

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

JOÃO BATISTA DA SILVA JÚNIOR

**ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA PROJETOS DE FOTOSSENSORES PIN CMOS
SOI NA FAIXA DE UV**

São Bernardo do Campo

2015

JOÃO BATISTA DA SILVA JÚNIOR

ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA PROJETOS DE FOTOSSENSORES PIN CMOS
SOI NA FAIXA DE UV

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro
Universitário da FEI visando à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica, orientado pelo Prof. Dr.
Renato Camargo Giacomini

São Bernardo do Campo

2015

Silva Júnior, João Batista da.

Abordagem experimental para projetos de fotossensores PIN CMOS
SOI na faixa de uv / João Batista da Silva Júnior. São Bernardo do
Campo, 2015.

105f.: il.

Dissertação – Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Renato C. Giacomini.

1. PIN. 2. Fotodiodo. 3. Fotocorrente. 4. Temperatura. 5. Polarização.
1. Giacomini, Renato C., oriente. II. Título.



CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica

Mestrado

PGE-10

Aluno: João Batista da Silva Júnior

Matrícula: 113117-6

Título do Trabalho: Abordagem experimental para projetos de fotossensores PIN CMOS SOI na faixa de UV.

Área de Concentração: Dispositivos Eletrônicos Integrados

Orientador: Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini

Data da realização da defesa: 22/09/2015

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini

Ass.: _____

Prof.^a Dr.^a Milene Galeti

Ass.: _____

Prof. Dr. John Paul Hempel Lima

Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribui ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO

REPROVADO

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA
EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, a minha família (Mãe, Pai, Irmão, Irmã e esposa) pelo amor, motivação, paciência e conselhos durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao senhor meu DEUS por ter me guiado em caminhos retos, ensinando os verdadeiros preceitos da vida.

Ao Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini, meu orientador, por acreditar no meu potencial, me dando uma nova oportunidade de expandir meus conhecimentos neste novo caminho de estudos que irei trilhar.

À amiga Carla Dick, quem em todo o trabalho foi uma consultora me direcionando para os obstáculos que apareciam, pela sua generosidade, troca de experiências e motivação para alcançar os objetivos.

À amiga Arianne Pereira, pela sua amizade de longa data, pela generosidade e ajuda em todos os momentos.

Aos amigos de pesquisa Cleiton Fidelix, Rafael Assalti, Genaro, Gabriel, Enrico, Ligia, Bruna e André Perin, pela troca de experiências, pelos debates científicos e pelas conversas nos momentos de descontração.

Aos professores Dr. Rodrigo Doria, Marcelo Antonio Pavanello, Dra. Michelly de Souza, Dra. Milene Galeti e Dr. Salvador Pinillos Gimenez, pelos conhecimentos e experiência transmitidos ao longo deste trabalho.

À minha mãe Cicera Gomes, ao meu pai João Batista, aos meus irmãos Antônio Jorge e Jacqueline Kevely, pela paciência, amor, companheirismo, conselhos, motivação e pelas condições que me deram oportunidade de ingressar no mundo corporativo.

À minha esposa Sarah Parschin, que esteve me ajudando em todos os momentos difíceis, pelo seu amor, companheirismo, compreensão e conselhos.

Aos amigos Bruno Nunes, Danilo Guimarães, Alex e Juliana, pela grande amizade de longa data, pelas orações, momentos de descontrações, amigos na fé e pelas grandes viagens realizadas.

Ao Centro Universitário da FEI, por oferecer toda infraestrutura necessária para alcançar os objetivos impostos neste trabalho.

Ao órgão de bolsas CAPES, pelo apoio financeiro indispensável para a realização deste trabalho.

As demais pessoas, colaboradores da FEI, colegas e amigos de trabalho, que me ajudaram e motivaram para realização deste trabalho

Sei bem o que é passar necessidades e sei o que é andar com fartura. Aprendi o mistério de viver feliz em todo lugar e em qualquer situação, esteja bem alimentado, ou mesmo com fome, possuindo fartura, ou possuindo privações. “Tudo posso naquele que me fortalece”.

Carta de Paulo ao Filipenses 4:12 ao 13

RESUMO

Este trabalho consiste em um estudo do comportamento dos fotodiodos PIN CMOS SOI submetidos a variações de temperatura e polarização de substrato, para os comprimentos intrínsecos $L_i=1\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$, aplicados à detecção de radiação UV. Algumas características importantes tais como responsividade, eficiência quântica, fotocorrente, corrente de escuro e relação sinal ruído são afetadas e devem ser avaliadas no projeto de fotodetectores. Através das medidas experimentais e simulações foi constatado que a corrente de escuro (I_{DARK}) possui dependência com o comprimento intrínseco, apresentando comportamentos distintos, dependendo do modo de operação. Outro parâmetro analisado foi a polarização de porta traseira (V_{BG}), que modifica a disponibilidade de portadores da região intrínseca, resultando na alteração dos modos de acumulação, depleção e inversão. Em acumulação, obtida pela polarização de substrato, a corrente diminui com o aumento de L_i , devido à presença da região de depleção lateral. Em inversão, esta corrente aumenta com L_i , pois existe uma inversão na região intrínseca, fazendo com que o perfil de dopantes se comporte como P+N-N+, resultando numa alta taxa de geração ao longo de L_i . Em inversão, a corrente devida à fotogeração aumenta com a temperatura, devido ao aumento do coeficiente de absorção (α_m) em altas temperaturas. Já na acumulação, a corrente fotogerada diminui com o aumento da temperatura, pois o comprimento de difusão (L_{dif}) se reduz com o aumento da concentração de portadores e há degradação da mobilidade e do tempo de vida. Para aplicações de fotodetecção na faixa do ultravioleta em altas temperaturas, foi constatado que a máxima eficiência quântica total alcançada foi de $QE_{\text{TOTAL}}=56,2\%$ para $L_i=1\mu\text{m}$ em modo inversão, em virtude do aumento do coeficiente de absorção ser mais pronunciado em altas temperaturas. No regime de acumulação foi encontrado $QE_{\text{TOTAL}}=21,7\%$ para $L_i=10\mu\text{m}$, bem abaixo quando comparado ao modo inversão, devido à redução do comprimento de difusão. Para a temperatura ambiente $QE_{\text{TOTAL}}=33\%$ para $L_i=5\mu\text{m}$ independente do modo de operação (acumulação/inversão). A relação sinal-ruído (SNR) é altamente influenciada pela temperatura, apresentando maiores valores de SNR para comprimentos intrínsecos pequenos ($L_i=1\mu\text{m}$) operando entre 300K e 400K, devido à baixa recombinação de portadores livres. Se a aplicação requer robustez às variações de temperatura, é recomendado que os comprimentos intrínsecos sejam grandes ($L_i=100\mu\text{m}$), pois a sensibilidade é menor, resultando numa degradação menos pronunciada quando comparado com fotodiodos de comprimentos pequenos.

Palavras chave: PIN, fotodiodo, fotocorrente, temperatura, polarização de porta traseira, comprimento intrínseco, taxa de geração/recombinação

ABSTRACT

This work is a study on the behavior of photodiodes PIN CMOS SOI subjected to temperature variations and substrate bias to some intrinsic lengths in UV detection. Some important features such as responsivity, quantum efficiency, photocurrent, dark current and relationship signal noise are affected, which should be evaluated in photodetectors project. Through the experimental measurements and simulations it was noted that the dark current (I_{DARK}) has dependence on the intrinsic length, with different behaviors, depending on the operating mode. Another parameter analyzed was the back gate bias (V_{BG}), which modifies the availability of carriers of the intrinsic region, resulting in the change of accumulation modes, depletion and inversion. In accumulation mode, obtained by the substrate bias, the current decreases with increasing L_i due to the presence of lateral depletion region. In inverse mode, this current increases with L_i , since there is a reversal in the intrinsic region, making the doping profile behaves as P+N-N+, resulting in a high generation rate along L_i . In inverse mode, due to photogeneration current increases with temperature due to the increased absorption coefficient (α_m) at high temperatures. In the accumulating photogenerated the current decreases with increasing temperature, since the diffusion length (L_{dif}) reduces with increasing carrier concentration, and no degradation of mobility and lifetime. In Photodetection applications in the ultraviolet band at high temperatures, it was found that the total maximum quantum efficiency reached was $QE_{\text{TOTAL}}=56,2\%$ for $L_i=1\mu\text{m}$ in reverse order, due to the increase of the absorption coefficient is more pronounced at high temperatures. In the regime of accumulation was found $QE_{\text{TOTAL}}=21,7\%$ for $L_i=10\mu\text{m}$ and below compared to the inversion mode, due to reduced diffusion length. To room temperature $QE_{\text{TOTAL}}=33\%$ for $L_i=5\mu\text{m}$ independent of the operation mode (accumulation/inversion). The signal to noise ratio (SNR) is highly influenced by temperature, with higher SNR values for small intrinsic lengths ($L_i=1\mu\text{m}$) operating between 300K and 400K, due to the low recombination of free carriers. If the application requires robustness to temperature variations, it is recommended that the intrinsic length are large ($L_i=100\mu\text{m}$) because the sensitivity is lower, resulting in less pronounced degradation compared to small photodiodes lengths.

Keywords: PIN, photodiode, photocurrent, temperature, back gate voltage, intrinsic length, generation/recombination rate

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Onda eletromagnética.....	25
Figura 2 – Representação do comprimento de onda (λ).....	26
Figura 3 – Espectro eletromagnético	27
Figura 4 – Espectro da radiação ultravioleta (UV).....	28
Figura 5 – A) Fóton absorvido; B) Fóton emitido.....	29
Figura 6 – Reflexão e refração de um feixe luminoso num dado meio.....	30
Figura 7 – Bandas de energia de um metal (A) e em um semicondutor (B)	32
Figura 8 – Bandas de energia no espaço real.....	33
Figura 9 – A) Semicondutor de banda direta; B) Semicondutor de banda indireta.....	34
Figura 10 – Níveis de energia dentro da faixa proibida	36
Figura 11 – Transição por foto excitação direto e indireto.....	37
Figura 12 – Coeficiente de absorção	38
Figura 13 – Profundidade de Penetração do Silício em função do comprimento de onda.....	38
Figura 14 – Recombinação Shockley-Read-hall (SHR).....	40
Figura 15 – Recombinação através dos centros de recombinação	40
Figura 16 – Junção PN e a sua simbologia.....	42
Figura 17 – Diagrama de cargas imediatamente após o contato	43
Figura 18 – Criação da região de depleção.....	44
Figura 19 – Diagrama de cargas depois de estabelecido o equilíbrio térmico	44
Figura 20 – Modelo Físico de uma junção PN com N_A diferente de N_D : A) Densidade de cargas. B) Campo elétrico. C) Potencial elétrico.....	45
Figura 21 – Diagrama de cargas com polarização externa.....	46
Figura 22 – Correntes de difusão, geração e recombinação em uma junção PN real	48
Figura 23 – Fotodiodo PIN.....	50
Figura 24 – A) Fotodiodo PIN CMOS, B) Fotodiodo PIN CMOS SOI.....	50
Figura 25 - Tipos básicos de fotodiodos em tecnologia CMOS: P+/Nwell, N+/PSUB e Nwell/PSUB	52
Figura 26 – Fotodiodo multi-dedo em Nwell em tecnologia CMOS convencional de $0,35\mu\text{m}$	53
Figura 27 – Fotodiodo PIN CMOS SOI lateral	55
Figura 28 – Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura de faixa proibida do silício em função da temperatura.....	57

Figura 29 – Variação da concentração de portadores majoritários no Si tipo n com dopagem $N_D=10.15\text{cm}^{-3}$. A curva tracejada representa a concentração intrínseca de portadores ...	58
Figura 30 – Variação da mobilidade de elétrons no silício com a temperatura.....	61
Figura 31 – Esquema de um fotodiodo PIN CMOS SOI de 3 dedos	65
Figura 32 – Leiaute dos fotodiodos PIN SOI Lateral na tecnologia ST 0.13 μm PD SOI.....	66
Figura 33– Fotos dos equipamentos disponíveis na sala de caracterização elétrica do Centro Universitário da FEI: (a) Analisador de parâmetros Keithley 4200, (b) Microprovador Cascade Microtech REL 3600 e (c) Analisador de parâmetros Agilent 4156C associado ao micro-refrigerador modelo K20.....	67
Figura 34 – Medida experimental do módulo da corrente de escuro com $L_i=1\mu\text{m}$ e $V_{BG}=0\text{V}$, em função de V_D	68
Figura 35 – Media experimental da corrente I_{DARK} vs V_{BG} para $L_i=1\mu\text{m}$	69
Figura 36 – Simulação da concentração de lacunas e elétrons em função da profundidade do filme de silício para o fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=1\mu\text{m}$	69
Figura 37 – Medidas experimentais de I_{DARK} vs V_{BG} variando a temperatura de 300K à 500K para $L_i=1\mu\text{m}$	70
Figura 38 – Medida experimental da corrente I_{TOTAL} vs V_D para $L_i=10\mu\text{m}$ iluminado com $\lambda=376\text{nm}$. Fonte.....	70
Figura 39 – Esquema equivalente de um fotodiodo controlado pela polarização de porta traseira. A) Operando com polarização de porta positiva; B) Operando com polarização de porta negativa.....	71
Figura 40 – Medida experimental da corrente de escuro em função da polarização reversa V_D para $L_i=2\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$	73
Figura 41 – Medida experimental da corrente de escuro em função da polarização reversa V_D para $L_i=1\mu\text{m}$ e $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$	73
Figura 42 – Corrente de escuro normalizada pelo seu valor de 300K em função da temperatura	74
Figura 43 – Medida experimental da I_{DARK} vs V_D para $L_i=5\mu\text{m}$ com diferentes temperaturas e polarizações de substrato	75
Figura 44 – Corrente de escuro I_{DARK} vs L_i para acumulação e inversão.....	75
Figura 45 – Esquema simplificado do fotodiodo PIN CMOS SOI 3D indicando W e L_{TOTAL}	77
Figura 46 – Esquema simplificado do fotodiodo PIN CMOS SOI 2D indicando RDD lateral e possível RDD vertical.....	77

Figura 47 – Medida experimental da corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=100\mu\text{m}$ e $5\mu\text{m}$ iluminado com $\lambda=376\text{nm}$ para diferentes V_D	78
Figura 48 – Simulação do fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=100\mu\text{m}$ para $T=500\text{K}$	79
Figura 49 – Simulação da taxa de geração na região intrínseca para diferentes valores de V_{BG} com $T=500\text{K}$ do fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=100\mu\text{m}$	79
Figura 50 – Simulação da densidade de corrente de elétrons e lacunas no modo inversão para $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$	83
Figura 51 – Simulação da corrente de inversão pela corrente de acumulação em função do tempo de vida das lacunas para $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$, iluminado com $\lambda=376\text{nm}$	83
Figura 52 – Simulação da densidade de corrente de elétrons e lacunas no modo acumulação para $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$	84
Figura 53 – Simulação da corrente de inversão pela corrente de acumulação em função do tempo de vida dos elétrons para $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$, iluminado com $\lambda=376\text{nm}$	85
Figura 54 – Medida experimental da corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=10\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$ iluminado com $\lambda=376\text{nm}$ para diferentes V_D	85
Figura 55 – Simulação do aumento da densidade de corrente dos portadores minoritários em acumulação para $L_i=1\mu\text{m}$ em $T=300\text{K}$ com $V_{BG}=-20\text{V}$	86
Figura 56 – Simulação do aumento da densidade de corrente dos portadores minoritários em inversão para $L_i=1\mu\text{m}$ em $T=300\text{K}$ com $V_{BG}=+20\text{V}$	87
Figura 57 – Simulação da corrente $I_{(TOTAL,INVERSÃO)}/I_{(TOTAL,ACUMULAÇÃO)}$ vs L_i para diferentes valores de V_D e temperatura	87
Figura 58 – Medida experimental da corrente $I_{FOTOGERADA}$ vs Temperatura para diferentes L_i no modo inversão com $V_D=-1\text{V}$, iluminado com $\lambda=376\text{nm}$	89
Figura 59 – Corrente normalizada pelo número de dedos (m) $I_{FOTOGERADA}$ vs L_i para diferentes temperaturas em inversão (experimental).....	90
Figura 60 – Medida experimental da corrente $I_{FOTOGERADA}$ vs Temperatura para diferentes L_i no modo acumulação com $V_D=-1\text{V}$, iluminado com $\lambda=376\text{nm}$	91
Figura 61 – Simulação da concentração de elétrons e lacunas no modo acumulação para $L_i=100\mu\text{m}$ em baixa temperatura (300K) e alta temperatura (500K).....	92
Figura 62 – Simulação da taxa de recombinação com $L_i=1\mu\text{m}$ em $T=300\text{K}$ no regime de acumulação	92
Figura 63 – Simulação da taxa de recombinação com $L_i=1\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$ no regime de acumulação	93

Figura 64 – Corrente normalizada pelo número de dedos (m) $I_{FOTOGERADA}$ vs L_i para diferentes temperaturas em acumulação.....	94
Figura 65 – Eficiência quântica total QE_{TOTAL} vs L_i para T=300K e 500K [experimental].....	95
Figura 66 – Relação sinal ruído SNR vs Temperatura com diferentes V_{BG} para $L_i=1\mu m$ [experimental].....	96
Figura 67 – Relação sinal ruído SNR vs T com diferentes V_{BG} para $L_i=100\mu m$ [experimental]	96
Figura 68 – Relação sinal-ruído normalizada em 300K no modo acumulação para $L_i=1\mu m$ e $100\mu m$	98
Figura 69 – Relação sinal-ruído normalizada em 300K no modo inversão para $L_i=1\mu m$ e $100\mu m$	98

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{FS}	Área fotossensível do dispositivo [m^2]
A	Área [m^2]
A_T	Área total do dispositivo [m^2]
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo [3×10^8 m/s]
C_{OX}	Capacitância do óxido [F]
d	Largura da região de depleção total [m]
D	Coefficiente de difusão [cm^2/s]
D_N	Coefficiente de difusão de elétrons [cm^2/s]
d_n	Largura da região de depleção do lado n [m]
D_p	Coefficiente de difusão de lacunas [cm^2/s]
d_p	Largura da região de depleção do lado p [m]
dx	Largura da região de depleção [m]
E	Campo elétrico [V/m]
E	Energia do fóton [eV]
E_a	Energia do nível permitido para impurezas aceitadoras dentro do bandgap [eV]
E_C	Mínima energia da banda de condução [eV]
E_d	Energia do nível permitido para impurezas doadoras dentro do bandgap [eV]
E_F	Energia do nível de Fermi [eV]
E_g	Band gap ou lacuna de energia [eV]
E_i	Energia do nível intrínseco de um semiconductor [eV]
EQ_E	Eficiência quântica externa de um fotodetector [adimensional]
EQ_I	Eficiência quântica interna [adimensional]
EQ_T	Eficiência quântica total de um fotodetector [adimensional]
E_v	Máxima energia da banda de valência [eV]
$F(E)$	Distribuição de Fermi-Dirac [adimensional]
F_N	Fluxo de elétrons devido a difusão [cm^{-2}/s]
F_P	Fluxo de lacunas devido a difusão [cm^{-2}/s]
f	Frequência [Hertz]
g_i	Taxa de geração [$cm^{-3}s^{-1}$]
$G_{Ter.}$	Taxa de geração térmica [$cm^{-3}s^{-1}$]
h	Constante de Planck [$6.63 \times 10^{-34} J.s = 4,14 \times 10^{-15} eV.s$]
I_{ACU}	Corrente de acumulação [A]

