Journal**, v. 44, n. 12, p. 1072-1076, 2013.

YOJO, L. S.; RANGEL, R. C.; SASAKI, K. R. A.; MARTINO, J. A. Back Enhanced (BE) SOI MOSFET under non-conventional bias conditions. In: JOINT INTERNATIONAL EUROSOI WORKSHOP AND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ULTIMATE INTEGRATION ON SILICON (EUROSOI-ULIS), 2017, Athens. **Proceedings**... Athens: IEEE, 2017. p. 204-207.

_____. Reconfigurable back enhanced (BE) SOI MOSFET used to build a logic inverter. In: SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES (SBMICRO), 32., 2017, Fortaleza. **Proceedings**… Fortaleza: IEEE, 2018. p. 1-4.

_____. Influence of biological element permittivity on BE (Back Enhanced) SOI MOSFETs. In: SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES (SBMICRO), 33., 2018, Bento Gonçalves. **Proceedings**… Bento Gonçalves: IEEE, 2018. p. 1-4.

_____. Optimization of the permittivity-based BE SOI biosensor. In: IEEE SOI-3D-SUBTHRESHOLD MICROELECTRONICS TECHNOLOGY UNIFIED CONFERENCE (S3S), 2018, Burlingame, CA. **Proceedings**… Burlingame: IEEE, 2018. p. 1-3.

YOJO, L. S. **Estudo, caracterização elétrica e modelagem de transistors BE (back enhanced) SOI MOSFET**. 2018. 99 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

APÊNDICE A – CÁLCULO DA IRRADIÂNCIA

Cálculo da irradiância do arranjo experimental:

Das fichas técnicas nos LEDs:

Parâmetro	LED UV	LED Vermelho
Comprimento de onda (λ)	400 nm	635 nm
Intensidade luminosa (I_v)	180 mcd	200 mcd
Ângulo de visão 50% (θ)	60°	60°

Do arranjo experimental descrito, a distância entre LEDs e lâmina com o dispositivo ^{BE}SOI é d = 2,5 cm.

Considerando cada LED como fontes de luz puntiformes, podemos calcular o ângulo sólido da área iluminada (LESCHHORN; YOUNG, 2017):

$$\Omega = 2\pi\left(1 - \cos\frac{\theta}{2}\right) = 0{,}842 \tag{46}$$

E a área iluminada de cada LED como:

$$r = d.\tan\frac{\theta}{2} = 1{,}443 \quad [cm] \tag{47}$$

$$A = \pi r^2 = 6{,}545 \quad [cm^2] \tag{48}$$

Finalmente, pode-se converter a intensidade luminosa dos 16 LEDs usados no arranjo para a irradiância total usando a equação (49). Foi considerado que o dispositivo foi posicionado numa intersecção entre todas as 16 áreas de iluminação.

$$E_e = 16\frac{1}{\bar{y}(\lambda)} I_v \frac{A}{\Omega} \tag{49}$$

O valor de $\bar{y}$ para a luz 400 nm vale 1,91 lm/W e para a luz 635 nm vale 150,26 lm/W. Portanto, a irradiância total para cada comprimento de onda é:

E_e (400 nm) = 0,19 W/cm^2

E_e (635 nm) = 2,74 mW/cm^2

APÊNDICE B – CÁLCULO DA RESPONSIVIDADE

O cálculo da responsividade é feito com base na equação (31):

$$R = \frac{I_{op}}{P_{op}} \qquad [A/W] \tag{50}$$

A potência incidente (P_{op}) depende da área iluminada, que no ^{BE}SOI é a soma das áreas das regiões de subposição. Nos dispositivos fabricados, o comprimento de cada região de subposição é fixo e vale 10 µm. Já a largura é igual à do canal do dispositivo. Portanto a área iluminada vale:

$$A = 2 \,.\, A_{sub} = 2\,(10.10^{-4} \,.\, W\,[cm]) = 2.10^{-3} \,.\, W \qquad [cm^2] \tag{51}$$

onde W é a largura do dispositivo em cm.

A potência recebida é calculada segunda a equação a seguir:

$$P_{op} = E_e(\lambda) \,.\, A = 2\,.10^{-3} \,.\, W \,.\, E_e(\lambda) \qquad [W] \tag{52}$$

onde E_e é a irradiância para determinado comprimento de onda em W/cm^2 (calculada no apêndice A).