I_{DARK}	Corrente de escuro [A]
I_{DISP}	Corrente disponível no dispositivo sem recombinação [A]
$I_{\text{FG (max)}}$	Corrente fotogerada máxima [A]
I_{FG}	Corrente gerada pela incidência de luz [A]
I_{INV}	Corrente de inversão [A]
I_{rg}	Corrente de geração [A]
I_{Ndif}	Corrente de difusão dos elétrons [A]
I_{Pdif}	Corrente de difusão das lacunas [A]
I_{T}	Corrente total [A]
J	Densidade de corrente total ideal [A/m^2]
J_{rg}	Densidade de corrente de geração e recombinação [A/m^2]
J_{s}	Densidade de corrente de saturação [A/m^2]
k	Constante de Boltzman [$1,38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$]
k	Função de onda ou momento dos portadores [N.m]
k_{m}	Parte imaginária do índice de refração do meio m [adimensional]
L_{ABS}	Profundidade de penetração [m]
L_{dif}	Comprimento de difusão [m]
L_{Zd}	Comprimento da região depletada de um fotodiodo [m]
L_{i}	Comprimento da região intrínseca de um diodo PIN [m]
L_{N}	Comprimento de difusão de elétrons [m]
L	Comprimento de difusão [m]
L_{P}	Comprimento de difusão de lacunas [m]
m	Quantidade de dedos do fotodiodo multi-finger [adimensional]
m	Índice de Refração Digite a equação aqui.
n	Concentração de elétrons em um semiconductor intrínseco [cm^{-3}]
n	Concentração de portadores [cm^{-3}]
n_0	Concentração de elétrons em equilíbrio [cm^{-3}]
N_{A}	Concentração de dopantes do tipo P [cm^{-3}]
N_{C}	Densidade de estados da banda de condução [adimensional]
N_{D}	Concentração de dopantes do tipo N [cm^{-3}]
n_{i}	Concentração intrínseca de portadores [cm^{-3}]
N_{m}	Índice de refração do meio m [adimensional]
n_{m}	Parte real do índice de refração do meio m [adimensional]
n_{N}	Concentração de elétrons num material tipo N [cm^{-3}]

n_P	Concentração de elétrons num material tipo P [cm^{-3}]
n_{PO}	Concentração de elétrons no equilíbrio dentro da região P [cm^{-3}]
N_V	Densidade de estados da banda de valência [adimensional]
p	Concentração de lacunas em um semiconductor intrínseco [cm^{-3}]
p_0	Concentração de lacunas em equilíbrio [cm^{-3}]
P_A	Fração da potência luminosa absorvida [adimensional]
P_{IN}	Potência luminosa incidente [W/cm^2]
p_N	Concentração de lacunas num material tipo N [cm^{-3}]
p_{NO}	Concentração de lacunas no equilíbrio dentro da região N [cm^{-3}]
p_P	Concentração de lacunas num material tipo P [cm^{-3}]
P_R	Fração da potência luminosa refletida [adimensional]
P_T	Fração da potência luminosa transmitida [adimensional]
$P(y)$	Intensidade da potência dentro de um dado material [J/m^2 ou W/m^2]
q	Carga elementar do elétron [$1,6 \times 10^{-19}$ C]
R	Responsividade [A/W]
SNR	Relação sinal-ruído [adimensional]
T	Temperatura [K]
t_{ox}	Espessura do óxido de passivação [m]
t_{Box}	Espessura do óxido enterrado [m]
$t_{P,N}$	Espessura das regiões P+ e N+ [m]
t_{si}	Espessura da camada de silício [m]
U	Taxa de geração-recombinação intrínseca total [$\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
U_T	Potencial térmico [V]
U_R	Taxa de recombinação final [$\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
v	Velocidade de propagação da luz [m/s]
V_{BI}	Potencial de junção [V]
V_D	Tensão externa aplicada a uma junção PN [V]
V_{DS}	Tensão entre dreno e fonte [V]
V_{GS}	Tensão entre gate e fonte [V]
V_t	Tensão de limiar [V]
y	Distância de propagação dentro de um dado material [m]
W	Largura do fotodiodo [m]
α_m	Coefficiente de absorção [m^{-1}]
ϵ_{si}	Permissividade do silício [F/m]

ζ	Campo elétrico originado pelos íons da região de depleção [V/m]
η	Máxima eficiência alcançável [adimensional]
λ	Comprimento de onda [nm]
λ_c	Maior comprimento de onda que pode ser absorvido pelo silício [m]
μ_N	Mobilidade dos elétrons [$\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]
μ_P	Mobilidade das lacunas [$\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]
τ_e	Tempo de vida efetivo da geração térmica na região de depleção [s]
τ_{eff}	Tempo de vida efetivo dos elétrons [s]
τ	Tempo de vida dos portadores [s]
τ_0	Tempo de vida dos portadores gerados [s]
τ_N	Tempo de relaxação de elétrons [s]
τ_P	Tempo de relaxação de lacunas [s]
Φ_F	Potencial de Fermi [V]
ϕ	Ângulo de Incidência
ϕ'	Ângulo Refletido
ϕ''	Ângulo de Absorção

LISTA DE ABREVIATURAS

BER	Bit Error Rate
BOX	Buried Oxide
CCD	Charge Coupled Device
CI	Circuito-Integrado
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DNA	Ácido Desoxirribonucléico
DVD	Digital Versatile Disc
FPN	Fixed Pattern Noise (Padrão Fixo de Ruído)
LED	Light Emitting Diode
MOS	Metal Oxide Semiconductor
RDD	Região de Depleção
SOI	Silicon On Insulator
SRH	Shockley Read Hall
UV	Ultra-Violeta
UVA	Ultra-Violeta Nível A
UVB	Ultra-Violeta Nível B
UVC	Ultra-Violeta Nível C

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
2 CONCEITOS ÓPTICOS E ELETROMAGNÉTICOS	25
2.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	25
2.2 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA	27
2.3 NATUREZA DA LUZ E SUA DESCRIÇÃO CORPUSCULAR	28
2.4 PROPAGAÇÃO DA LUZ, SUA REFLEXÃO, ABSORÇÃO E TRANSMISSÃO	29
3 FÍSICA DOS SEMICONDUTORES	32
3.1 BANDAS DE ENERGIA	32
3.2 GERAÇÃO E RECOMBINAÇÃO EM SEMICONDUTORES	36
3.2.1 Transições de bandas diretas e indiretas	37
3.2.2 Recombinação de Shockley-Read-Hall, SRH	39
3.3 COMPRIMENTO DE DIFUSÃO	42
3.4 JUNÇÕES PN	42
4 FOTODETECTORES CMOS SOI	49
4.1 FOTODIODO PIN	49
4.2 TECNOLOGIA CMOS PARA FOTODIODOS	51
4.2.1 Tipos básicos de fotodiodos convencionais verticais	52
4.2.2 Fotodiodo PIN tipo multi-dedos	53
4.3 TECNOLOGIA SOI PARA FOTODIODOS	54
4.3.1 Fotodetectores SOI	54
5 EFEITOS DA TEMPERATURA NOS SEMICONDUTORES	56
5.1 O EFEITO DA TEMPERATURA NA CONCENTRAÇÃO DE PORTADORES	56
5.2 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA CORRENTE DE ESCURO	59
5.3 VARIAÇÃO DA MOBILIDADE COM A TEMPERATURA	60
6 DESEMPENHO DOS FOTODETECTORES	62
6.1 EFICIÊNCIA QUÂNTICA	62
6.2 RESPONSABILIDADE	63
6.3 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO	64
6.4 SENSIBILIDADE	64
7 SIMULAÇÕES, MEDIDAS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	65

7.1 EFEITOS DA TEMPERATURA E POLARIZAÇÃO DE SUBSTRATO NA CORRENTE DE ESCURO	67
7.2 EFEITOS DA TEMPERATURA E POLARIZAÇÃO DE SUBSTRATO NOS DISPOSITIVOS ILUMINADOS	77
7.3 EFEITOS DA TEMPERATURA E POLARIZAÇÃO DE SUBSTRATO NA CORRENTE FOTOGERADA	88
7.4 EFEITOS DA TEMPERATURA E POLARIZAÇÃO DE SUBSTRATO NA EFICIÊNCIA QUÂNTICA TOTAL E RELAÇÃO SINAL-RUÍDO.....	94
8 CONCLUSÕES	99
9 PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE O PERÍODO DE MESTRADO.....	101
REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

O mercado optoeletrônico está se expandido rapidamente. Particularmente, o mercado de imagem digital teve grande ascensão nos últimos anos.

No passado os sensores de imagem CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) não conseguiam competir com a tecnologia CCD (*Charged Couple Device*) e não foram bem sucedidos comercialmente, devido ao seu mau desempenho e o tamanho do seu pixel (*Picture Element*), considerado grande naquela época em relação ao seu concorrente [2]. Na verdade, apesar dos sensores CMOS terem aparecidos em 1967, os sensores CCDs vinham prevalecendo desde a sua invenção em 1970. Os sensores CCDs dominavam as aplicações de imagem devido à sua faixa dinâmica superior, inferior padrão fixo de ruído (FPN), pixels menores e maior sensibilidade à luz [3].

No início de 1990, os sensores de imagem CMOS ressurgiram como uma alternativa aos sensores CCD, graças à evolução da tecnologia CMOS. Matrizes de pixels passivos CMOS foram a primeira geração dos sensores de imagem. Com a evolução da tecnologia e com a adição de um amplificador por coluna ou por linha no pixel passivo, foi possível melhorar a relação sinal ruído. Sendo assim, os sensores CMOS começaram a ser uma alternativa interessante na substituição da tecnologia CCD, devido à integração das funções de imagem e do processamento de sinais condensados dentro de um único chip, reduzido o custo de fabricação e incluindo uma série de outras funcionalidades [1].

Os sensores de imagem CMOS são compostos por elementos sensíveis à luz que, em função da intensidade luminosa incidente sobre eles, geram um sinal elétrico ou carga elétrica. Este tipo de sensor possui baixo consumo de energia, menor custo em relação ao CCD, acesso aleatório de dados de imagem [4], mecanismos de leitura seletiva [5] e alta velocidade de imagem [6]. Todas estas características mostravam a tendência da substituição da tecnologia CMOS pela CCD.

Neste contexto, o mercado de armazenamento de dados ópticos, como por exemplo, os DVDs, foram os pioneiros em armazenar grande volume de dados em mídia. Este mercado continuou se expandindo chegando ao padrão Blue-Ray DVD [7], que permite uma maior capacidade de armazenamento e maior velocidade.

O mercado de comunicações ópticas também faz parte da evolução dos dispositivos ao longo das últimas décadas. Inicialmente, este tipo de tecnologia era empregado para longas distâncias através de fibras ópticas, acarretando investimentos altos na aquisição de periféricos. Entretanto, cada vez mais, havia a necessidade de expandir e melhorar as

comunicações ópticas a curtas distâncias, tal como a comunicação entre os CI's ou mesmo dentro de um único chip para transferência de dados. Isso só poderia ocorrer, se os materiais utilizados para estas aplicações possuíssem um custo viável de fabricação, como por exemplo, com o uso do silício.

O crescimento da optoeletrônica não é mera coincidência. “A computação deve ser feita com elétrons, porém a comunicação com fótons”. Essa é uma frase do diretor dos laboratórios da HP em Palo Alto, Sr. Waguih Ishak, se referindo à grande interação que acontece entre os elétrons, o que tornou viável o desenvolvimento dos transistores, os quais exploram esta característica. Em outras palavras, devido à interação entre os elétrons, foi possível construir dispositivos que os manipulam, resultando em sistemas de processamento de sinais muito eficientes. Embora os elétrons sejam partículas naturais para processar a informação que levam, eles são lentos para se propagar através de um meio.

O fóton, conhecido como “partícula de luz”, não possui uma interação significativa com outro fóton, mas pode propagar a informação que carrega de forma muito rápida. Por isso, é indicada para realizar comunicações entre sistemas ou mesmo dentro de um único chip.

Com o avanço da comunicação, a taxa de processamento e de propagação dos sinais tornou-se importante. Mas até recentemente, somente foi visado o escalamento dos transistores, na tentativa de integrar uma grande quantidade de funcionalidades dentro de um único chip. Se a taxa de processamento de sinais está crescendo, a efetiva transferência de dados através das conexões elétricas não está acompanhando este ritmo. Atualmente, as interconexões constituem o gargalo para aumentar a velocidade dos sistemas [9].

Para substituir as interconexões elétricas pelas ópticas, é necessário construir um completo sistema óptico composto de um emissor e um receptor (fotodetector), que devem ser integrados ao circuito eletrônico com objetivo de aumentar o desempenho e velocidade, sem alterar o custo padrão de fabricação.

Os campos da medicina e meio ambiente também fazem uso dos fotodetectores, como na medição do ozônio, das taxas de raios ultravioletas (UV), das concentrações de DNA e de proteínas [10]. Em todas as aplicações mencionadas até este presente momento, como a câmera fotográfica, o DVD, o Blue-Ray e nos sistemas de comunicação óptica, o fotodetector é o dispositivo mais importante, pois é através dele que o sinal óptico se converterá em um sinal elétrico. O fotodetector mais utilizado na atualidade é o diodo PIN de silício, constituído de uma região P^+ e uma região N^+ , intercalados por uma região intrínseca que pode ser do tipo N^- ou P^- .

Embora este dispositivo seja o mais utilizado nos sistemas ópticos, ainda existem muitas lacunas de conhecimento no que diz respeito ao seu funcionamento, pois grande parte dos estudos realizados pela comunidade da microeletrônica foi voltada para os transistores.

A contribuição desta dissertação consiste num estudo do comportamento dos fotodiodos PIN CMOS SOI multitedos, submetidos às variações de temperatura na faixa 300K a 500K e da polarização de substrato para os comprimentos intrínsecos de 1 μ m, 2 μ m, 5 μ m, 10 μ m e 100 μ m para aplicações na detecção da faixa UV. Este objetivo é alcançado através das simulações numéricas e medidas experimentais, as quais permitirão identificar os fenômenos físicos, analisando os seus impactos no desempenho do dispositivo, podendo ser utilizados na orientação de projeto de fotodetectores em alta temperatura.

2 CONCEITOS ÓPTICOS E ELETROMAGNÉTICOS

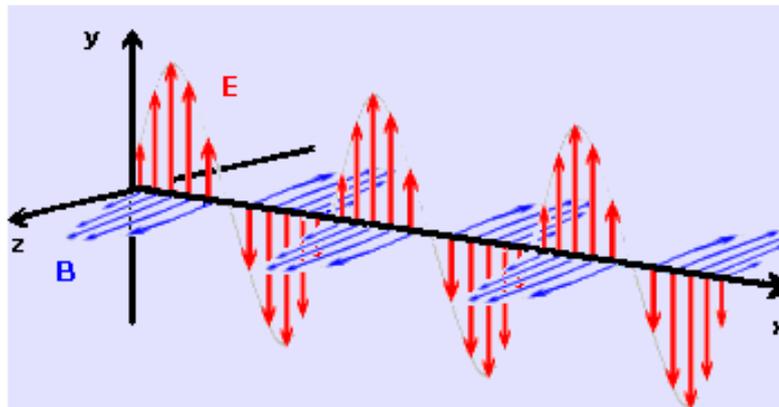
A óptica é umas das vertentes do ramo da Física que estuda o comportamento da luz e sua interação com a matéria. Este ramo de pesquisa traz consigo uma vasta bagagem de conhecimentos que contribuíram para a comunidade científica desde a formulação de teorias consolidadas até o desenvolvimento de máquinas, dispositivos e equipamentos para diversas aplicações, tais como: automotiva, militar, medicina, telecomunicações, computação e entre outras. Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos ópticos e eletromagnéticos, para que a relação da óptica ondulatória versus a corpuscular fique mais clara.

2.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A radiação é a propagação da energia em uma onda eletromagnética [12]. Luz, calor, som, raios x, raios infravermelhos, são alguns exemplos de radiação. A radiação é dividida em poucas categorias: radiação eletromagnética, radiação mecânica, radiação nuclear e raios cósmicos. No caso da radiação eletromagnética, a energia transportada deve-se a flutuações dos campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo, não havendo a necessidade de um meio material para propagação [12].

Sob o ponto de vista quântico, a radiação eletromagnética é concebida como o resultado da emissão de pequenos pulsos de energia, enquanto que sob a perspectiva ondulatória, a radiação eletromagnética se propaga na forma de ondas formadas pela oscilação dos campos elétricos (E) e magnéticos (B), conforme Figura 1.

Figura 1 – Onda eletromagnética



Fonte: [12]

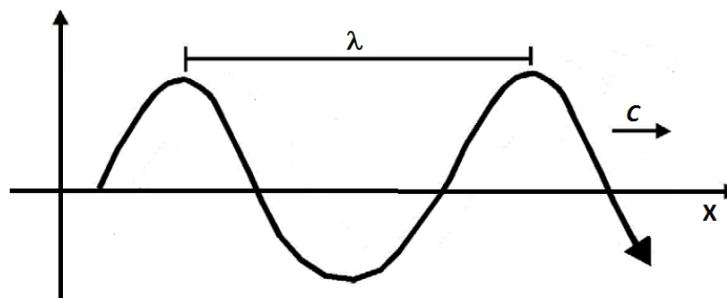
Através da Figura 1 e das descrições da equação de Maxwell, definem-se algumas propriedades importantes das ondas eletromagnéticas:

- a) As ondas eletromagnéticas são formadas por campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo;
- b) Os campos elétricos e magnéticos são perpendiculares entre si;
- c) As ondas eletromagnéticas são ondas transversais (os campos são perpendiculares à direção de propagação);
- d) As ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com velocidade da luz (c).
- e) As ondas eletromagnéticas propagam-se num dado meio com velocidade menor que a obtida no vácuo;

A Figura 1 ajuda a visualizar o que é, na verdade, uma situação complexa. Pode-se verificar que o campo elétrico induz um campo magnético perpendicular e variável. Esse mesmo campo magnético também induz um campo elétrico perpendicular e variável, e assim por diante. As variações dos campos irão induzir campos mutuamente e continuamente. Logo, está criada a perturbação eletromagnética que se propaga através do espaço ou num dado meio, constituída por dois campos em recíproca indução. O movimento ondulatório das ondas eletromagnéticas pode ser analisado através das ondas mecânicas. Essa analogia define a relação entre frequência de oscilação (f), velocidade de propagação (c) e o seu comprimento de onda (λ) [12], conforme Equação (1) e Figura 2.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

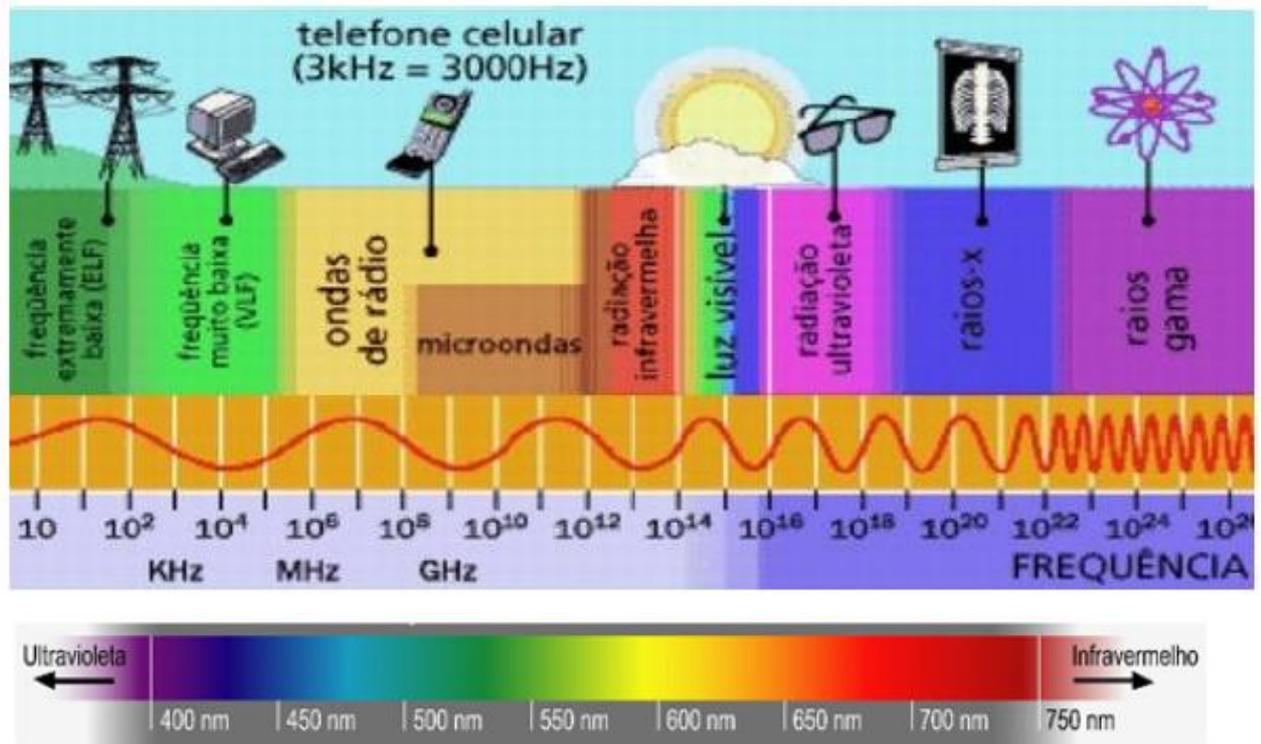
Figura 2 – Representação do comprimento de onda (λ)



Fonte: Aut

A energia eletromagnética pode ser ordenada de maneira contínua em função do seu comprimento de onda ou da sua frequência, sendo esta disposição denominada de “espectro eletromagnético”, que se estende desde comprimentos de ondas muito pequenos associados aos raios cósmicos, até as ondas de rádio de baixa frequência, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Espectro eletromagnético

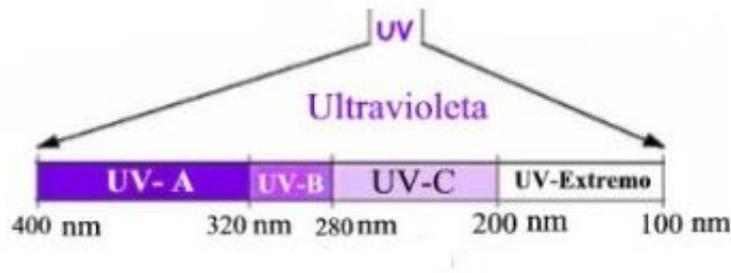


Fonte: [13]

2.2 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

A radiação UV é definida como a radiação que possui comprimentos de ondas compreendidos entre ($100\text{nm} < \lambda < 400\text{nm}$), sendo o Sol sua principal fonte de geração. Algumas lâmpadas ou dispositivos emissores de luz, como exemplo, o LED, que são fontes artificiais também possuem a capacidade de emitir comprimentos de onda nessa faixa de radiação. Seu espectro é subdividido conforme Figura 4.

Figura 4 – Espectro da radiação ultravioleta (UV)



Fonte: [14]

Sendo:

- UVC - Comprimentos de onda entre 200 – 280nm, praticamente todos os raios são absorvidos pelo ozônio;
- UVB - Comprimentos de onda entre 280 – 320nm, boa parte dos raios são absorvidos pelo ozônio;
- UVA - Comprimentos de onda entre 320 – 400nm, nada é absorvido pelo ozônio;

2.3 NATUREZA DA LUZ E SUA DESCRIÇÃO CORPUSCULAR

A luz possui natureza dual, pois os fenômenos de reflexão, refração, interferência, difração e polarização podem ser explicados pela teoria ondulatória, e os fenômenos da emissão e absorção fotoelétrica pela teoria corpuscular. O efeito fotoelétrico mostra que é possível demonstrar que a energia de um feixe de luz era concentrada em pequenos pacotes de energia, denominados de fótons, também conhecidos como *quantum* ou quantidade elementar. Sendo assim, a radiação eletromagnética, pode ser quantizada através dos fótons. Um quantum de luz de frequência (f) tem uma energia (E) dada pela Equação (2).

$$E = hf \quad (2)$$

Sendo h a constante de Planck, que possui o valor de $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J.s} = 4,14 \times 10^{-15} \text{eV.s}$

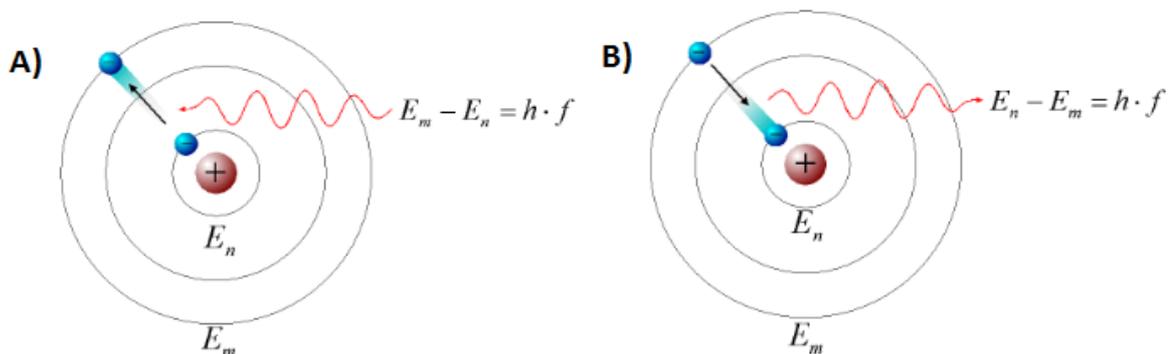
Através da Equação (2), verifica-se que a menor energia que uma onda luminosa pode ter é um fóton quantizado em (hf). Os fótons são partículas que estão se movendo na

velocidade da luz (a qual varia de acordo com o meio que o mesmo está submetido) em relação a todos os seus observadores possuindo duas propriedades interessantes:

- São partículas que não apresentam massa;
- São partículas que possuem energia bem definida (hf ou múltiplos inteiros de hf);

Quando um fóton é absorvido por um átomo, sua energia hf é transferida da luz para o átomo, essa transferência de energia causa a aniquilação do fóton e o aumento de energia de elétrons, que podem saltar entre os níveis energéticos do corpo ou material, conforme Figura 5 – A. Quando um fóton é emitido de um átomo, sua energia hf é transferida do átomo em forma luz, conforme Figura 5 – B. Assim, os átomos de um dado corpo possuem a capacidade de emitir ou absorver fótons.

Figura 5 – A) Fóton absorvido; B) Fóton emitido



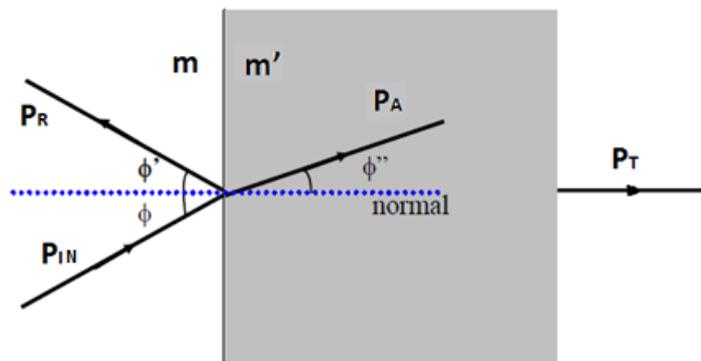
Fonte: [15]

2.4 PROPAGAÇÃO DA LUZ, SUA REFLEXÃO, ABSORÇÃO E TRANSMISSÃO

Como descrito anteriormente, a luz é uma onda eletromagnética composta pelos campos elétricos e magnéticos e sua amplitude está ligada à magnitude do campo elétrico, que define a potência que está sendo transportada pela onda. A propagação da luz baseia-se em dois princípios importantes:

- Em meios homogêneos a luz possui propagação retilínea;
- Quando a luz atinge uma interface separando dois meios distintos, podem ocorrer os fenômenos de reflexão, refração e absorção, conforme Figura 6;

Figura 6 – Reflexão e refração de um feixe luminoso num dado meio.



Fonte: Autor “adaptado de” [9]

Como podemos ver na Figura 6, quando o feixe de luz incidente com potência (P_{IN}), atinge uma interface entre dois meios distintos (m) e (m'), uma fração desta potência é refletida (P_R), a outra é absorvida (P_A) e a terceira fração é transmitida (P_T). De acordo com a conservação da energia, temos a Equação (3):

$$1 = \frac{P_R}{P_{IN}} + \frac{P_A}{P_{IN}} + \frac{P_T}{P_{IN}} \quad (3)$$

Cada meio (m) é caracterizado por um parâmetro chamado de índice de refração (N_m), que determina a velocidade com que o raio ou feixe se propaga naquele meio [15]. As direções dos feixes não são arbitrárias, pois seguem algumas regras que descrevem seu comportamento, dependendo das condições de contorno do campo eletromagnético:

- Os feixes de luz (P_{IN}), (P_R) e (P_A) estão todos no mesmo plano de incidência
- Os ângulos de (P_{IN}) e (P_R) são iguais ($\phi = \phi'$);
- Para cada meio e para cada feixe de luz que se refrata, é constante o produto do seno do ângulo, que o raio forma com a normal, do índice de refração do meio em que o feixe se encontra, esta definição relata a lei de Snell, conforme descrito na Equação (4)

$$n \cdot \text{sen}(\phi) = n' \cdot \text{sen}(\phi'') \quad (4)$$

O índice de refração (N_m) descrito anteriormente é um índice que possui parte real e complexo imaginária devido às características da onda eletromagnética, constituído dos vetores de campos elétricos (E) e magnéticos (B), conforme Equação (5):

$$N_m = n_m - i.k_m \quad (5)$$

Onde (n_m) é a parte real do índice de refração que determina a velocidade de propagação (v) da onda dentro do meio (m). Sendo (c), a velocidade da luz no vácuo, a razão entre as duas grandezas determinam (n_m) através da Equação (6):

$$n_m = \frac{c}{v} \quad (6)$$

O índice imaginário ($i.k_m$) é conhecido como coeficiente de extinção, que é a medida de atenuação (perda gradual da intensidade de um fluxo através de um meio) utilizada para calcular quantitativamente a penetração das partículas quânticas ou de outros tipos de feixes energéticos em diversos materiais, e determina o coeficiente de absorção (α_m) do meio de acordo com a Equação (7):

$$\alpha_m = \frac{4.\pi.k_m}{\lambda} \quad (7)$$

Nos semicondutores, o coeficiente de absorção depende fortemente do comprimento de onda e da energia do fóton. A geração de portadores livres através da incidência de um feixe luminoso depende da potência (P_{IN}) sobre o material e o quanto dessa potência será absorvida (P_A). O coeficiente da absorção e a espessura do meio (m) determinam a potência (P_A). Quando um feixe é incidido sobre o material, o mesmo penetra numa distância (y), e a potência (P_{IN}) decai exponencialmente conforme Equação (8) de Lambert – Beer [16], relatando que a intensidade da luz decresce exponencialmente.

$$P(y) = P_{IN} . e^{-\alpha_m y} \quad (8)$$

3 FÍSICA DOS SEMICONDUTORES

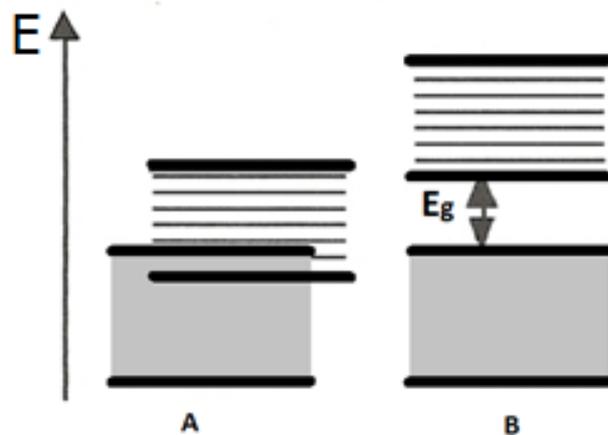
Neste capítulo serão introduzidos conceitos da física dos semicondutores pertinentes à operação dos dispositivos. Também é apresentada uma pequena discussão sobre as junções p-n e suas características de geração e recombinação dentro da região de depleção.

3.1 BANDAS DE ENERGIA

A maior parte dos fenômenos químicos é relacionada aos elétrons das camadas mais externas do átomo. Sob o ponto de vista de bandas de energia, os elétrons responsáveis por formar as ligações entre os átomos são aqueles que ocupam a última banda, conhecida como banda de valência (E_V). A banda de energia permitida acima da banda de valência é denominada de banda de condução (E_C), a qual, em um semicondutor em $T=0K$ permanece isenta de elétrons. À medida que a temperatura aumenta, os elétrons adquirem energia suficiente para “saltar” da banda de valência para banda de condução, sendo esses, os portadores livres do material. A diferença de energia entre as bandas é denominada de faixa proibida ou “bandgap” (E_g).

No caso mais genérico, existem duas situações que podem ocorrer no que diz respeito à localização do átomo dentro da tabela periódica, conforme observado na Figura 7.

Figura 7 – Bandas de energia de um metal (A) e em um semicondutor (B)



Fonte: [17]

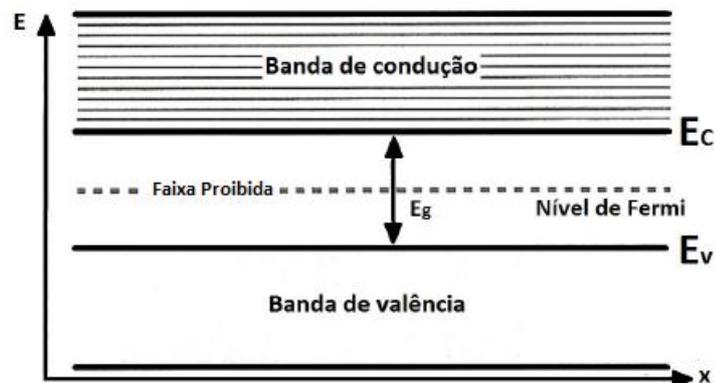
a) A camada de valência pode estar completamente preenchida com elétrons em $T \approx 0K$, mas a próxima banda de energia se sobrepõe a ela ($E_g < 0$). Os materiais que possuem este tipo de características são os metais;

b) A camada de valência pode estar completamente preenchida com elétrons e não há bandas vazias que se sobrepõe a ela ($E_g > 0$). Os materiais que possuem este tipo de características são os semicondutores ou isolantes;

Sendo assim, a distinção entre um isolante ou semicondutor é quantitativa e é baseada no valor do seu “*gap*” de energia. Para o silício o valor de E_g é de 1,12eV [17] e para um isolante de óxido de silício o $E_g \approx 9eV$ [17].

É conveniente representar as bandas de energia em espaço real (conforme Figura 8), onde o eixo x define uma distância dentro do cristal. A máxima energia da banda de valência é chamada de E_v e a mínima energia da banda de condução é conhecida como E_c .

Figura 8 – Bandas de energia no espaço real



Fonte: [17]

O nível de Fermi (Φ_F) mencionado na Figura 8 é definido como um nível de energia, que tem 50% de probabilidade de ser preenchido por elétrons. Este nível representa a máxima energia de um elétron em 0K e pode ser calculado através das Equações (9) e (10) dependendo do tipo de material (P ou N), que serão discutidos posteriormente.

$$\Phi_{F(\text{Semicondutor tipo N})} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \quad (9)$$

$$\Phi_{F(\text{Semicondutor tipo P})} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (10)$$

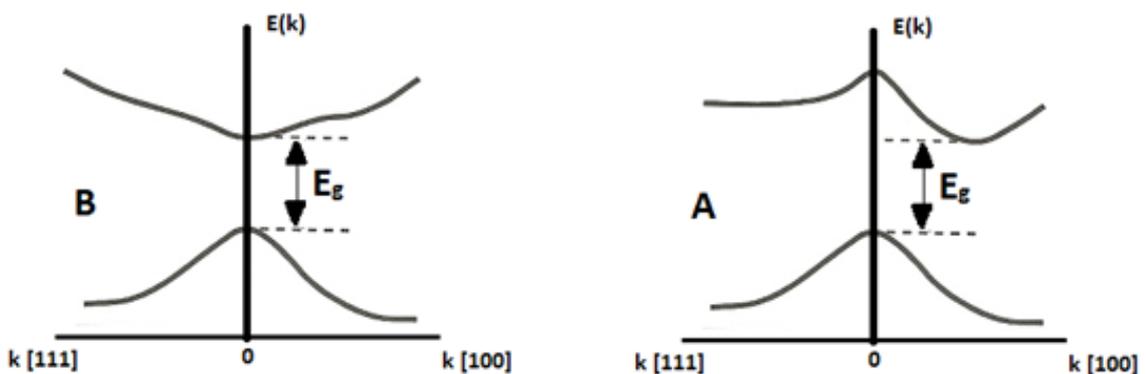
Sendo (k) a constante de Boltzman, T é a temperatura em Kelvin, (q) é a carga elementar do elétron, (N_A) e (N_D) representa a concentração de dopantes dos materiais tipo P e N respectivamente e (n_i) é a concentração intrínseca de portadores do material.

Existe outra maneira de representar o diagrama de bandas de energia em função do vetor de onda ou *momentum* de portadores (k), conforme Figura 9. Este tipo de análise permite verificar algumas propriedades interessantes dos semicondutores. Na Figura 9-A, a máxima energia da banda de valência e a mínima energia da banda de condução ocorrem no mesmo momentum ($k=0$), definindo assim um semicondutor de banda direta. Logo, um elétron pode perder energia, caindo da banda de condução para a banda de valência sem violar a lei da conservação de energia (não há mudança no momentum) [17]. A perda de energia do elétron pode ser emitida em forma de um fóton conforme descrito na Equação (11), sendo (h) a constante de Planck e (v) a velocidade do fóton. Na maioria dos semicondutores de banda direta, a energia emitida em forma de fóton é ocasionada pelo processo de recombinação que normalmente corresponde à faixa da energia visível ou infravermelho. Neste tipo de evento (emissão dos fótons através da recombinação) é explorado nos diodos emissores de luz.

Para os semicondutores de banda indireta (Figura 9-B), a máxima energia da banda de valência e a mínima energia da banda de condução ocorrem em momentos diferentes. Sendo assim, um elétron não pode decair da banda de condução para a banda de valência sem que haja mudança de momentum, o que reduz a probabilidade de ocorrência. Semicondutores que possuem este tipo de característica são os Silício e Germânio.

$$E_g = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (11)$$

Figura 9 – A) Semicondutor de banda direta; B) Semicondutor de banda indireta



Outro fator importante a ser mencionado nos semicondutores é a concentração intrínseca de portadores (n_i). Esta concentração representa o produto entre o número de elétrons (n) e lacunas (p) de um semicondutor intrínseco, conforme Equação (12).

$$pn = n_i^2 \quad (12)$$

O semicondutor é dito extrínseco quando a vasta maioria dos seus portadores livres se origina dos próprios átomos do semicondutor. Neste caso, se um elétron recebe energia térmica suficiente para “saltar” da banda de valência para a banda de condução, ele deixa uma lacuna na banda de valência, por isso, o número de elétrons na banda de condução é igual ao número de lacunas na banda de valência, conforme Equação (13).

$$p = n = n_i \quad (13)$$

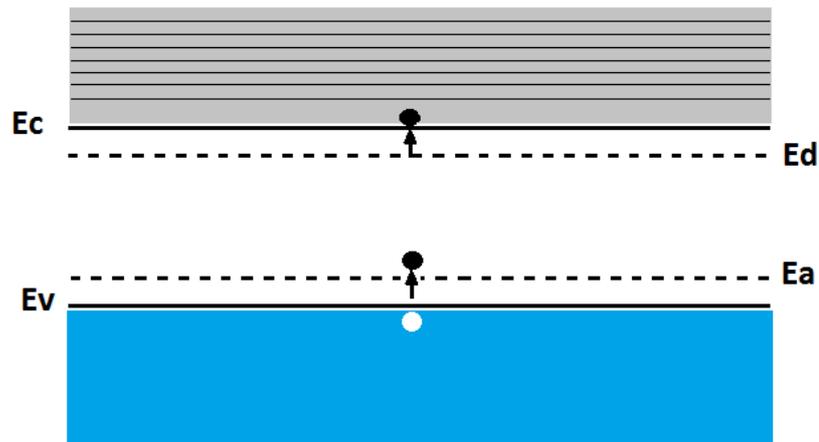
Desta forma é possível determinar o nível intrínseco (E_i), conforme Equação (14). A concentração intrínseca de portadores do silício em temperatura ambiente (300K) é de $n_i=1,45 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$. Posteriormente será discutida a dependência de (n_i) com a temperatura.

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (14)$$

Introduzindo átomos doadores (arsênio ou fósforo) ou aceitadores (boro) nos semicondutores, criam-se níveis de energia dentro da faixa proibida, conforme Figura 10. Na introdução de átomos doadores, o nível está localizado alguns meV (mili elétron-volt) abaixo da banda de condução, sendo que em temperatura ambiente, os elétrons presentes neste nível possuem energia térmica suficiente para saltar do nível (E_d) para o nível de condução. Ao conter impurezas doadoras, o semicondutor é dito do tipo N e a concentração destes átomos é denominada de (N_D). O mesmo processo ocorre ao introduzir os átomos aceitadores, o nível de energia está localizado alguns meV acima da banda de valência, permitindo que os elétrons saltem de banda de valência para o nível (E_a), criando assim, lacunas na camada de valência. Ao conter impurezas aceitadoras o semicondutor é dito do tipo P e sua concentração é chamada de (N_A).

A concentração de elétrons e lacunas para um material tipo N e P é dada pelas Equações (15) e (16).

Figura 10 – Níveis de energia dentro da faixa proibida



Fonte “adaptado de” [9]

$$n_N \cong N_D \text{ e } p_N = \frac{n_i^2}{N_D} \text{ (Semicondutor tipo N)} \quad (15)$$

$$p_P \cong N_A \text{ e } n_P = \frac{n_i^2}{N_A} \text{ (Semicondutor tipo P)} \quad (16)$$

3.2 GERAÇÃO E RECOMBINAÇÃO EM SIMICONDUTORES

No ramo de pesquisa da eletricidade, a física dos semicondutores juntamente com a mecânica quântica vislumbra estudar as propriedades físicas dos materiais compreendendo seus comportamentos e efeitos [17].

Os fenômenos de geração e recombinação nos semicondutores são fundamentais para o estudo dos dispositivos fotoelétricos.

Elétrons e lacunas sofrem um processo contínuo de geração e recombinação térmica no semicondutor, sendo que em equilíbrio as taxas de geração (G_{Ter}) e de recombinação (R_{Ter}), se igualam, mantendo as concentrações dos portadores em equilíbrio, com seu produto satisfazendo a relação ($n.p = n_i^2$) [18]. O processo de recombinação pode ser entendido quando um elétron da camada de condução transita para a de valência. Ao transitar, o elétron libera energia, e o mesmo se recombina com uma lacuna. Já o processo de geração ocorre quando um elétron transita da banda de valência para a de condução, criando uma lacuna na valência e um elétron livre na condução.

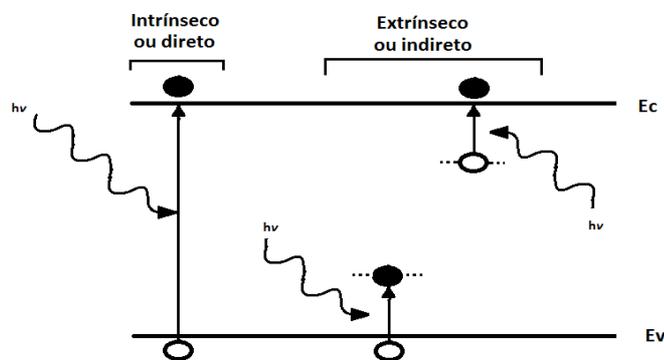
No equilíbrio termodinâmico, os fenômenos de geração e recombinação são balanceados, tal que a concentração de elétrons e lacunas mantém-se constante ao longo do

tempo. No entanto, um estado de não equilíbrio pode ser atingido por meio de perturbações externas, como exemplo, uma fonte de luz.

3.2.1 Transições de bandas diretas e indiretas

Conforme mencionado no item 3.1, existem semicondutores de banda direta e indireta, sendo que o silício é um semicondutor de banda indireta, onde a mínima energia da banda de condução e a máxima energia da banda de valência não ocorrem para o mesmo valor de momentum (k). Esta característica faz com que a recombinação de banda para banda, através do qual, um elétron “salta” da banda de condução para a banda de valência se torne muito improvável de ocorrer, fazendo com que este tipo de semicondutor não emita luz. Portanto, o fenômeno de recombinação só pode ocorrer em níveis energéticos permitidos dentro da faixa proibida, chamados de centros de recombinação, os quais são introduzidos no semicondutor por átomos de impurezas ou defeitos cristalográficos, conforme Figura 11.