A corrente óptica (I_{op}) é igual à variação da corrente de dreno ΔI_{DS}. Substituindo (52) em (50) obtemos:

$$R = \frac{1}{2\,.10^{-3}} \frac{\Delta I_{DS}}{W \,.\, E_e(\lambda)} \qquad [A/W] \tag{53}$$

portanto, para cada dispositivo estudado obtemos as seguintes responsividades em função do comprimento de onda:

L = W = 10 µm: $R(\lambda) = \frac{1}{2\,.10^{-6}} \frac{\Delta I_{DS}}{E_e(\lambda)}$

L = W = 100 µm: $R(\lambda) = \frac{1}{2\,.10^{-5}} \frac{\Delta I_{DS}}{E_e(\lambda)}$

O cálculo da responsividade no caso dos dispositivos simulados numericamente é ligeiramente distinto do caso com dispositivos reais. Como no TCAD Sentaurus é usado um modelo em duas dimensões, os parâmetros são normalizados para uma largura W = 1 µm. Assim, basta substituir esse valor no cálculo da área iluminada. O comprimento das regiões de subposição também é diferente do dispositivo fabricado. Nesse caso cada região tem comprimento de 0,1 µm. A área iluminada é então:

$$A = 2\,.\,A_{sub} = 2\left(0{,}1.10^{-4}\,.\;W\right) = 2\,.10^{-5}.W \qquad [\mathrm{cm}^2] \qquad (54)$$

Usando o mesmo método anterior e substituindo o valor da largura de canal, obtemos a responsividade para dispositivos simulados numericamente:

$$R = \frac{1}{2\,.10^{-5}}\frac{\Delta I_{DS}}{W\,.\,E_e(\lambda)} = \frac{1}{2\,.10^{-9}}\frac{\Delta I_{DS}}{E_e(\lambda)} \qquad [\mathrm{A/W}] \qquad (55)$$