Figura 11 – Transição por foto excitação direto e indireto

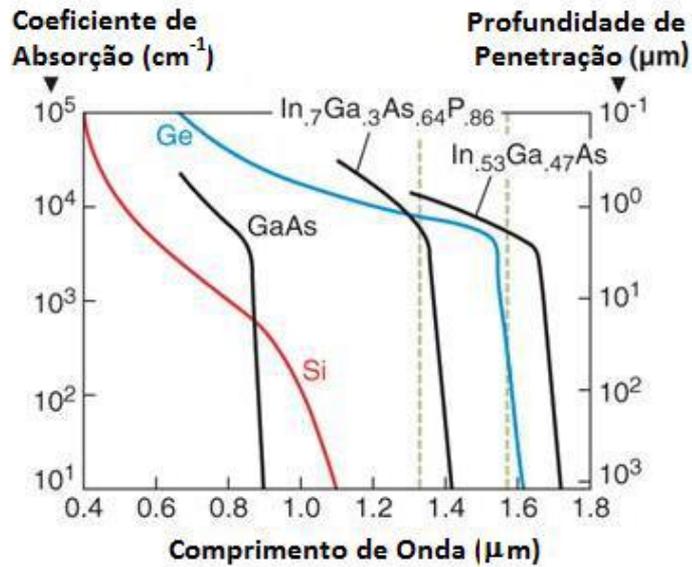


Fonte: [9]

Um dos principais responsáveis pelo fenômeno de geração extrínseca nos semicondutores é a incidência da radiação luminosa, e sua absorção é determinada pelo coeficiente de absorção (α), conforme Figura 12. O silício é “transparente” a fótons com energia $h\nu$ menor que a sua faixa proibida, por isso, o maior comprimento de onda (λ_c) que pode ser absorvido pelo silício para que um elétron possa “saltar” da banda de valência para a banda de condução é dada pela Equação (17).

$$\lambda_c = \frac{hc}{E} \quad (17)$$

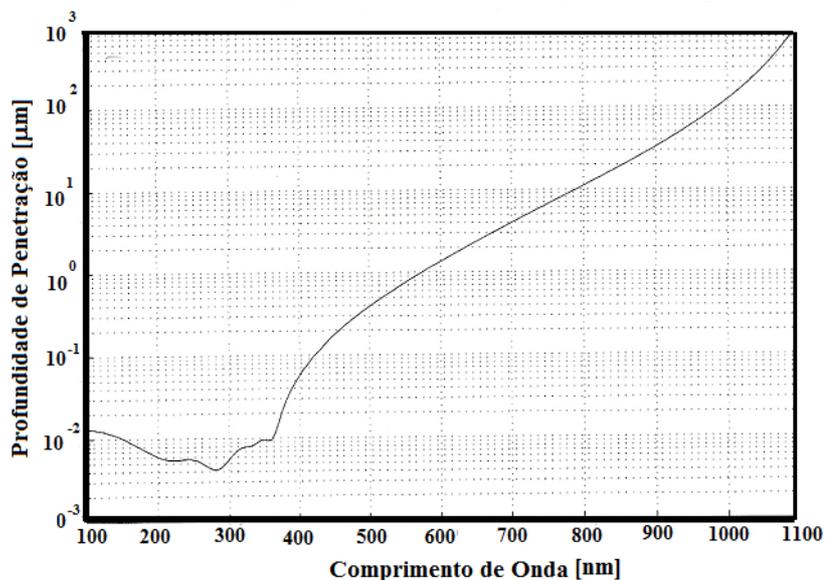
Figura 12 – Coeficiente de absorção



Fonte: [19]

O inverso do coeficiente de absorção é a profundidade de penetração (L_{abs}), conforme Figura 13 utilizando o modelo apresentado em [47] [48]. Este coeficiente indica o quanto à luz pode penetrar no material em função do seu comprimento de onda antes de ser absorvida.

Figura 13 – Profundidade de Penetração do Silício em função do comprimento de onda



Fonte: [1]

Portanto, fótons com energia igual ou maior que E_g , podem ser absorvidos e então gerar pares elétron-lacuna. O mínimo comprimento de onda que pode ser absorvido é altamente influenciado pela recombinação de superfície, pois para baixos comprimentos de

onda, o coeficiente de penetração é muito alto, portanto, a radiação é absorvida muito próximo a superfície, onde o tempo de recombinação é muito curto e os portadores fotogereados se recombinam antes de serem coletados. Através destes coeficientes é possível determinar quais fotodetectores são mais indicados para o processo fotogeração em virtude do espectro eletromagnético.

3.2.2 Recombinação de Shockley-Read-Hall, SRH

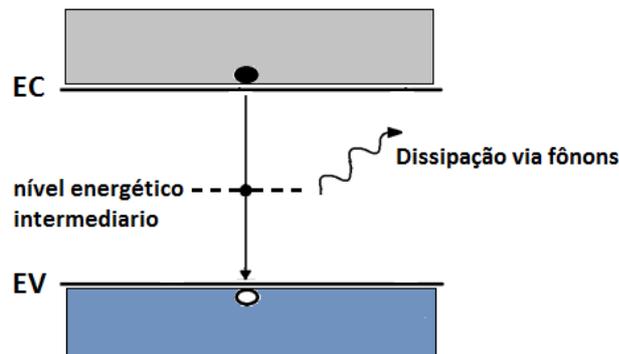
Em um evento de recombinação, a energia pode ser liberada de três formas:

- a) Em um evento de recombinação radioativa de banda para banda, onde a energia é liberada em forma de fótons;
- b) Em um evento de recombinação Auger, onde a energia é transferida para outro elétron ou lacuna, o qual é excitado para um nível de maior energia;
- c) Em um evento de recombinação SRH, o qual envolve níveis de energia dentro da faixa proibida, sendo que a energia é transferida para o semiconductor na forma de calor;

A recombinação não ocorre somente no substrato de um semiconductor, mas também na superfície do mesmo, onde a periodicidade das ligações é interrompida, e onde o contato com outros materiais é feito.

Conforme descrito anteriormente, a recombinação SRH, ocorre devido ao par elétron-lacuna se recombinar em níveis energéticos intermediários dentro da faixa proibida, introduzidos pela presença de impurezas, defeitos cristalográficos ou contaminações, e a energia liberada durante o evento da recombinação é dissipada através das vibrações da rede cristalina (fônons) conforme Figura 14.

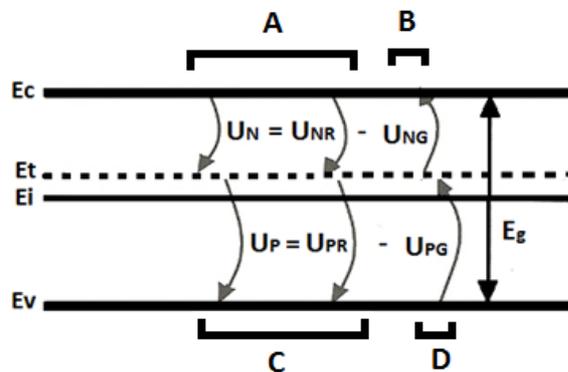
Figura 14 – Recombinação Shockley-Read-hall (SHR)



Fonte: Autor

Na Figura 15, verifica-se que as transições A e C correspondem aos eventos de recombinação e as transições B e D correspondem os eventos de geração. Estas transições são muito mais prováveis de ocorrer, pois envolvem trocas de energia menores que (E_g). Os termos G_N e G_P representam os eventos de geração de pares elétron-lacuna originados por fontes externas de energia.

Figura 15 – Recombinação através dos centros de recombinação



Fonte: [9]

Sendo (U_N) e (U_P) as taxas de recombinação-geração intrínseca para elétrons e lacunas respectivamente (não gerada por elementos externos).

A taxa de geração e recombinação total (U) deste mecanismo é a diferença entre a taxa de recombinação e a taxa de geração térmica, matematicamente, $U=U_{NR}-U_{NG}$, mesmo princípio utilizado na recombinação radioativa. No equilíbrio termodinâmico, a recombinação total é dada na Equação (18):

$$U = \frac{p \cdot n - n_i^2}{\tau_p \left(n + n_i \cdot \exp \left[\frac{E_d - E_i}{k \cdot T} \right] \right) + \tau_N \left(p + n_i \cdot \exp \left[\frac{E_i - E_d}{k \cdot T} \right] \right)} \quad (18)$$

Sendo:

- a) τ_p e τ_N - Tempo de vida das lacunas e elétrons em estado-estacionário;
- b) E_d - Nível energético dos estados permitidos dentro da faixa proibida;

Como se pode verificar, a taxa de geração e recombinação intrínseca é diretamente proporcional a $pn - n_i^2$, portanto (U) é definido pelas seguintes relações (19).

$$\begin{cases} U = 0 \text{ se } pn = n_i^2 \text{ (equilíbrio térmico)} \\ U > 0 \text{ se } pn > n_i^2 \text{ (força processo de recombinação)} \\ U < 0 \text{ se } pn < n_i^2 \text{ (força processo de geração)} \end{cases} \quad (19)$$

Alguns dispositivos operam no regime de baixa injeção de portadores minoritários, tal como os fotodiodos PIN. Sendo que, o tempo de vida destes portadores é de extrema relevância, pois os regimes de operação e eficiência serão afetados diretamente. As concentrações de portadores minoritários é muito menor que a dos portadores majoritários, logo, a taxa de recombinação intrínseca pode ser definida de acordo com as Equações (20) e (21):

$$U = \frac{n - n_0}{\tau_N} \text{ (Semicondutor tipo P)} \quad (20)$$

$$U = \frac{p - p_0}{\tau_p} \text{ (Semicondutor tipo N)} \quad (21)$$

Sendo (n_0) e (p_0) as concentração de elétrons e lacunas em equilíbrio.

3.3 COMPRIMENTO DE DIFUSÃO

O comprimento de difusão significa a distância média em que um portador consegue percorrer durante seu tempo de vida. Em outras palavras, é a distância percorrida desde o momento da sua geração até o momento em que se recombina. O comprimento de difusão e o tempo de vida dos portadores estão relacionados aos mecanismos de recombinação (SRH, AUGER e RADIOATIVA). A taxa de recombinação também depende da quantidade de irregularidades cristalográficas. Se um semiconductor é dopado, o mesmo irá promover um aumento nas irregularidades, conseqüentemente o efeito da recombinação SRH será predominante [18]. O comprimento de difusão está relacionado diretamente com o produto do tempo de vida do portador com o coeficiente de difusão, conforme Equação (22).

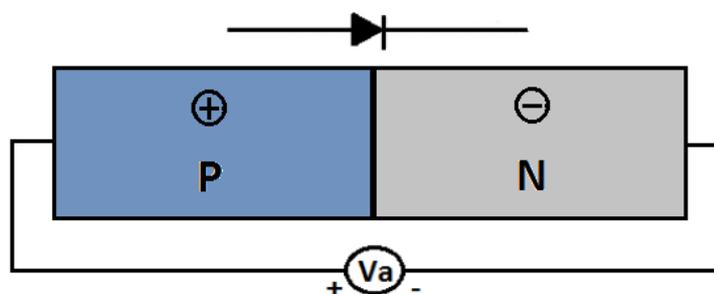
$$L = \sqrt{\tau \cdot D} \quad (22)$$

Sendo (L) o comprimento de difusão, (τ) tempo de vida dos portadores e (D) coeficiente de difusão.

3.4 JUNÇÕES PN

Junções PN são formadas através dos contatos dos semicondutores tipo P e N, conforme Figura 16. Esta junção é a formação básica dos diodos convencionais bem como uma das junções integrantes da grande maioria dos dispositivos semicondutores.

Figura 16 – Junção PN e a sua simbologia

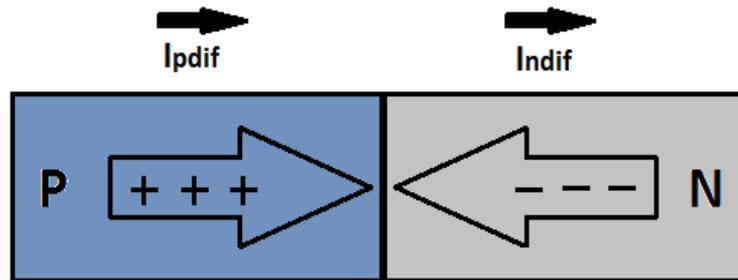


Fonte: Autor

Conectando as duas regiões, o processo de difusão começa a surgir devido às diferenças de concentrações e dos tipos de dopantes do material. Logo, as lacunas que são os

portadores majoritários da região P, começam a se difundir para região N, surgindo então à corrente de difusão P (I_{Pdif}). O mesmo processo ocorre na região N, os elétrons que são os portadores majoritários desta região começam a se difundir para região P, surgindo a corrente de difusão N (I_{Ndif}), conforme Figura 17:

Figura 17 – Diagrama de cargas imediatamente após o contato



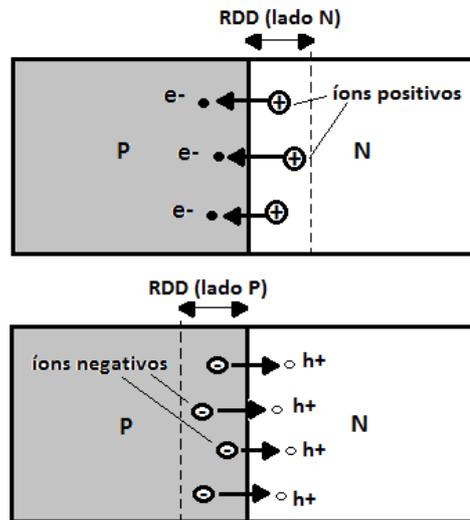
Fonte: Autor

A corrente de difusão total da junção é dada pela Equação (23):

$$I_{Tdif} = I_{Pdif} + I_{Ndif} \quad (23)$$

Quando os elétrons e lacunas se difundem para as regiões P e N, são deixados íons positivos e negativos respectivamente, que não podem se mover ao longo do cristal, conforme Figura 18. A região onde estes íons estão localizados constitui uma região de carga espacial chamada de região de depleção (RDD). Os íons desta região dão origem ao campo elétrico (ξ), com sentido do lado N para o lado P, e conseqüentemente o aparecimento de um potencial de junção (V_{BI}), conforme Equação (24) [20].

Figura 18 – Criação da região de depleção



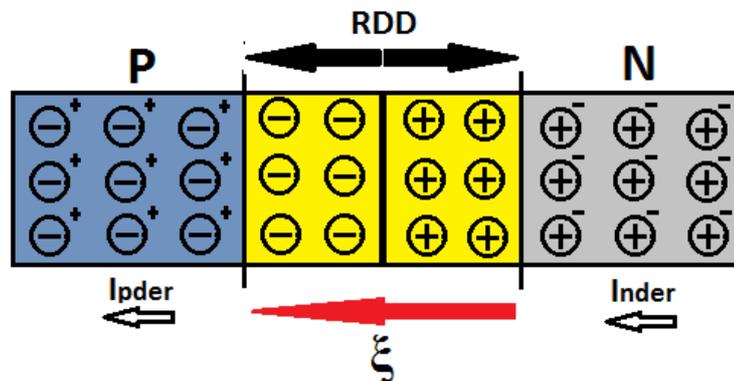
Fonte: [9]

$$V_{BI} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) \tag{24}$$

Essa diferença de potencial dá origem à corrente de deriva, forçando as lacunas minoritárias da região N se deslocarem para região P e os elétrons minoritários da região P se deslocarem para região N conforme Figura 19. A corrente total de deriva da junção é dada pela Equação (25):

$$I_{Tder} = I_{Pder} + I_{Nder} \tag{25}$$

Figura 19 – Diagrama de cargas depois de estabelecido o equilíbrio térmico



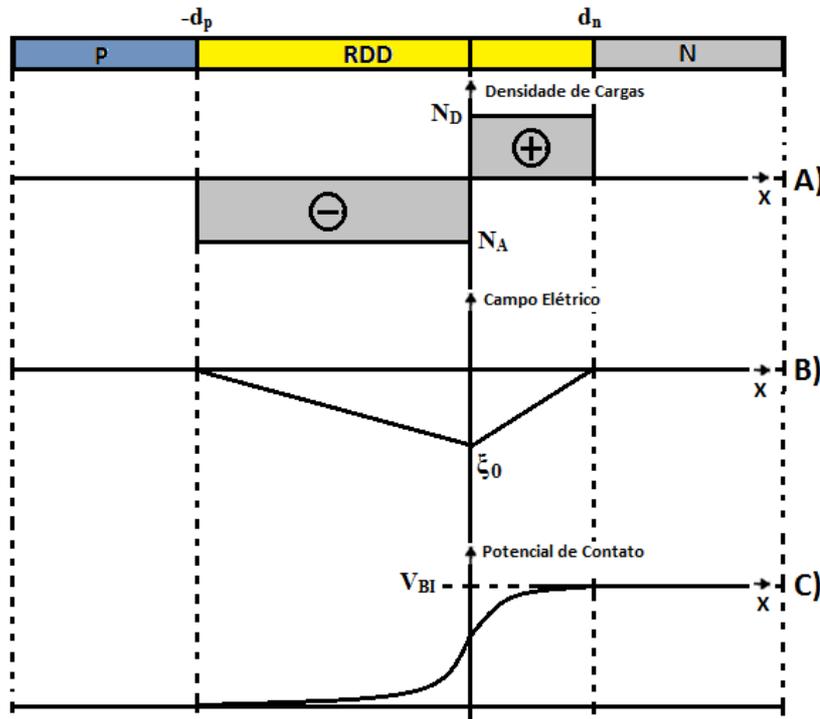
Fonte: Autor

À medida que a diferença de potencial entre os lados P e N da junção aumenta em virtude da elevação do campo elétrico, a corrente de deriva aumenta, enquanto a corrente de

difusão sofre uma diminuição até que, no equilíbrio, essa diferença de potencial seja suficiente para que ambos os componentes de corrente se igualem ($|I_{Tdif}| = |I_{Tder}|$) em valor absoluto, mas com sentidos opostos.

O perfil de cargas, do campo elétrico e do potencial após o equilíbrio térmico pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Modelo Físico de uma junção PN com N_A diferente de N_D : A) Densidade de cargas. B) Campo elétrico. C) Potencial elétrico



Fonte: Autor

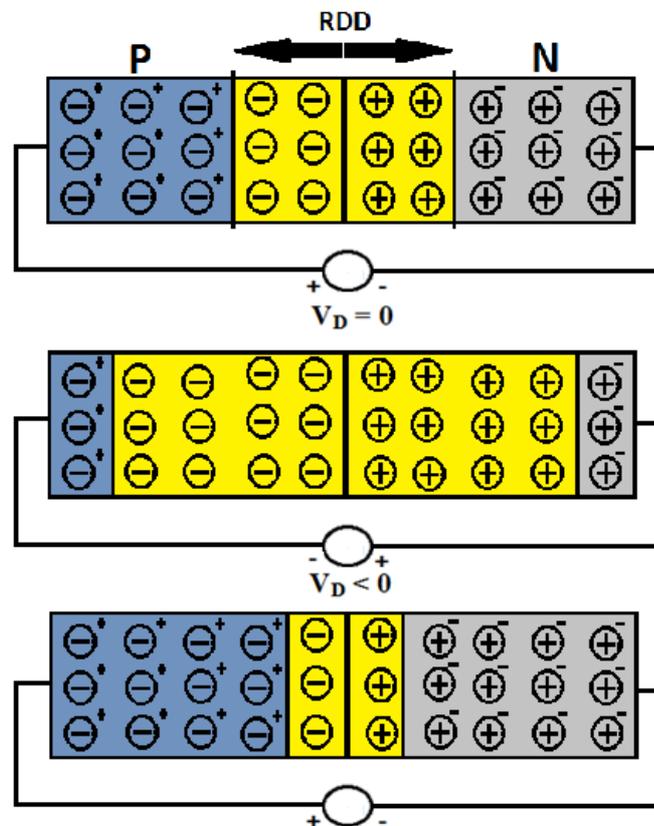
A largura da RDD é modificada com a aplicação de uma tensão externa (V_D). A aplicação de (V_D) positivo (potencial do lado P maior que do lado N) diminui a largura da RDD, porque o campo elétrico externo se contrapõe ao campo elétrico interno, o que fará com que a corrente de difusão (majoritários) suplante a corrente de deriva (minoritários), e se diz que a junção PN está diretamente polarizada. Aplicando-se uma tensão (V_D) negativa, a largura de depleção aumenta e a corrente de deriva fica maior que a corrente de difusão, dizendo-se que a junção PN está polarizada reversamente, conforme Figura 21.