APÊNDICE C – DISPOSITIVO GERADO NO SENTAURUS

Código da descrição do dispositivo ^{BE}SOI MOSFET.

```
;;********
;;PARAMETROS
;;********

(define L 1.000)
(define tox 0.01)
(define tSi @tSi@)
(define tbox 0.200)
(define LRS 0.100)


;;********
;;REGIOES
;;********

(define posx_canal_dir (+ (/ L 2.0) LRS))
(define posx_canal_esq (- (/ (* L -1.0) 2.0) LRS))

(sdegeo:create-rectangle (position posx_canal_esq 0.0 0.0 ) (position
posx_canal_dir tSi 0.0 ) "Silicon" "region_canal" )
(sdegeo:create-rectangle (position posx_canal_esq (* tox -1.0) 0.0 )
(position posx_canal_dir 0.0 0.0 ) "Oxide" "region_oxidoporta" )
(sdegeo:create-rectangle (position (/ (* L -1.0) 2.0) (* (+ tox 0.05) -
1.0) 0.0 ) (position (/ L 2.0) (* tox -1.0) 0.0 ) "Aluminum"
"region_metalporta" )
(sdegeo:create-rectangle (position posx_canal_esq tSi 0.0 ) (position
posx_canal_dir (+ tSi tbox) 0.0 ) "Oxide" "region_oxidoenterrado" )
(sdegeo:create-rectangle (position posx_canal_esq (+ tSi tbox) 0.0 )
(position posx_canal_dir 1.0 0.0 ) "Silicon" "region_substrato" )


;;********
;;CONTATOS
;;********

(sdegeo:define-contact-set "Contato_fonte" 4  (color:rgb 1 0 0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Contato_fonte")
(sdegeo:define-2d-contact (list (car (find-edge-id (position (- (/ (* L -
1.0) 2.0) LRS) (/ tSi 2) 0.0)))) "Contato_fonte")
(sdegeo:define-contact-set "Contato_dreno" 4  (color:rgb 1 0 0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Contato_dreno")
(sdegeo:define-2d-contact (list (car (find-edge-id (position (+ (/ L 2.0)
LRS) (/ tSi 2) 0.0)))) "Contato_dreno")
(sdegeo:define-contact-set "Contato_porta" 4  (color:rgb 1 0 0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Contato_porta")
(sdegeo:define-2d-contact (list (car (find-edge-id (position 0.0 (* tox -
1.0) 0)))) "Contato_porta")
(sdegeo:define-contact-set "Contato_substrato" 4  (color:rgb 1 0 0 ) "##"
)
(sdegeo:set-current-contact-set "Contato_substrato")
(sdegeo:define-2d-contact (list (car (find-edge-id (position 0.0 1 0))))
"Contato_substrato")
```

```
;;********
;;DOPAGEM
;;********

(sdedr:define-constant-profile "ConstantProfileDefinition_Silicio"
"BoronActiveConcentration" 1e+15)
(sdedr:define-constant-profile-region "ConstantProfilePlacement_Canal"
"ConstantProfileDefinition_Silicio" "region_canal")
(sdedr:define-constant-profile "ConstantProfileDefinition_Substrato"
"BoronActiveConcentration" 1e+15)
(sdedr:define-constant-profile-region
"ConstantProfilePlacement_Substrato"
"ConstantProfileDefinition_Substrato" "region_substrato")


;;********
;;REFERENCIA
;;********

;interface canal oxido porta
(define interf_oxporta_sup -0.002)
(define interf_oxporta_inf 0.005)
(sdedr:define-refeval-window "RefEvalWin_canal_oxporta" "Rectangle"
(position posx_canal_esq interf_oxporta_sup 0) (position posx_canal_dir
interf_oxporta_inf 0))

;interface canal oxido enterrado
(define interf_box_sup (- tSi 0.005))
(define interf_box_inf (+ tSi 0.002))
(sdedr:define-refeval-window "RefEvalWin_canal_box" "Rectangle" (position
posx_canal_esq interf_box_sup 0) (position posx_canal_dir interf_box_inf
0))

;interface fonte canal
(define interf_fonte_min (- posx_canal_esq 0.040))
(define interf_fonte_max (+ posx_canal_esq 0.040))
(sdedr:define-refeval-window "RefEvalWin_canal_fonte" "Rectangle"
(position interf_fonte_min 0 0) (position interf_fonte_max tSi 0))

;interface dreno
(define interf_dreno_max (+ posx_canal_dir 0.040))
(define interf_dreno_min (- posx_canal_dir 0.040))
(sdedr:define-refeval-window "RefEvalWin_canal_dreno" "Rectangle"
(position interf_dreno_min 0 0) (position interf_dreno_max tSi 0))

;interface oxido enterrado substrato
(sdedr:define-refeval-window "RefEvalWin_box_subs" "Rectangle" (position
posx_canal_esq (- (+ tSi tbox) 0.01) 0) (position posx_canal_dir (+ (+
tSi tbox) 0.01) 0))


;;********
;;GRADE
;;********

(sdedr:define-refinement-size "RefinementDefinition_canal" 0.02 0.004 0
0.007 0.004 0 )
(sdedr:define-refinement-region "RefinementPlacement_canal"
"RefinementDefinition_canal" "region_canal" )
(sdedr:define-refinement-size "RefinementDefinition_interf" 0.01 0.001 0
0.01 0.001 0 )
```

```
(sedr:define-refinement-placement "RefinementPlacement_interf1"
"RefinementDefinition_interf" "RefEvalWin_canal_oxporta" )
(sedr:define-refinement-placement "RefinementPlacement_interf2"
"RefinementDefinition_interf" "RefEvalWin_canal_box" )
(sedr:define-refinement-size "RefinementDefinition_interf_fontdreno"
0.001 0.002 0 0.001 0.002 0 )
(sedr:define-refinement-placement "RefinementPlacement_interf3"
"RefinementDefinition_interf_fontdreno" "RefEvalWin_canal_fonte" )
(sedr:define-refinement-placement "RefinementPlacement_interf4"
"RefinementDefinition_interf_fontdreno" "RefEvalWin_canal_dreno" )
(sedr:define-refinement-size "RefinementDefinition_oxidoenterrado" 0.3
0.07 0 0.15 0.07 0 )
(sedr:define-refinement-region "RefinementPlacement_oxidoenterrado"
"RefinementDefinition_oxidoenterrado" "region_oxidoenterrado" )
(sedr:define-refinement-size "RefinementDefinition_substrato" 0.3 0.07 0
0.15 0.07 0 )
(sedr:define-refinement-region "RefinementPlacement_substrato"
"RefinementDefinition_substrato" "region_substrato" )
(sedr:define-refinement-size "RefinementDefinition_interf_box_subs" 0.03
0.01 0 0.01 0.01 0 )
(sedr:define-refinement-placement "RefinementPlacement_interf_box_subs"
"RefinementDefinition_interf_box_subs" "RefEvalWin_box_subs" )


;(sdeio:save-tdr-bnd (get-body-list) "besoi bnd.tdr")
;(sde:set-meshing-command "snmesh -a -c boxmethod")
;(sde:build-mesh "snmesh" "-a -c boxmethod" "besoi_msh")
(sde:build-mesh "-a -c boxmethod" "@tdr@")
;(sde:build-mesh "-a" "@tdr@")
```