As larguras da região de depleção do lado N (d_n) e do lado P (d_p) podem ser calculadas através das Equações (26) e (27) [17].

$$d_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_{si} \cdot (V_{BI} - V_D) \cdot N_A}{q \cdot N_D \cdot (N_A + N_D)}} \quad (\text{largura da RDD lado N}) \quad (26)$$

$$d_p = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_{si} \cdot (V_{BI} - V_D) \cdot N_D}{q \cdot N_A \cdot (N_A + N_D)}} \quad (\text{largura da RDD lado P}) \quad (27)$$

Figura 21 – Diagrama de cargas com polarização externa



Fonte: Autor

A densidade de corrente total (J) da junção PN polarizada diretamente, é composta das correntes de deriva e difusão para um diodo ideal, e seu valor pode ser encontrado através da Equação (28):

$$J = J_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (28)$$

Sendo (J_s) a densidade de corrente de saturação ou densidade de corrente reversa. Esta corrente representa o fluxo de corrente reverso na junção reversamente polarizada, sendo dependente das concentrações, dos coeficientes de difusão e tempo de vida dos portadores minoritários conforme Equação (29) [9] [17].

$$J_s = \frac{q \cdot D_N \cdot n_{p0}}{L_N} + \frac{q \cdot D_P \cdot p_{n0}}{L_P} = q \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_P}{\tau_P}} \right) \quad (29)$$

Sendo (n_{p0}) definido como a concentração de elétrons no equilíbrio dentro da região P, e (p_{n0}) definido como a concentração de lacunas no equilíbrio dentro da região N. Para a junção PN, os comprimentos de difusão do lado N e P, podem ser calculados conforme Equações (30) e (31).

$$L_N = \sqrt{\tau_N \cdot D_N} \quad (30)$$

$$L_P = \sqrt{\tau_P \cdot D_P} \quad (31)$$

Numa situação real, os mecanismos de geração e recombinação dos portadores devem ser incluídos nos modelos da densidade de corrente da junção PN. Os modelos de geração e recombinação na junção serão considerados os SRH, pois ao aplicar uma tensão externa (V_D), o produto de ($n \cdot p$) não será mais igual a (n_i^2) em equilíbrio. Logo, a densidade de corrente total do dispositivo é dada pela Equação (32).

$$J = J_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}\right) - 1 \right] + J_{rg} \quad (32)$$

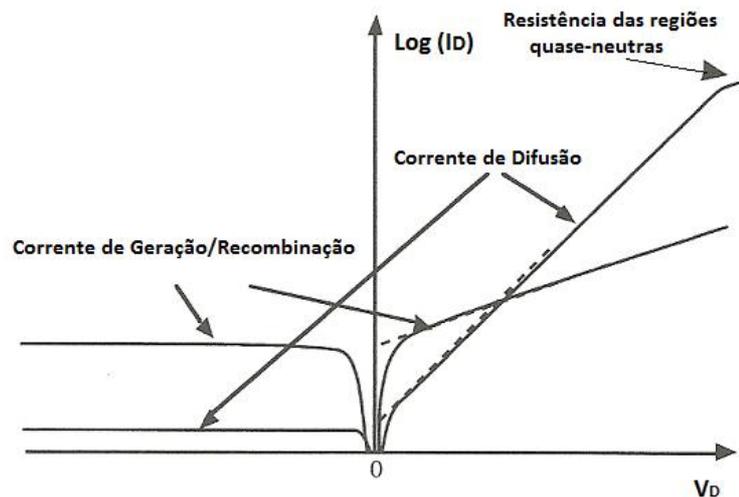
Sendo (J_{rg}) a corrente de geração que pode ser observada na Equação (33) [9] [17].

$$J_{rg} = \frac{q \cdot n_i}{2 \cdot \tau_0} \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_{si} \cdot (V_{BI} - V_D)}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D}} \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (33)$$

Sendo que (τ_0) é o tempo de vida dos portadores gerados dos elétrons ou das lacunas (τ_N, τ_P).

Quando a tensão externa é aplicada, o mecanismo SRH passará a existir no intuito de forçar que o produto ($p.n$) tenda ao equilíbrio. Quando a tensão ($V_D > 0V$), o produto ($p.n > n_i^2$) na região de transição, logo, o mecanismo de SRH passará a agir forçando a recombinação de portadores, sendo predominante a corrente de recombinação. Quando a tensão ($V_D < 0V$), o produto ($p.n < n_i^2$) na região de transição, logo, o mecanismo de SRH passará a agir forçando a geração de portadores, sendo predominante a corrente de geração. Quando o diodo está polarizado reversamente e diretamente com baixas tensões de polarização, a corrente de geração e recombinação será maior que a corrente de difusão. A corrente de difusão é predominante para altas tensões de polarização, conforme Figura 22.

Figura 22 – Correntes de difusão, geração e recombinação em uma junção PN real



Fonte: [19]

4 FOTODETECTORES CMOS SOI

Os fotodetectores são dispositivos semicondutores que possuem a capacidade de converter o sinal óptico em um sinal elétrico (conversão de fótons em portadores livres). As topologias são divididas de acordo com sua aplicação e com o comprimento de onda. Em sistemas de imagem e comunicações ópticas os fotodetectores devem apresentar as seguintes características:

- a) Sistemas de imagem – Alta eficiência quântica para todos os comprimentos de ondas visíveis no espectro, alta responsividade e baixa corrente de escuro;
- b) Comunicações ópticas – Alta largura de banda (Hz) e grande sensibilidade;

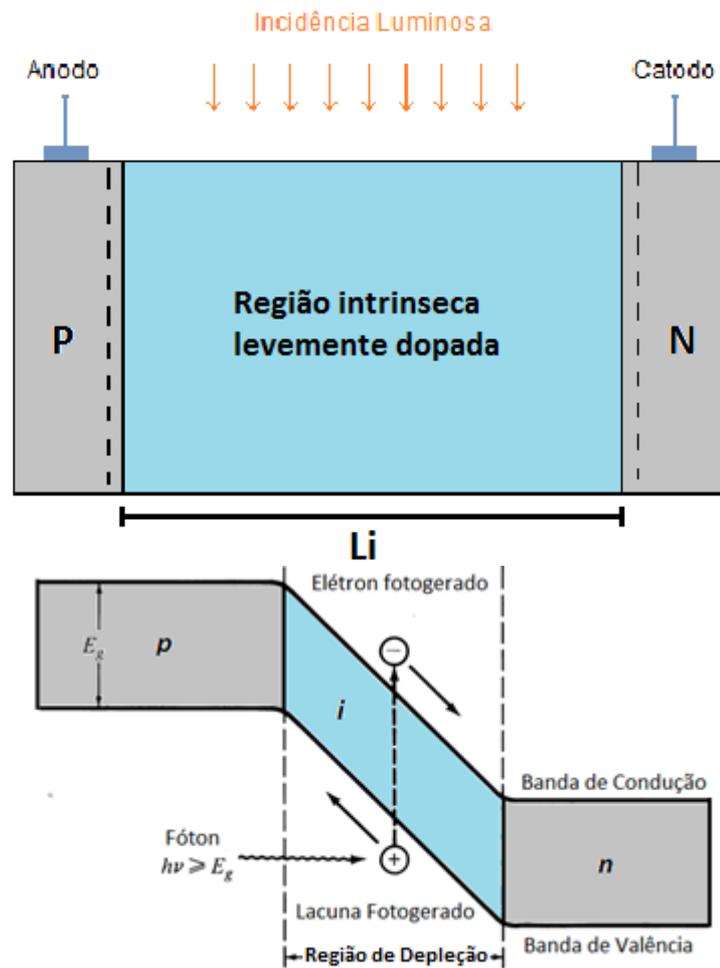
Podem ser usados para detectar a presença ou ausência de pequenas quantidades de luz, podendo ser calibrados para medições com intensidades abaixo de 1 pW/cm^2 e acima de 100 mW/cm^2 . Os fotodetectores em silício são utilizados em diversas aplicações, como: Instrumentos médicos, comunicações ópticas, caracterização de superfície, sensores de imagem, análise de DNA, sensores de posições ópticos, instrumentação analítica, fotográfica, espectroscopia entre outros.

Nos estudos da fotodeteção, espera-se que toda a energia luminosa possa ser convertida em sinal elétrico, garantido que o desempenho seja 100% em todos os índices de eficiência quântica. Como este feito é impossível de acontecer devido as perdas ocorridos no dispositivo, a comunidade científica busca novas alternativas (tecnologias e topologias) para que essas perdas possam ser os menores possíveis. Neste capítulo iremos abordar as tecnologias CMOS, CMOS SOI para fotodiodos e fotodiodos PIN.

4.1 FOTODIODO PIN

O fotodiodo PIN é mais rápido e sensível que os diodos de junção PN [9]. Sua estrutura consiste das junções PN separadas por uma região intrínseca com dado comprimento (L_i). A região intrínseca pode ser tanto o material N ou P com baixas concentrações de portadores, conforme Figura 23. Esta região (intrínseca) pode ser totalmente depletada ou não, dependendo da tensão aplicada e da sua dopagem.

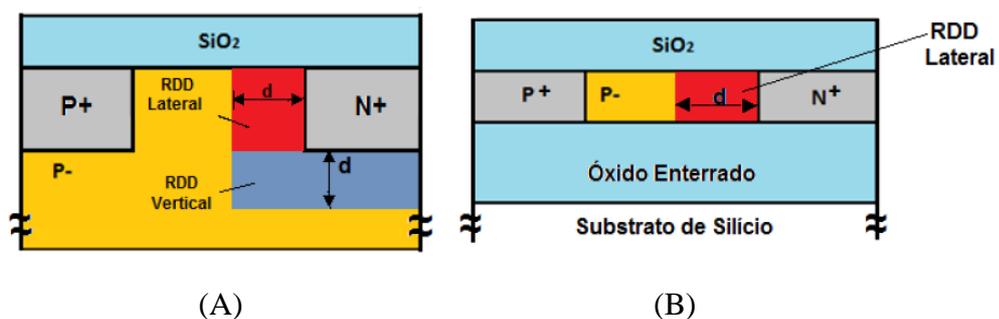
Figura 23 – Fotodiodo PIN.



Fonte: Autor

Quando a luz é incidida sobre a área fotossensível (região intrínseca) são gerados pares elétron-lacuna dentro da RDD, que são separados pela ação do campo elétrico, fazendo com que a corrente comece a fluir pelo dispositivo. Dependendo da tecnologia empregada na fabricação dos fotodiodos, a RDD pode ser formada horizontalmente e verticalmente conforme Figura 24-A e 24-B.

Figura 24 – A) Fotodiodo PIN CMOS, B) Fotodiodo PIN CMOS SOI



Fonte: [9]

Conforme discutidos nos capítulos anteriores, a profundidade de penetração da onda eletromagnética varia de acordo com o seu comprimento de onda [19] [23], ou seja, quanto menor o comprimento de onda, menor será sua profundidade de penetração. Por isso, os fotodiodos PIN, normalmente são empregados para detecção de comprimentos de onda pequenos, pois os portadores gerados por estes comprimentos podem contribuir de forma mais eficiente para a fotocorrente, já que a região de depleção se inicia desde a primeira interface óxido-silício do dispositivo.

Além disso, dentro da RDD a taxa de recombinação é menor que nas regiões N e P, portanto, para se ter um bom rendimento, os fotodiodos PIN operam com polarizações reversas para aumentar a camada de depleção no intuito de absorver uma quantidade maior de luz. Os pares elétron-lacuna gerados devem ser separados rapidamente pela ação do campo elétrico no intuito de evitar a recombinação. Entretanto, para se ter um campo elétrico interno elevado, é necessária uma região de depleção pequena [20]. Desta forma, há um compromisso na determinação da RDD, pois a mesma deve ser grande o suficiente para permitir uma maior conversão dos fótons, e suficientemente pequena para diminuir o tempo de trânsito dos portadores fotogerados [24].

Além da corrente fotogerada (I_{FG}), outro parâmetro importante no desempenho dos fotodiodos PIN, é a sua corrente de escuro (I_{DARK}), que nada mais é que a corrente de fuga do dispositivo quando o mesmo está polarizado reversamente, sem a incidência de luz. Esta corrente é gerada devido à geração térmica dos pares elétron-lacuna dentro da RDD, pois acima de $T \approx 0K$, os elétrons podem adquirir energia suficiente para transitar da banda de valência para condução devido às vibrações da rede cristalina [1]. Esta corrente é proporcional a área de junção, e para uma área fixa, a mesma varia com a profundidade do diodo (W) e espessura da camada de silício (t_{si}). Portanto a corrente total (I_T) que flui nos fotodiodos PIN, consiste na somatória da corrente fotogerada (I_{FG}) com a de escuro (I_{DARK}), conforme Equação (34):

$$I_T = I_{FG} + I_{DARK} \quad (34)$$

4.2 TECNOLOGIA CMOS PARA FOTODIODOS

A tecnologia CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) foi proposta em 1963, através da porta inversora CMOS composta por transistores nMOS e pMOS em série [18]. Na década de 80 sua utilização foi mandatória, pois não havia nenhuma tecnologia que

garantissem baixa dissipação de potência numa pequena área de silício com dezenas e centenas de milhões de componentes integrados. Com o surgimento de câmeras fotográficas acopladas nos celulares, canetas, brinquedos, computadores entre outros, os sensores ópticos ou fotodetectores CMOS, começaram a ser largamente utilizados, devido capacidade de integração e baixo custo de fabricação [18].

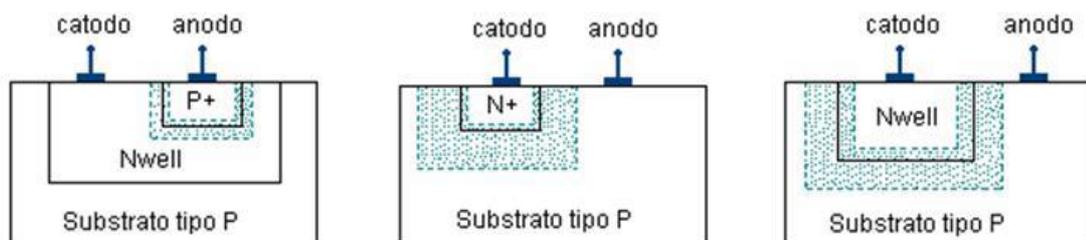
Nos capítulos anteriores, foi comentado que a profundidade de penetração depende do comprimento da radiação luminosa. Na Figura 13, com $\lambda=400\text{nm}$ a absorção deste comprimento será em torno de 80nm da camada de silício. Já para $\lambda=1000\text{nm}$, a absorção será em torno de 1000 μm , logo, verifica-se que existe uma diferença entre as profundidades de penetração [18]. Esta diferença mostra que os fotodetectores utilizados em sistemas de imagem, como exemplo, em câmeras fotográficas, devem ser capazes de absorver toda radiação luminosa no espectro visível, por isso, uma camada espessa de silício é necessária [1].

Aumentando espessura da camada do silício, a eficiência quântica também aumenta, mas sua velocidade de resposta é prejudicada, pois os portadores gerados no substrato terão que se difundir até a camada de depleção para então contribuir na fotocorrente. Por isso, os fotodetectores utilizados em tecnologia CMOS convencional possuem largura de banda geralmente abaixo de 100MHz [1], sendo inapropriados em aplicações que requerem alta velocidade de resposta [1].

4.2.1 Tipos básicos de fotodiodos convencionais verticais

Os três tipos de fotodiodos convencionais que utilizam o processo CMOS padrão, são conhecidos como: P+/N_{well}, N+/P_{SUB} e N_{well}/P_{SUB} [25], conforme Figura 25:

Figura 25 - Tipos básicos de fotodiodos em tecnologia CMOS: P+/N_{well}, N+/P_{SUB} e N_{well}/P_{SUB}



Fonte: [9]

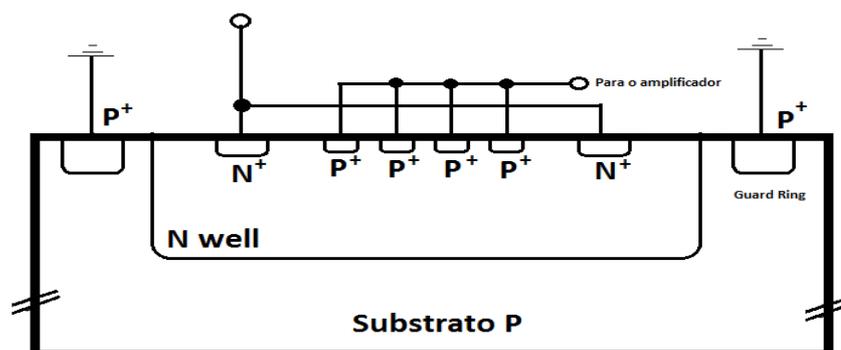
Verifica-se que a RDD formada entre as regiões fica em sua grande parte distante da superfície, acarretando baixa eficiência para comprimentos de onda curto. Outra coisa importante de se observar, é que a espessura da camada de depleção poderá ter variações, pois seu controle se torna difícil, sendo que a mesma depende das concentrações de dopantes que é um parâmetro da tecnologia empregada.

4.2.2 Fotodiodo PIN tipo multi-dedos

Os fotodiodos “multi-dedos” surgiram da extensão dos diodos verticais com pequenas modificações, onde a camada (P^+) foi substituída pelos dedos (P^-), a fim de melhorar a eficiência quântica para aplicações UV e DVD. Variando a distância entre os dedos, bem como seu comprimento, pode-se melhorar a sensibilidade e velocidade de resposta. Para curtas distâncias entre os dedos, os tempos de subida e descida do sinal ficaram abaixo de 0,25ns para comprimentos de onda na faixa do azul ($\lambda=400\text{nm}$), caracterizando uma largura de banda de 1GHz. Já para a faixa do vermelho com comprimentos de onda em torno de $\lambda=750\text{nm}$, os tempos de subida e descida ficaram próximos dos 30ns, devido ao retardo da difusão dos fotoportadores gerado no substrato [26].

Para reduzir os tempos na faixa do vermelho, os diodos multidedos foram construídos com uma camada N_{well} [27], conforme Figura 26. Neste tipo de configuração, a corrente de anodo fica isenta de portadores gerados no substrato. Com área de $16,5 \times 16,5 \mu\text{m}^2$, foi encontrado uma taxa de transmissão de dados de 1Gbit/s, entretanto sua responsividade era baixa devido a pequena junção formada entre P^+ / N_{well} variando de 0,01 a 0,04 A/W, dependendo da tensão reversa aplicada. A corrente de escuro para este dispositivo era baixa em torno de 1nA, comparada com outros fotodetectores de tecnologias convencionais.

Figura 26 – Fotodiodo multi-dedo em Nwell em tecnologia CMOS convencional de $0,35 \mu\text{m}$



4.3 TECNOLOGIA SOI PARA FOTODIODOS

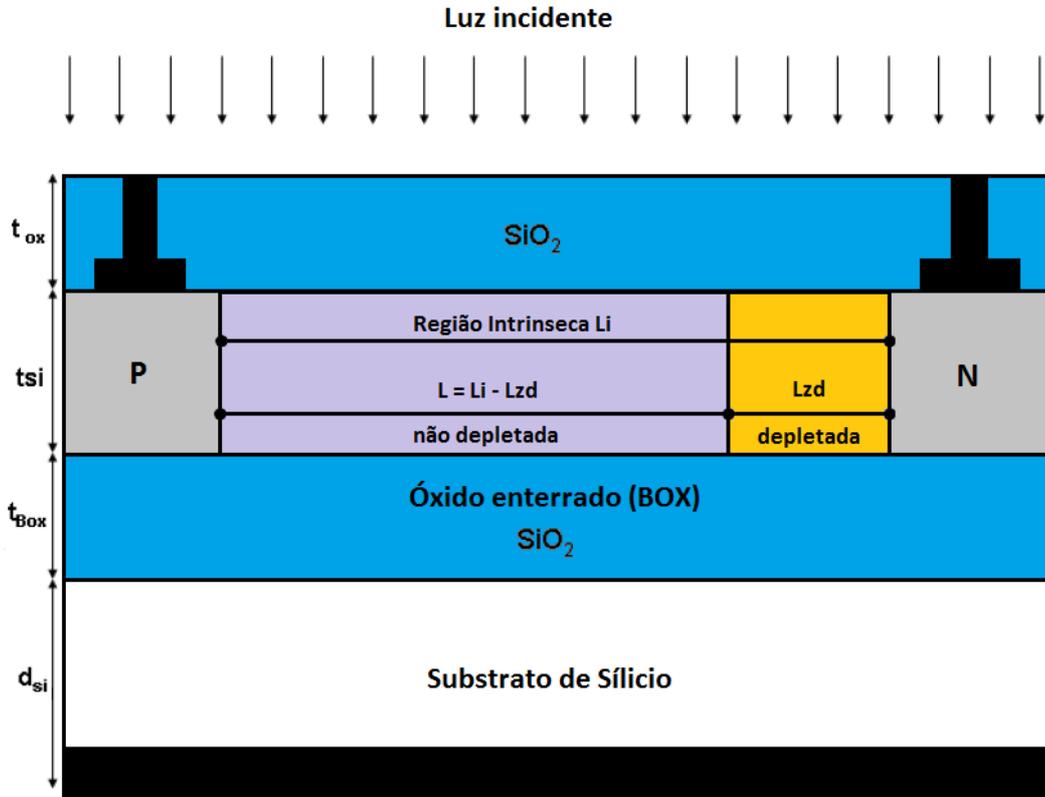
A tecnologia SOI (Silicon-On-Insulator), ou traduzindo para o português “silício sobre isolante”, surgiu com uma alternativa para a tecnologia MOS. Nesta tecnologia, os dispositivos são fabricados em uma camada fina de silício separada do restante do substrato por um material isolante. A isolação entre os dispositivos e o substrato permite minimizar, ou em alguns casos, suprimir os efeitos parasitários decorrentes da redução das dimensões da tecnologia MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) convencional. Esta tecnologia apresenta vantagens em relação à tecnologia MOS no desempenho dos transistores e circuitos, tais como menor inclinação sublimiar, maior transcondutância, maior imunidade à radiação e eliminação do efeito de tiristor parasitário [28] [29]. Além das grandes vantagens aplicadas aos transistores, os circuitos de amostragem aplicados aos fotodetectores, apresentaram melhor imunidade ao efeito de corpo na tecnologia SOI quando comparada com a CMOS convencional [30].

4.3.1 Fotodetectores SOI

Na maioria dos processos SOI, são utilizadas camadas silício mais finas que 100nm [1]. Com estas condições, apenas os dispositivos laterais, tais como os fotodiodos PIN SOI (Figura 27), pode ser considerado, pois se torna muito difícil a implementação desta tecnologia em dispositivos verticais, que necessitariam de uma camada mais espessa para se obter eficiências quânticas aceitáveis.

Estes fotodetectores são muito utilizados em aplicações que envolvam comprimentos de ondas curtos, na ordem de 400nm, pois a profundidade de absorção é de apenas algumas dezenas de nanômetros [1].

Figura 27 – Fotodiodo PIN CMOS SOI lateral



Fonte: Autor “adaptado de” [1]

Este dispositivo apresenta baixa corrente de escuro e excelente desempenho em termos de velocidade de resposta [31]. Estas vantagens são alcançadas devido à presença do óxido enterrado, que isola a região de depleção dos fotoportadores gerados no substrato e ao mesmo tempo diminui a área de junção. Sendo assim, são utilizados nas aplicações de DVD [43], medicina, medição de concentração de proteínas, DNA, detecção de raios UV e ozônio que possuem comprimentos de onda na faixa de $\lambda=390\text{nm}$. O comprimento da região de depleção horizontal (L_{ZD}) é dado pela Equação (35) [1].

$$L_{ZD} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_{si} (V_{BI} - V_D) \cdot (N_A + N_D)}{q \cdot N_A \cdot N_D}} \quad (35)$$

5 EFEITOS DA TEMPERATURA NOS SEMICONDUTORES

A temperatura é uma variável de extrema importância a ser considerada nos projetos ou quaisquer circuitos eletrônicos. Diretamente ou indiretamente ela afeta quase todas as características elétricas dos semicondutores, como seu desempenho e confiabilidade [15]. Apesar do silício suportar altas temperaturas, as mudanças das características elétricas com a temperatura podem resultar em um sistema instável [15] [18].

5.1 O EFEITO DA TEMPERATURA NA CONCENTRAÇÃO DE PORTADORES

A concentração intrínseca dos portadores (n_i) no semicondutor representa a quantidade de portadores livres gerados pela excitação térmica, sendo dependente apenas do material e da temperatura. Em 0K não há portadores livres. Ao aumentar a temperatura, os elétrons ganham energia suficiente para transitar da banda de valência para banda de condução, tornando-se um elétron livre, gerando então os pares elétron-lacunas. Portanto, a concentração intrínseca dependendo da temperatura é dada pela Equação (36) [21].

$$n_i = \sqrt{N_C \cdot N_V} \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (36)$$

Onde (N_C) e (N_V) são respectivamente, as densidades de estados das bandas da condução e valência.

A largura da faixa proibida do silício (E_g) também depende da temperatura, dada pelas Equações (37) e (38) segundo [22]:

$$E_g = 1,17 + 1,059 \cdot 10^{-5} \cdot T - 6,05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \rightarrow \text{para } T \leq 170K \quad (37)$$

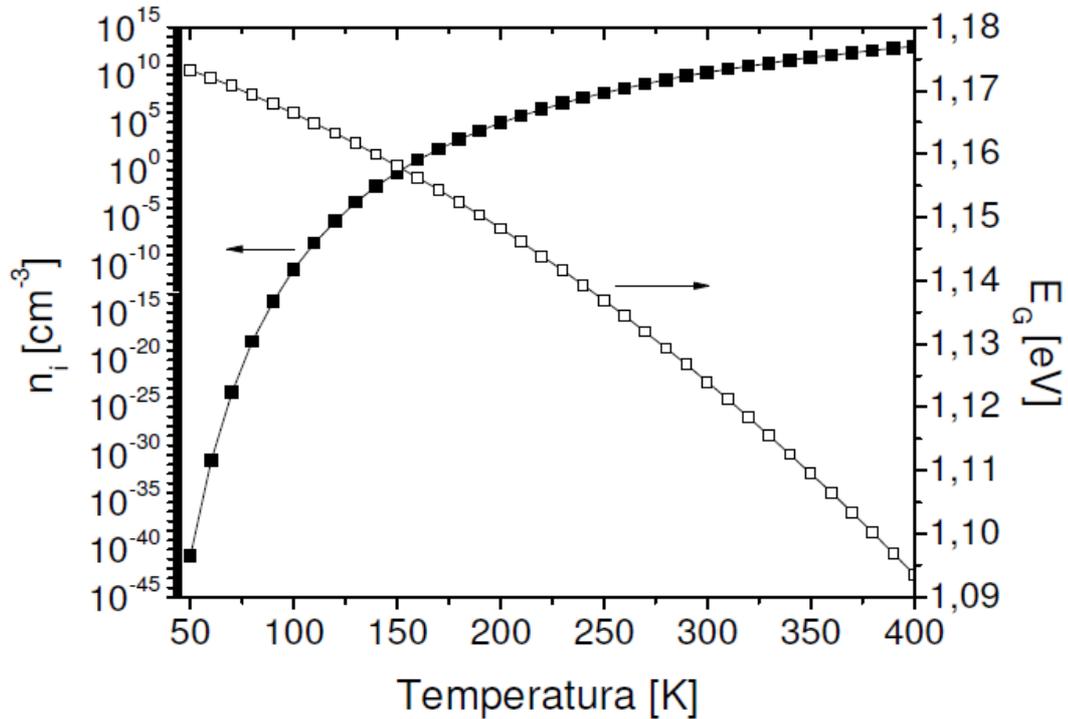
ou

$$E_g = 1,1785 - 9,025 \cdot 10^{-5} \cdot T - 3,05 \cdot 10^{-1} \cdot T^2 \rightarrow \text{para } T > 170K \quad (38)$$

A Figura 28 mostra a variação da concentração intrínseca de portadores (n_i) e da largura de faixa proibida do silício (E_g) com a temperatura entre 50 K e 400 K. Pode-se notar que conforme a temperatura aumenta a largura da faixa proibida diminui, com isso, os elétrons da banda de valência conseguem “saltar” com mais facilidade para a banda de

condução, pois a energia entre as bandas começa a diminuir, enquanto a concentração intrínseca aumenta, contribuindo para o aumento dos níveis de corrente.

Figura 28 – Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura de faixa proibida do silício em função da temperatura.

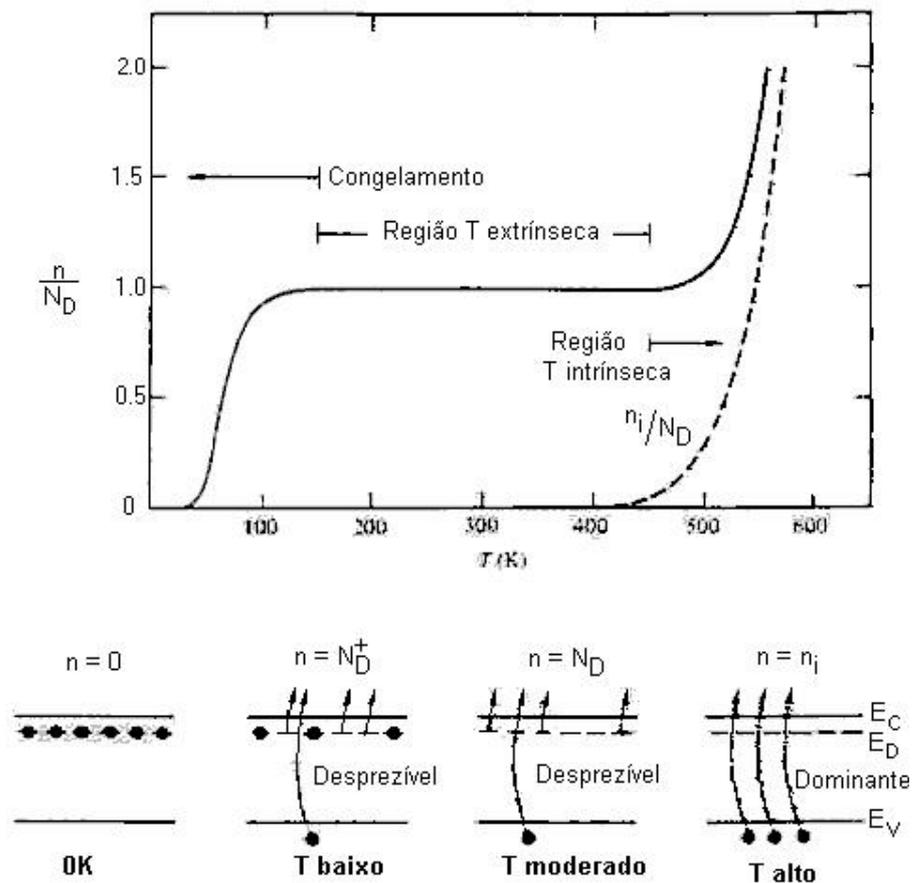


Fonte: [48]

As relações (15) e (16) mostram como as concentrações dos portadores variam com o nível de dopagem. Porém, elas também mostram que a concentração dos portadores depende da concentração (n_i) do material, sendo que esta por sua vez, apresenta uma dependência exponencial com a temperatura. A Figura 29 ilustra como as concentrações de um material com dopagem uniforme variam com a temperatura. Em $T \approx 0\text{K}$, a concentração de elétrons é zero, pois todos os elétrons ocuparão os estados de baixa energia, com os elétrons extras dos átomos doadores retornando aos seus respectivos estados originais. Aumentando a temperatura T com níveis relativamente baixos (T baixo), tem-se que uma fração extra dos elétrons dos átomos doadores transita do nível de Fermi para a banda de condução, e uma eventual e desprezível geração de pares elétron-lacuna ocorre a partir das transições banda a banda (valência para condução). A faixa de temperatura onde a fração dos átomos doadores está ionizada é chamada de região de congelamento ($T < 100\text{K}$ para o silício). Para temperaturas acima da faixa de congelamento, temos uma faixa de temperatura chamada de região extrínseca de temperatura. Nesta faixa temos que, todos os átomos doadores estão

ionizados, e a relação $n_i < N_D$ e $n \cong N_D$ continua válida. Aumentando ainda mais a temperatura, acima da faixa da região extrínseca, as aproximações acima não serão mais verdadeiras, pois a geração de pares elétron-lacuna por transição direta da banda de valência para a banda de condução causa um incremento considerável na concentração de portadores minoritários [18]. Logo, a concentração intrínseca de portadores torna-se relativamente considerável. Nesta situação o semiconductor pode voltar a se tornar novamente intrínseco, caso a temperatura seja tão alta, na qual a concentração intrínseca de portadores seja superior a concentração de dopagem.

Figura 29 – Variação da concentração de portadores majoritários no Si tipo n com dopagem $N_D=10.15\text{cm}^{-3}$. A curva tracejada representa a concentração intrínseca de portadores



Fonte: [18]

5.2 VARIACÃO DA TEMPERATURA NA CORRENTE DE ESCURO

Conforme discutido nos capítulos anteriores, a corrente total reversa, também conhecida como I_{DARK} em um diodo PIN totalmente depletado pode ser aproximada pela Equação (39) [19]:

$$I_{\text{DARK}} = q \cdot A \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_P}{\tau_P}} \right) + \frac{q \cdot n_i \cdot W}{\tau_s} \quad (39)$$

Sendo (W) a largura da região de depleção e (τ_s) o tempo de vida efetivo da geração térmica na região de depleção.

Na Equação (39), o primeiro termo representa a componente de difusão da região neutra que é proporcional a (n_i^2) e o segundo termo representa a corrente de geração térmica na RDD que é proporcional a (n_i). Nota-se que ambos os termos são dependentes de (n_i) e conseqüentemente da temperatura, sendo assim, a eficiência do dispositivo começa a diminuir com o aumento da temperatura, devido ao acréscimo da corrente de escuro.

Não existem portadores livres para temperatura em 0K, sendo que todos os estados energéticos da faixa de valência estão ocupados por elétrons e todos os estados energéticos da faixa de condução estão desocupados. Portanto, nesta temperatura o material possui comportamento de um isolante. Quando a temperatura aumenta, pares elétron-lacuna são gerados devido a excitação térmica, com isso, alguns elétrons transitam da banda de valência para banda de condução, deixando um número igual de estados desocupados na banda de valência. Quanto mais alta for a temperatura, mais estados da faixa de condução se tornam ocupados e mais estados da faixa de valência tornam-se desocupados, contribuindo para o aumento da corrente devido à geração térmica.

Nos semicondutores que possuem concentrações intrínsecas (n_i) baixas, a corrente de geração é a dominante na corrente de escuro, já para temperaturas altas, a corrente de difusão é mandatória, pois (n_i) torna-se grande. Estes efeitos ocorrem para o silício.

Para os diodos PIN lateral (dispositivo estudado neste trabalho), a corrente de escuro também pode ser denominada pelo volume térmico (Shockley-Read-Hall) e pela corrente de geração de superfície (I_{rg}) conforme Equação (40) [19] [1]:

$$I_{rg} = \frac{q \cdot n_i}{2 \cdot \tau_{eff}} m \cdot W \cdot t_{si} \cdot \min(L_i, L_{Zd}) \cdot \left(e^{\frac{V_D}{2 \cdot U_t}} - 1 \right) \quad (40)$$

Sendo (I_{rg}) a corrente de geração de superfície, (L_i) o comprimento da região intrínseca, (m) o número de dedos, (U_t) o potencial térmico, (t_{si}) a espessura do silício, (V_D) a tensão de polarização e (\min) que representa o valor mínimo de L_i e L_{ZD} .

5.3 VARIAÇÃO DA MOBILIDADE COM A TEMPERTATURA

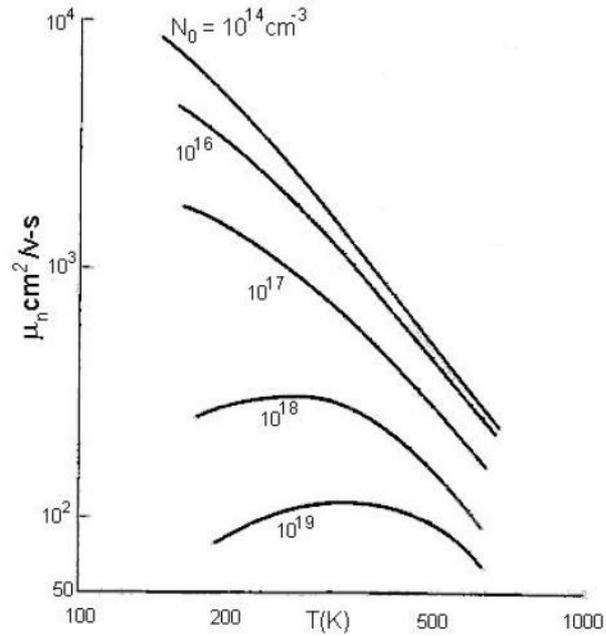
A mobilidade dos portadores pode ser entendida como a facilidade dos elétrons e lacunas atravessarem a rede cristalina de um dado material. Este parâmetro está relacionado diretamente com a capacidade de fornecimento de energia do dispositivo. Quanto menor for à resistência do material, menor será a perda de energia, resultando numa maior mobilidade dos portadores.

No interior do material, o movimento dos elétrons não é livre, ocorrendo colisões entre portadores e átomos da rede cristalina. A mobilidade dos portadores é influenciada principalmente pelas impurezas do material e pela temperatura, conforme Figura 30. Essas colisões ocorrem devido aos mecanismos de espalhamento, que podem ser classificados como [32]:

- a) **ESPALHAMENTO DE REDE OU ESPALHAMENTO POR FÔNONS:** É um dos mais importantes mecanismos de espalhamento, está relacionado às interações entre os portadores e a vibração da rede cristalina, também chamada de fônons. Este mecanismo está diretamente relacionado com a temperatura, onde as vibrações diminuem com a redução de temperatura [32];
- b) **ESPALHAMENTO POR IMPUREZAS IONIZADAS:** Este mecanismo considera a redução da mobilidade dos portadores devido às altas concentrações de dopantes introduzidas na rede cristalina do material [32];
- c) **ESPALHAMENTO PORTADOR-PORTADOR:** O mecanismo de espalhamento portador-portador exerce influência sobre a mobilidade em altas densidades de portadores, como em dispositivos de potência, quando a quantidade de portadores supera a de dopantes [32], ou em dispositivos submicrométricos, que apresentam altas densidades de corrente;

d) ESPALHAMENTO POR IMPUREZAS NEUTRAS: Este mecanismo está relacionado às impurezas não ionizadas em baixas temperaturas e tem influência sobre a mobilidade apenas para concentrações de impurezas neutras acima de 10^{18}cm^{-3} [32];

Figura 30 – Variação da mobilidade de elétrons no silício com a temperatura



Fonte: [31]

6 DESEMPENHO DOS FOTODETECTORES

Um fotodetector tem a função de converter um sinal óptico em um sinal elétrico. O ideal seria detectar todos os fótons incidentes, independente do seu comprimento de onda e transformá-los em um sinal elétrico sem a presença de ruídos ou perdas. Entretanto, isso não é possível, pois todos os fotodetectores possuem perdas durante a conversão. Para medir a eficiência dos dispositivos, este capítulo irá discutir algumas figuras de mérito responsáveis por estas medições.

6.1 EFICIÊNCIA QUÂNTICA

A eficiência quântica total (EQ_T) é definida como sendo a razão entre a corrente fotogerada (I_{FG}) e a máxima corrente que poderia ter sido gerada se todos os fótons fossem convertidos em fotoportadores, ou seja, gerando pares elétrons-lacunas [19]. Sendo assim a EQ_T é dada pela Equação (41).

$$EQ_T = \frac{I_{FG}}{I_{FG(máx)}} \quad (41)$$

Idealmente, a eficiência quântica total seria 100% se cada fóton gerasse um par elétron-lacuna, porém a eficiência real do dispositivo é limitada por três fatores:

a)PELA ÁREA FOTOSSENSÍVEL: Uma parte da área total do dispositivo, (A_T), não pode ser considerada fotoativa, porque a luz não consegue penetrar no semicondutor, já que o mesmo está coberto com metal. O óxido ou silício podem refletir parte da radiação luminosa incidente. Este efeito pode ser minimizado com a utilização de coberturas anti-reflexivas [33]. Sendo assim, pode-se definir então, a eficiência quântica externa (EQ_E) que corresponde apenas à eficiência da área fotossensível (A_{FS}) do dispositivo que pode ser calculada através da Equação (42) [34].

$$EQ_T = \frac{A_{FS}}{A_T} EQ_E \quad (42)$$

b) **PELAS REFLEXÕES:** Qualquer estrutura sob incidência de luz possui perdas por reflexão e transmissão, conforme discutido nos capítulos anteriores. Nem toda a potência luminosa incidente (P_{IN}) é absorvida pelo dispositivo (P_A). A razão entre (P_A) e (P_{IN}) é dependente do comprimento de onda e da profundidade do semicondutor, conhecida como máxima eficiência alcançável (η), dada pela Equação (43).

$$\eta = \frac{P_A}{P_{IN}} \quad (43)$$

c) **PELA RECOMBINAÇÃO:** Nem todos os portadores que foram gerados pelos fótons incidentes serão coletados pelos terminais do fotodiodo, sendo que alguns deles se recombinarão, principalmente fora da RDD. Os portadores gerados fora da RDD devem primeiramente se difundir para dentro da RDD. Como o processo da difusão é um fenômeno lento, a recombinação aumenta. Nesse caso, a eficiência quântica interna (EQ_I) do dispositivo, levando em consideração apenas as perdas por recombinação é dada por [34] através da Equação (44).

$$EQ_I = \frac{I_{FG}}{I_{DISP}} \quad (44)$$

Sendo que (I_{FG}) é a corrente fotogerada e (I_{DISP}) é a corrente disponível no dispositivo, ou seja, seria a corrente fotogerada se não houvesse perdas por recombinação.

Sendo assim, a expressão final da eficiência quântica total (EQ_T) considerando os três limitadores citados acima, é dada através da Equação (45).

$$EQ_T = \frac{P_A}{P_{IN}} \frac{A_{FS}}{A_T} EQ_I \quad (45)$$

6.2 RESPONSABILIDADE

A responsividade (R) é definida como sendo a relação da corrente fotogerada (I_{FG}) e a potência óptica incidente (P_{IN}) [17], dada pela Equação (46).

$$R = \frac{I_{FG}}{P_{IN}} \quad (46)$$

Sabendo que a corrente fotogerada é a corrente total menos a corrente de escuro, então a responsividade pode ser calculada de outra forma, de acordo com a Equação (47).

$$R = \frac{I_T - I_{DARK}}{P_{IN}} \quad (47)$$

6.3 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

A corrente de escuro presente em um fotodetector é na verdade, uma forma de ruído inerente a estes tipos de dispositivos. Portanto, pode ser definida uma relação sinal ruído (SNR) através da Equação (48).

$$SNR = \frac{I_{FG}}{I_{DARK}} = \frac{I_T - I_{DARK}}{I_{DARK}} \quad (48)$$

Esta relação pode também ser expressa em decibéis (dB) e a mesma é altamente influenciada pela temperatura.