APÊNDICE D – CÓDIGO DA SIMULAÇÃO NO SENTAURUS

Código da simulação de um dispositivo BESOI operando como canal-p, com a presença de radiação luminosa.

```
File {
    *input
    Grid="@tdr@"
    Parameter="@parameter@"
    Doping="@tdr@"

    *output

Plot="result_besoi_Ptype_uv_struc_n@node@_int@intensidade@_wl@lambda@_@td
rdat@"

Current="result_besoi_Ptype_uv_data_n@node@_int@intensidade@_wl@lambda@_@
plot@"

Output="result_besoi_Ptype_uv_log_n@node@_int@intensidade@_wl@lambda@_@lo
g@"

OpticsOutput="result_besoi_Ptype_uv_optics_log_n@node@_int@intensidade@_w
l@lambda@_@optlog@"
    #OpticalGenerationOutput="result_OptGen_OptBeam_int005_wl010"

}

Electrode {
    { Name="Contato_fonte" Voltage=0.000 Schottky workfunction=4.93}
    { Name="Contato_dreno" Voltage=-0.100 Schottky workfunction=4.93}
    { Name="Contato_porta" Voltage=-3.000 }
    { Name="Contato_substrato" Voltage=-20 }
}

Physics (RegionInterface="region_oxidoporta/region_canal"){
    Charge (Conc=2e12)
}

Physics (RegionInterface="region_canal/region_oxidoenterrado"){
    Charge (Conc=5e10)
}

Physics (Electrode = "Contato_fonte") { eRecVel(TempDep) eThermionic
                    hRecVel(TempDep) hThermionic }
Physics (Electrode = "Contato_dreno") { eRecVel(TempDep) eThermionic
                    hRecVel(TempDep) hThermionic }
Physics {
    Mobility(ConstantMobility)
    eBarrierTunneling "NLM_dreno"
    hBarrierTunneling "NLM_dreno"
    eBarrierTunneling "NLM_fonte"
    hBarrierTunneling "NLM_fonte"
    Recombination(SRH(DopingDep))
    EffectiveIntrinsicDensity(BandGapNarrowing (OldSlotboom))
    Temperature = 298
    # Geração optica
```

```
    Optics (
        OpticalGeneration (
            QuantumYield (
                StepFunction ( EffectiveBandgap )
                #Unity
            )
            ComputeFromMonochromaticSource()
        )
        Excitation(
            Wavelength = @lambda@
            Intensity = @intensidade@
            Theta = 0
            Window ("J1") (
                Origin = (-0.75, -2)
                OriginAnchor = Center # Default

                #Origin = (0, -2)
                #OriginAnchor = Center # Default

                #IntensityDistribution(
                #   Gaussian(
                #       Length = 0.5
                #       PeakPosition = 0
                #       PeakWidth = 0
                #       Scaling = 1
                #   )
                #)

                Line ( Dx = 0.5 )
            )

            Window ("J2") (
                Origin = (0.75, -2)
                OriginAnchor = Center # Default

                Line ( Dx = 0.5 )
            )
        )
        OpticalSolver (
            OptBeam (
                LayerStackExtraction(
                    WindowName = "J1"
                    Position = (-0.5, -2.0)
                    Mode = RegionWise
                )
                LayerStackExtraction(
                    WindowName = "J2"
                    Position = (0.5, -2.0)
                    Mode = RegionWise
                )
            )
        )
        ComplexRefractiveIndex(
            WavelengthDep ( imag real )
        )
    )
    # Fim da geração optica
}

Plot {
    eDensity hDensity eCurrent/vector hCurrent/vector Current/vector
```

```
    Potential SpaceCharge ElectricField/vector
    eMobility hMobility eVelocity hVelocity
    Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
    eBarrierTunneling hBarrierTunneling
    eNLLTunnelingPeltierHeat hNLLTunnelingPeltierHeat
    ConductionBandEnergy ValenceBandEnergy eQuasiFermiEnergy
hQuasiFermiEnergy
    OpticalIntensity
    OpticalGeneration
    ComplexRefractiveIndex
    SRHRecombination
}

Math {
    Extrapolate
    RelErrControl
    iterations=100
    Number_Of_Threads = maximum
    Nonlocal "NLM_dreno" (Electrode="Contato_dreno" Length=40e-7)
    Nonlocal "NLM_fonte" (Electrode="Contato_fonte" Length=40e-7)
}

Solve {
    #-initial solution:
    Optics
    Poisson
    Coupled { Poisson Electron Hole }
    #-ramp gate:
    #Quasistationary ( InitialStep= 0.010 Maxstep= 0.010 Minstep= 0.0005
    #Goal{ Name="Contato_porta" Voltage=0.0 } )
    #Para tsi = 20 nm:
    Quasistationary ( InitialStep= 0.005 Maxstep= 0.005 Minstep= 0.0005
    Goal{ Name="Contato_porta" Voltage=3.0 } )
    { Coupled { Poisson Electron Hole }
        #Plot ( FilePrefix = "result_pBESOI_uv_mono_n@node@" Time= ( 0;
0.16 ) NoOverwrite )
        Plot ( FilePrefix = "result_pBESOI_uv_mono_n@node@" Time= ( 0;
0.08 ) NoOverwrite )
    }
}
```