6.4 SENSIBILIDADE

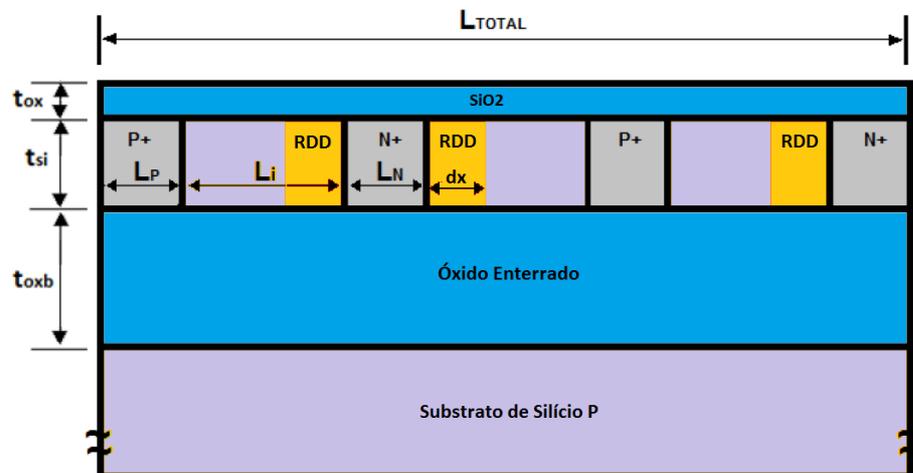
A sensibilidade é a medida da mínima potência detectável [1] do sinal incidente e dependente da corrente de escuro, da responsividade e do ruído total do sensor (incluindo o ruído do circuito de leitura). A sensibilidade é um parâmetro chave nos detectores ópticos porque por mais alta que seja a sua responsividade, pode ser que ele não seja sensível a uma determinada potência de sinal mais baixa, ou seja, a sua corrente fotogerada e a sua corrente de escuro não seriam distinguíveis uma da outra. Em comunicações ópticas e transferência de dados, este parâmetro pode muitas vezes ser expresso como a potência média para atingir uma taxa de erro de bit, conhecida como BER (Bit Error Rate) [1] [9].

7 SIMULAÇÕES, MEDIDAS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os dispositivos fotodetectores geralmente ocupam uma área grande na lâmina de silício, por volta de $500\mu\text{m}^2$ ou até 1mm^2 [1] [9]. A fim de aumentar a área fotossensível e consequentemente, a absorção da luz incidente, os fotodiodos PIN são formados de vários dedos, conforme Figura 31, que mostra um fotodiodo PIN CMOS SOI composto de três dedos, sendo que cada dedo é constituído de regiões P+N+ intercalados por uma região intrínseca de comprimento L_i cujo leiaute (Figura 32) foi desenvolvido na UC Louvain em tecnologia ST 0.13 μm PD (PD – Parcialmente Depletado) com comprimentos intrínsecos diferentes. Alguns dos seus parâmetros importantes podem ser vistos na Tabela 1. Neste capítulo será analisada a detecção de comprimentos de ondas curtos, na faixa de ($\lambda=400\text{nm}$ - UV), utilizada na área biomédica e na de meio ambiente. Algumas destas aplicações requerem operações dos fotodiodos em altas temperaturas, sendo assim, as medidas e simulações foram feitas com temperaturas na faixa de 300K a 500K, com algumas polarizações de substrato (V_{BG}), a fim de entender o comportamento do dispositivo, com objetivo de subsidiar futuros projetos de fotodetectores PIN CMOS SOI na faixa do UV.

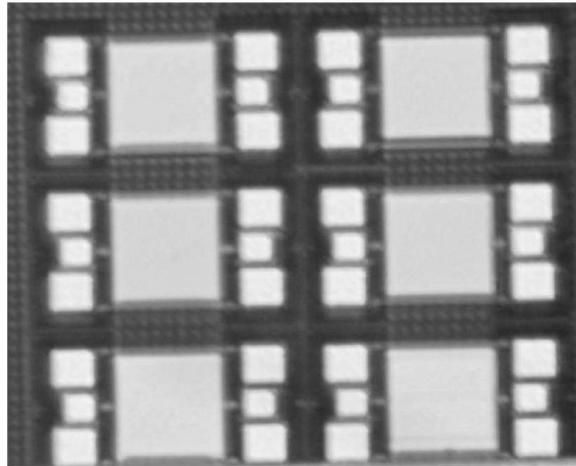
Para a realização das medidas experimentais foram utilizados os seguintes equipamentos: Keythley modelo 4200 para a caracterização elétrica dos transistores mostrado na Figura 33(a), um microprovador Cascade Microtech REL 3600 mostrado na Figura 33(b), um analisador de parâmetros de dispositivos semicondutores Agilent 4156C associado ao micro-refrigerador modelo K20 da MMR Technologies mostrados na Figura 33(c), com possibilidade de alteração de temperatura das amostras estudadas de 80K até 730K.

Figura 31 – Esquema de um fotodiodo PIN CMOS SOI de 3 dedos



Fonte: Autor “adaptado de” [9]

Figura 32 – Leiaute dos fotodiodos PIN SOI Lateral na tecnologia ST 0.13 μm PD SOI



Fonte: [1]

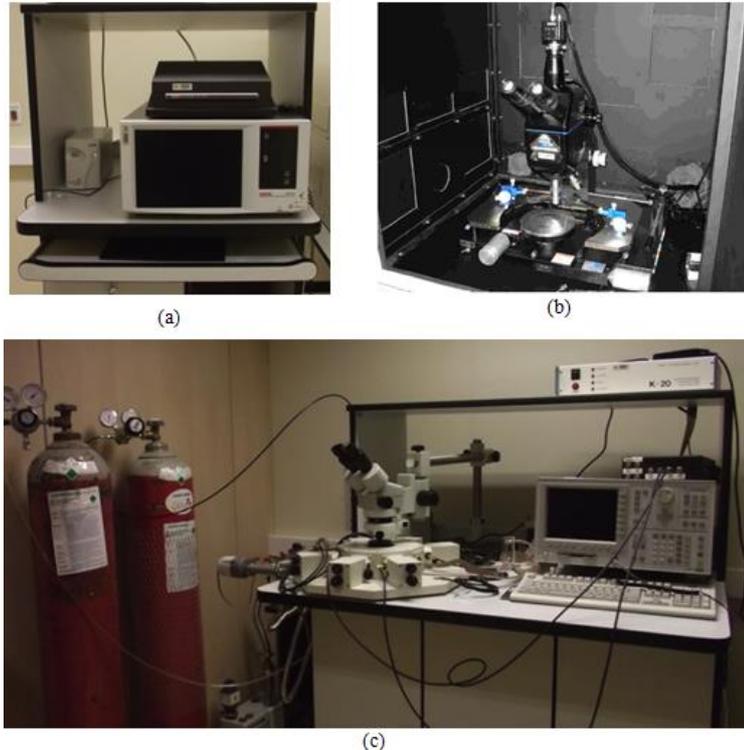
Tabela 1 – Parâmetros PIN CMOS SOI Lateral na tecnologia ST 0.13 μm PD SOI.

Parâmetro	Convencional
Espessura de Silício (t_{Si})	150nm
Espessura do óxido enterrado (t_{oxb})	390nm
Espessura do Óxido de passivação (t_{ox})	300nm
Concentração de dopantes intrínseca P ⁻ (N_{I})	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Concentração de dopantes N ⁺ (N_{D}) / P ⁺ (N_{A})	$1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

L_i (μm)	$L_n=L_p=L_{pn}$ (μm)	L_{tot} (μm)	Nº Dedos	W (μm)
1	1.36	249.16	105	250
2	1.36	250	75	250
5	1.36	249.4	39	250
10	1.36	251.28	22	250
100	1.36	204.08	2	250

Fonte: Autor

Figura 33– Fotos dos equipamentos disponíveis na sala de caracterização elétrica do Centro Universitário da FEI: (a) Analisador de parâmetros Keithley 4200, (b) Microprovador Cascade Microtech REL 3600 e (c) Analisador de parâmetros Agilent 4156C associado ao micro-refrigerador modelo K20



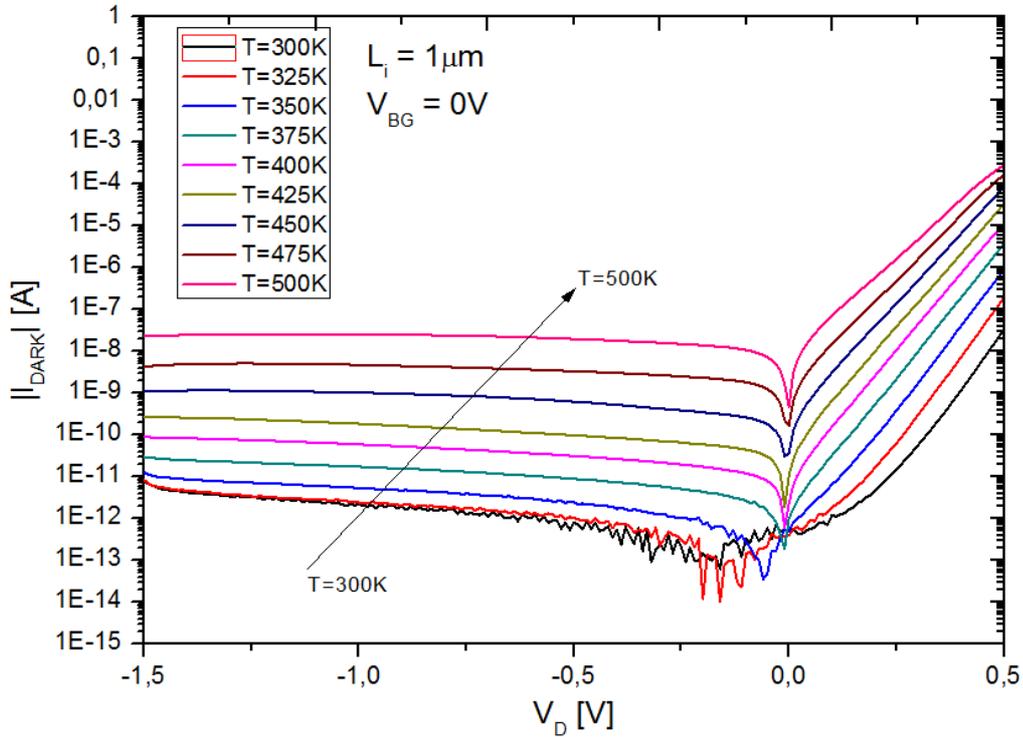
Fonte: Autor

7.1 EFEITOS DA TEMPERATURA E POLARIZAÇÃO DE SUBSTRATO NA CORRENTE DE ESCURO

Conforme discutido nos capítulos anteriores, a corrente de escuro é um parâmetro importante a ser investigado neste dispositivo. Sua existência é devida à geração térmica de pares elétron-lacuna dentro da região de depleção. Com o entendimento do seu comportamento, é possível averiguar o quanto sua dependência com as variações de temperatura e polarização de porta traseira (Back-Gate) irão afetar o desempenho do fotodiodo.

A Figura 34 mostra a corrente do fotodiodo PIN CMOS SOI com $L_i=1\mu\text{m}$ sem a influência da polarização de substrato ($V_{BG}=0V$). Nota-se que a corrente de escuro é exponencialmente relacionada ao aumento da temperatura. A dependência da I_{DARK} com a temperatura pode ser vista na Equação (39) discutida no capítulo 5.2, onde os termos da equação, que representam a difusão e geração térmica, são dependentes de (n_i) e consequentemente, da temperatura.

Figura 34 – Medida experimental do módulo da corrente de escuro com $L_i=1\mu\text{m}$ e $V_{BG}=0\text{V}$, em função de V_D



Fonte: Autor

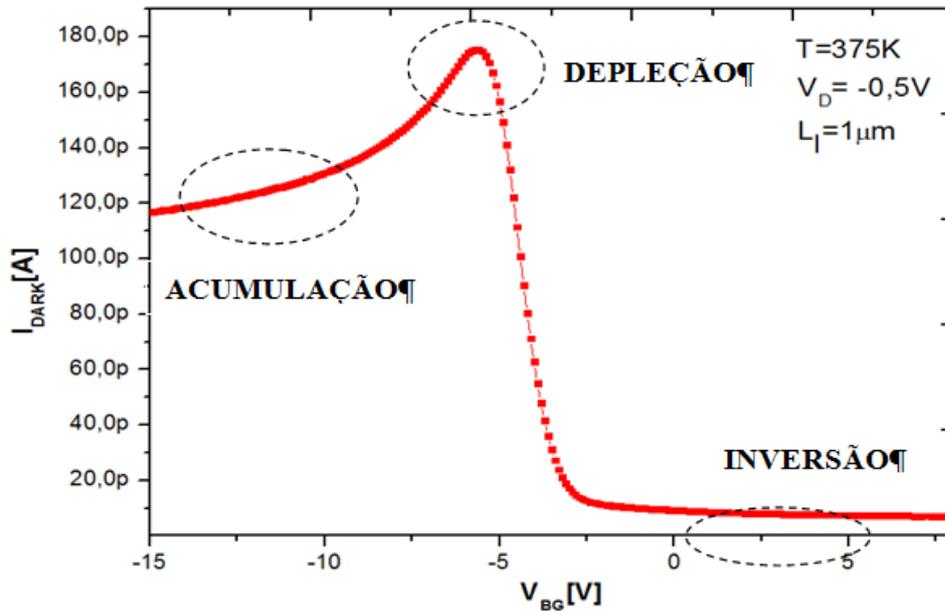
Ao variar a tensão de porta traseira é possível alterar os modos de operação do fotodiodo entre acumulação, inversão e depleção, conforme Figura 35, que representa a corrente I_{DARK} em função de V_{BG} para o fotodiodo de $L_i=1\mu\text{m}$. Para $V_{\text{BG}} < -7,5\text{V}$ o filme de silício está em regime de acumulação, conforme pode ser visto na Figura 36, que representa o corte no sentido da profundidade do silício, onde a concentração de lacunas para $V_{\text{BG}}=-20\text{V}$ é superior à concentração inicial ($N_i=1\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$), deixando claro o processo de acumulação. Logo, a junção entre a região N^+ e a região intrínseca está reversamente polarizada e os elétrons serão os portadores minoritários.

Para $V_{\text{BG}} > 2,5\text{V}$ o filme de silício está polarizado no modo inversão, onde a concentração de elétrons é superior a concentração de lacunas, conforme Figura 36 para $V_{\text{BG}}=+20\text{V}$. Neste caso, houve uma inversão de volume na região intrínseca e o filme de silício irá se comportar com o perfil de dopantes $P+N-N^+$ ao invés de $P+P-N^+$. Sendo que, a junção reversamente polarizada é formada pelas regiões P^+ e pela região intrínseca, onde as lacunas serão os portadores minoritários [35][42].

A Figura 37 mostra o deslocamento para direita das curvas I_{DARK} vs V_{BG} em altas temperaturas. Isso ocorre devido à temperatura ser responsável pela variação do potencial de junção (V_{BI}) conforme equação (24), pois o valor de (n_i) é alterado. Sendo assim, quanto

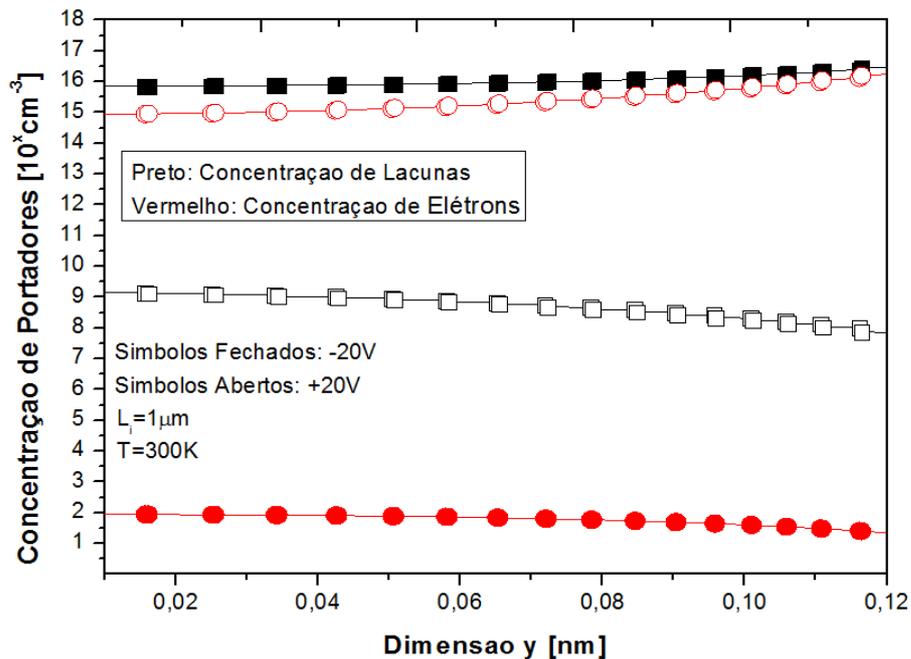
maior for a temperatura, maior será o valor de (n_i) , resultando em (V_{BI}) menores. Este efeito também pode ser observado na Figura 38. Além da temperatura modificar o potencial de contato, a polarização de porta traseira também modifica este potencial, conforme Figura 37. Isto ocorre devido ao (V_{BI}) ser dependente (N_A) ou (N_D) , uma vez que, estas concentrações aumentam com (V_{BG}) .

Figura 35 – Media experimental da corrente I_{DARK} vs V_{BG} para $L_i=1\mu m$



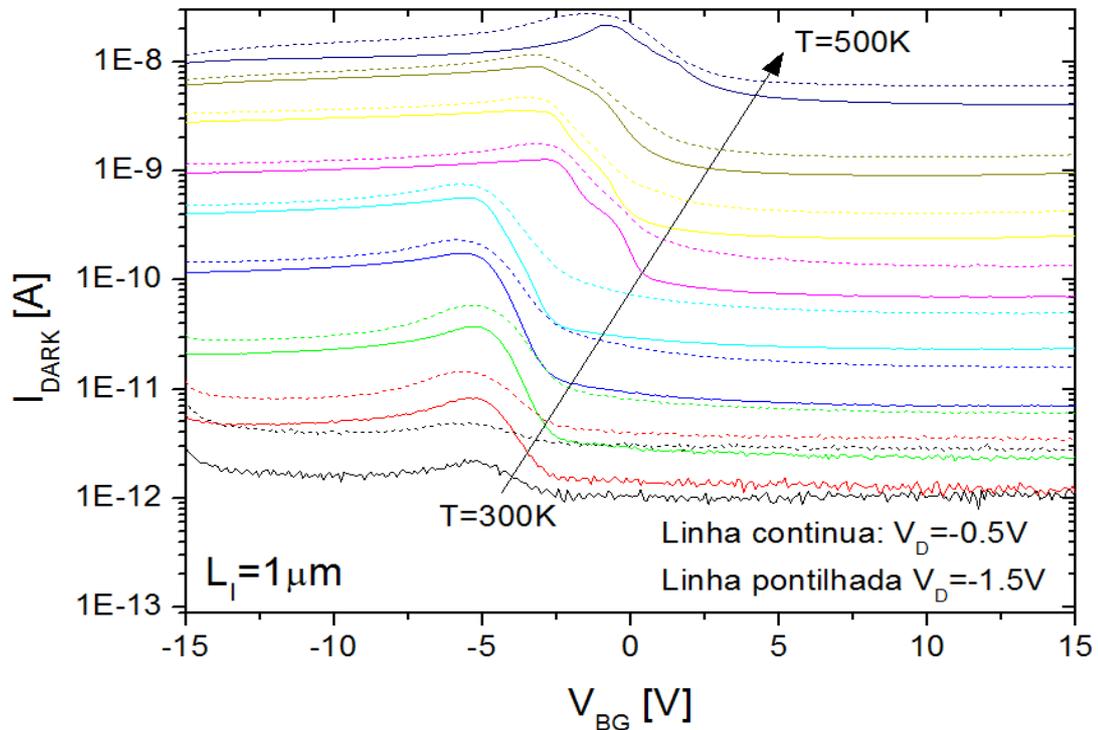
Fonte: Autor

Figura 36 – Simulação da concentração de lacunas e elétrons em função da profundidade do filme de silício para o fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=1\mu m$



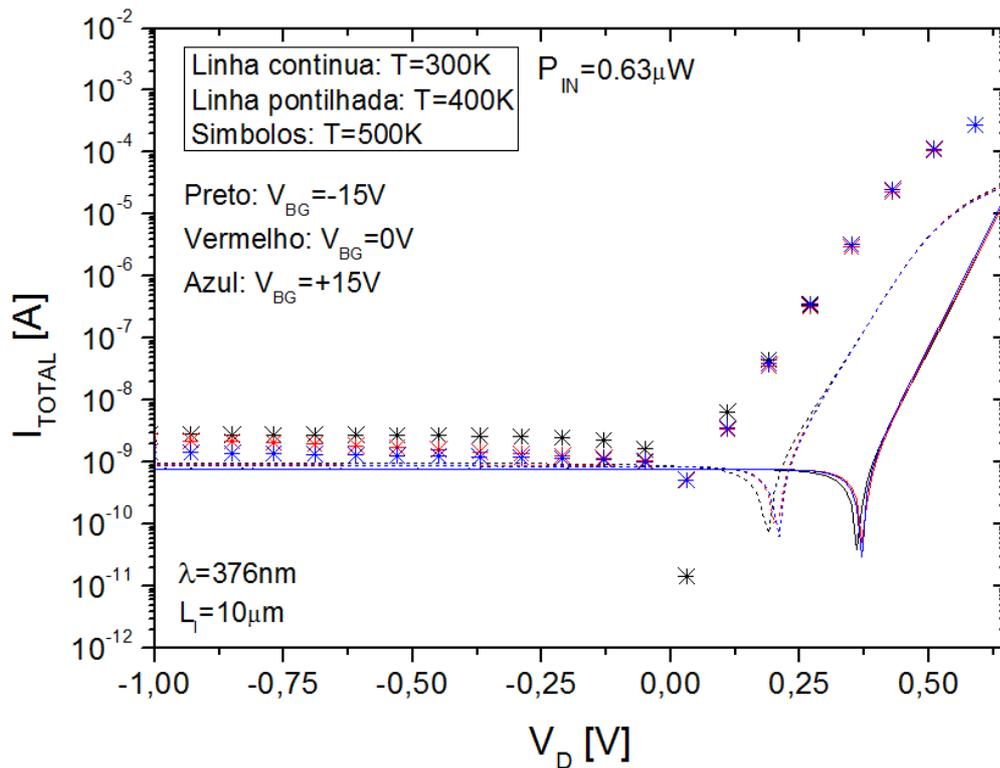
Fonte: Autor

Figura 37 – Medidas experimentais de I_{DARK} vs V_{BG} variando a temperatura de 300K à 500K para $L_i=1\mu\text{m}$



Fonte: Autor

Figura 38 – Medida experimental da corrente I_{TOTAL} vs V_D para $L_i=10\mu\text{m}$ iluminado com $\lambda=376\text{nm}$. Fonte

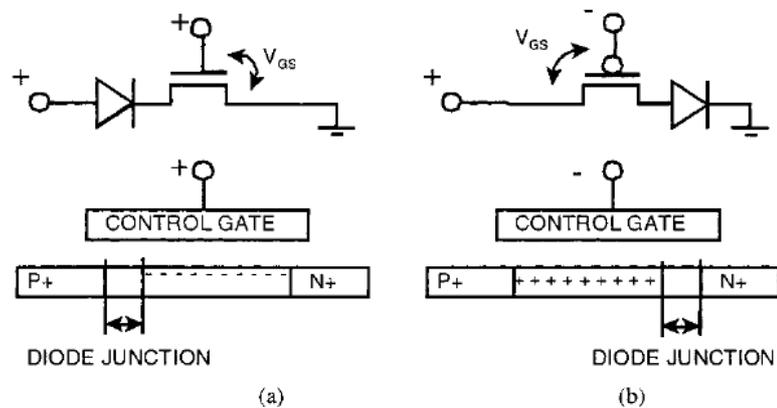


Fonte: Autor

Também se observa na Figura 37, que os níveis de corrente podem ser aumentados com valores mais negativos de (V_D). Este fenômeno ocorre devido ao campo elétrico interno gerado pelas cargas fixas da região de depleção somar-se com o campo elétrico externo gerado pelo potencial aplicado, resultando num aumento da RDD [43].