APÊNDICE E – PUBLICAÇÕES GERADAS

PADOVESE, J. A.; YOJO L. S.; RANGEL, R. C.; SASAKI, K. R. A.; MARTINO, J. A. Influence of UV Light on BE SOI pMOSFET. In: WORKSHOP ON SEMICONDUCTORS AND NANO TECHNOLOGY (SEMINATEC), 13., 2018, São Bernardo do Campo. **Proceedings**… São Bernardo do Campo: FEI, 2018. p. 3-4.

PADOVESE, J. A.; YOJO L. S.; RANGEL, R. C.; SASAKI, K. R. A.; MARTINO, J. A. Back Enhanced SOI MOSFET as UV Light Sensor. In: SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES (SBMICRO), 33., 2019, Bento Gonçalves. **Proceedings**… Bento Gonçalves: IEEE, 2018. p. 1-4.

PADOVESE, J. A.; YOJO L. S.; RANGEL, R. C.; SASAKI, K. R. A.; MARTINO, J. A. Optimization of the silicon thickness on Back Enhanced (BE) SOI MOSFET working as a visible spectrum light sensor. In: IEEE SOI-3D-SUBTHRESHOLD MICROELECTRONICS TECHNOLOGY UNIFIED CONFERENCE (S3S), 2018, Burlingame, CA. **Proceedings**… Burlingame: IEEE, 2018. p. 1-3.

PADOVESE, J. A.; RANGEL, R. C.; SASAKI, K. R. A.; MARTINO, J. A. Thin Si channel Back Enhanced (BE) SOI pMOSFET Photodetector under different bias conditions. In: JOINT INTERNATIONAL EUROSOI WORKSHOP AND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ULTIMATE INTEGRATION ON SILICON (EUROSOI-ULIS), 2019, Grenoble. **Proceedings**… Grenoble: IEEE, 2019. p. 1-4.

PADOVESE, J. A.; YOJO L. S.; RANGEL, R. C.; SASAKI, K. R. A.; MARTINO, J. A. Back Enhanced (BE) SOI pMOSFET Light Sensor. In: WORKSHOP ON SEMICONDUCTORS AND NANO TECHNOLOGY (SEMINATEC), 14., 2019, Campinas. **Proceedings**… Campinas: UNICAMP, 2019. p. 1-2.

PADOVESE, J. A.; YOJO L. S.; RANGEL, R. C.; SASAKI, K. R. A.; MARTINO, J. A. **Channel Doping Concentration Influence on ^{BE}SOI MOSFET Light Sensor**. In: SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES (SBMICRO), 34., 2019, São Paulo. **Proceedings**… São Paulo: IEEE, 2019. p. 1-4. In press.