A fim de explorar ainda mais os efeitos causados pela polarização de substrato nos fotodiodos PIN, é possível utilizar um circuito equivalente de análise, conforme Figura 39.

Figura 39 – Esquema equivalente de um fotodiodo controlado pela polarização de porta traseira. A) Operando com polarização de porta positiva; B) Operando com polarização de porta negativa.



Fonte: [40]

Como a região intrínseca está sendo afetada pela porta traseira, o fotodiodo pode se comportar como um transistor de efeito de campo em série com um diodo[40] [44], o qual irá fornecer uma resistência em série dependente de (V_{DS}) e (V_{GS}). Dependendo da polarização, a região intrínseca pode se comportar como um transistor de canal tipo N ou tipo P.

Para tensões de porta positiva ($V_G > 0V$) a região intrínseca terá um acúmulo de elétrons, caracterizando um transistor NMOS com a junção metalúrgica formada entre a região P^+ e a região intrínseca (à esquerda do gate) conforme Figura 39-A. A densidade de elétrons acumulados ao longo do canal (qn) é proporcional a diferença entre a tensão de porta e fonte (V_{GS}) pela tensão de limiar (V_{TH}), conforme Equações (49) e (50) [40].

$$qn = C_{ox}(V_{GS} - V_{TH}) \quad (49)$$

$$(V_{GS} - V_{TH})_{Tipo-N} = V_G - V_{TH} \quad (50)$$

Sendo n a concentração de portadores.

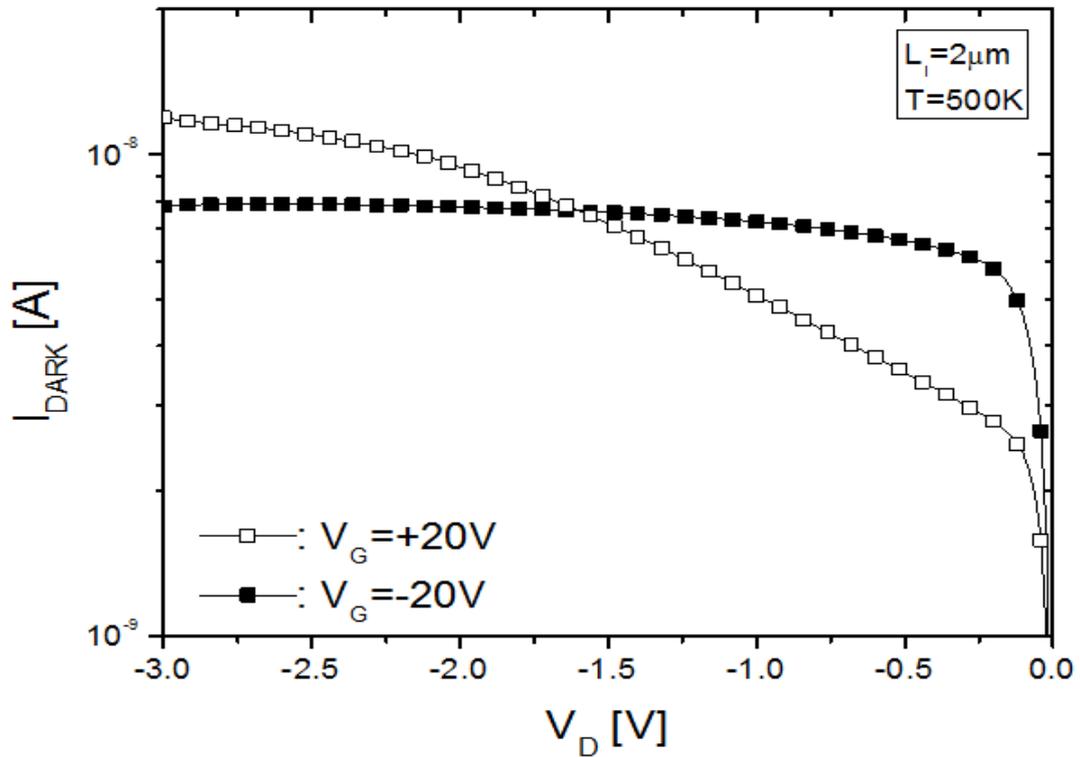
Aumentado a tensão de porta, a tensão entre porta-fonte do transistor (V_{GS}) também irá aumentar, pois $V_{GS}=V_G$, devido ao terminal da fonte do transistor possuir potencial zero. Logo, a resistência série diminuirá, resultando no aumento da corrente de escuro. Mantendo a tensão de porta constante com valores positivos, a concentração de portadores também será constante ao longo do canal N. Entretanto, se a tensão de polarização reversa (V_D) aumentar, a tensão (V_{GS}) não será afetada, mas a corrente (I_{DARK}) irá aumentar, devido ao aumento da região de depleção e do tunelamento dos elétrons livres, que resulta no aumento da concentração de portadores [44], conforme Figura 40.

Operando com tensões de porta negativa ($V_G < 0V$) a região intrínseca irá se comportar como um transistor PMOS, devido ao acúmulo de lacunas se estender ao longo do canal P. Nesta situação a junção metalúrgica passa a se localizar entre a região N^+ e a região intrínseca conforme Figura 39-B. Ao contrário da tensão de porta positiva, a tensão (V_{GS}) irá depender da tensão de porta e da tensão de polarização reversa, conforme Equação (51) [40].

$$|(V_{GS} - V_{TH})_{Tipo-P}| = |V_G - V_D - V_{TH}| \quad (51)$$

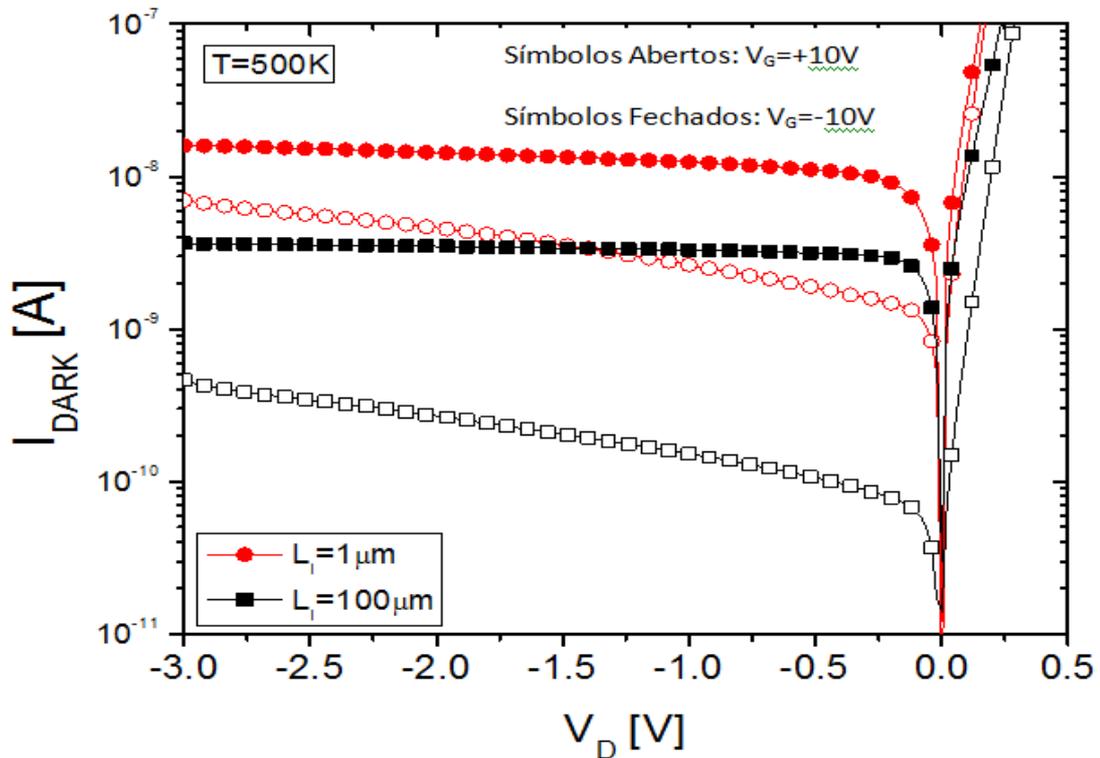
Segundo a Equação (51) operando com (V_G) negativo e aumentando ($-V_D$), a concentração de portadores da região P diminui. Aumentado (V_D) haverá um efeito concorrente na concentração de portadores ao longo do canal, ou seja, o aumento da polarização reversa provoca um aumento na concentração de portadores que deveria aumentar a corrente de escuro. Por outro lado, o aumento de (V_D) causa a redução de ($V_{GS}-V_{TH}$) que também representa a concentração de portadores, fazendo com que a (I_{DARK}) diminua. Desta forma, como existem dois efeitos concorrentes relativos ao aumento da tensão de polarização (V_D), a (I_{DARK}) tende a ficar constante, mesmo com a alteração de (V_D), conforme Figuras 40 e 41.

Figura 40 – Medida experimental da corrente de escuro em função da polarização reversa V_D para $L_i=2\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$



Fonte: Autor

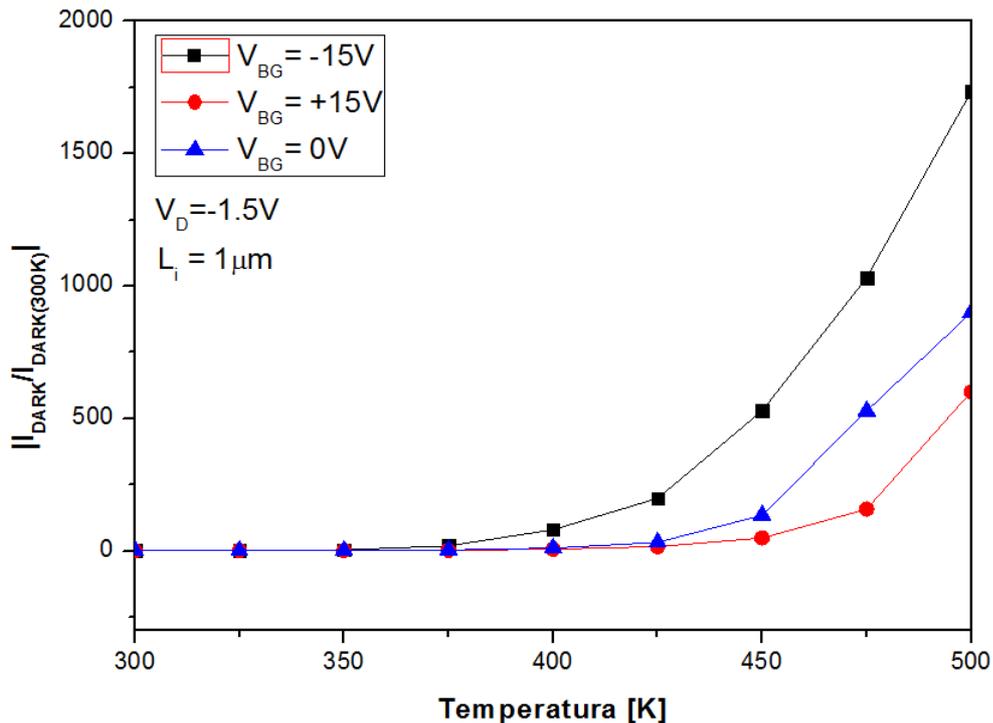
Figura 41 – Medida experimental da corrente de escuro em função da polarização reversa V_D para $L_i=1\mu\text{m}$ e $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$



Fonte: Autor

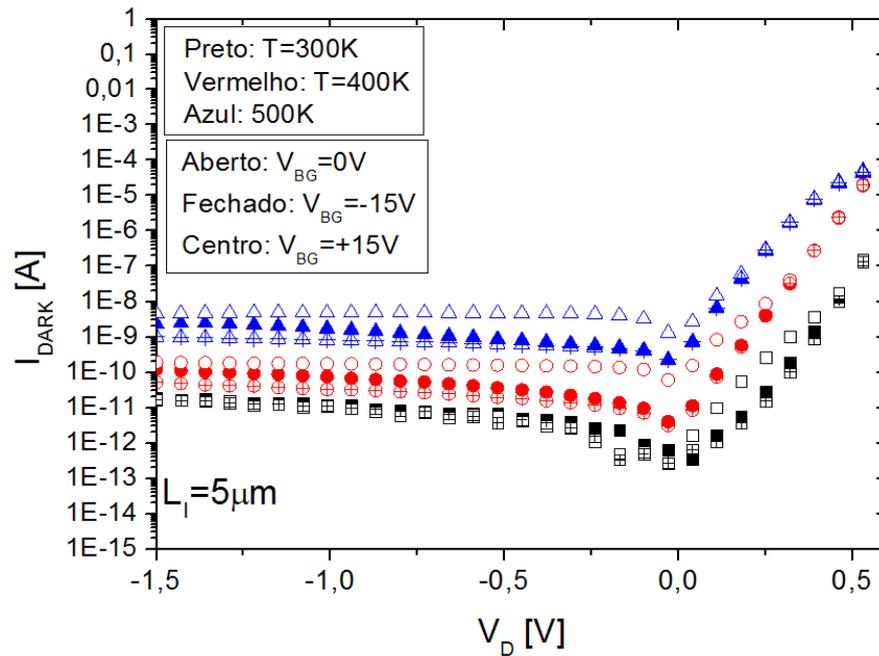
De acordo com as Figuras 42 (I_{DARK} vs Temperatura) e 43 (I_{DARK} vs V_{D}), a corrente de escuro apresenta pouca sensibilidade para temperaturas abaixo de 375K, devido à menor geração térmica dos pares elétron-lacuna. Adicionalmente, a geração térmica de portadores é mais pronunciada dentro da RDD onde a taxa de recombinação é menor graças à presença das cargas fixas [19]. Acima de 400K, a corrente de escuro apresentou maior sensibilidade às variações de temperatura quando o filme está operando no regime de acumulação ($V_{\text{BG}} = -15\text{V}$). Para a temperatura de 500K, a corrente de escuro possui variação superior a 1500 vezes em relação ao seu valor em temperatura ambiente. Nesta temperatura (500K) a corrente de difusão é predominante sobre a corrente de deriva, conforme discutido em capítulos anteriores.

Figura 42 – Corrente de escuro normalizada pelo seu valor de 300K em função da temperatura



Fonte: Autor

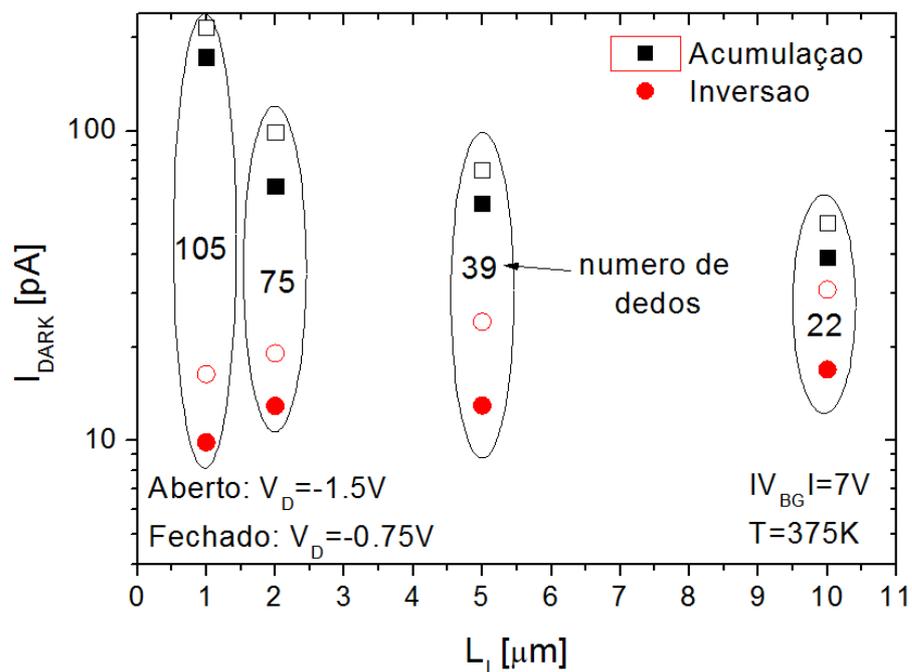
Figura 43 – Medida experimental da I_{DARK} vs V_D para $L_i=5\mu\text{m}$ com diferentes temperaturas e polarizações de substrato



Fonte: Autor

A corrente de escuro também pode ser afetada pelo número de dedos dos fotodiodos. Esta corrente (I_{DARK}) é proporcional à área de junção e ao tamanho da região de depleção [1] [36]. De acordo com os dados da Figura 44, que representa a I_{DARK} vs L_i em modo acumulação e inversão, é possível verificar esta influência.

Figura 44 – Corrente de escuro I_{DARK} vs L_i para acumulação e inversão



Fonte: Autor

Estes fotodiodos possuem área de junção fixa, ou seja, tanto (W - largura) como (L - comprimento) são iguais para todos os dispositivos. Isso é possível alterando o número de dedos para diferentes comprimentos intrínsecos (Tabela 1). A região de depleção de um dispositivo Multi-Finger (vários dedos) é formada entre a junção da região N^+ com a região intrínseca P . Em contrapartida, a região L_i pode estar totalmente depletada ou não. Ou seja, para $dx \geq L_i$, a região intrínseca estará totalmente depletada.

Na tabela 2 estão calculados os valores de dx e dx_{TOTAL} utilizando as Equações (24) e (35), considerando $V_D = -1,5V$.

Tabela 2 – Valores de RDD total dos dispositivos Multi-Finger.

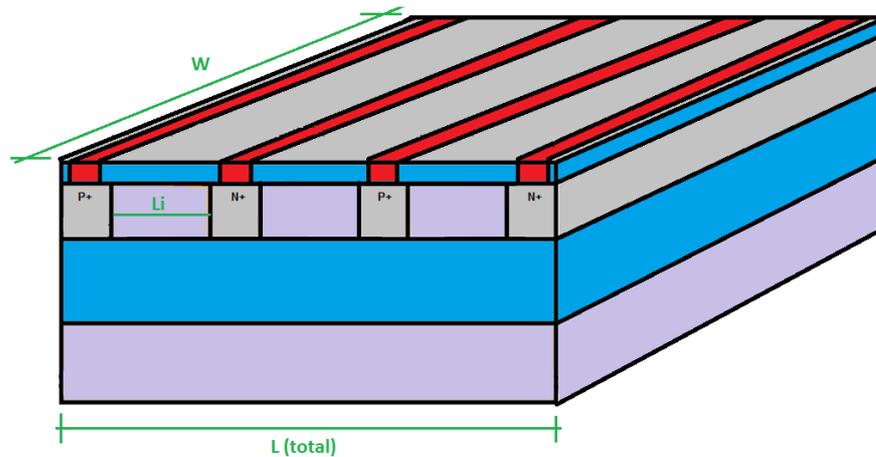
L_i (μm)	Nº Dedos	dx (μm)	dx_{Total} (μm)
1	105	79,7	105
2	75		150
5	39		195
10	22		220
100	2		159,4

Fonte: Autor

Sendo dx_{TOTAL} o tamanho total da região de depleção considerando o número de dedos.

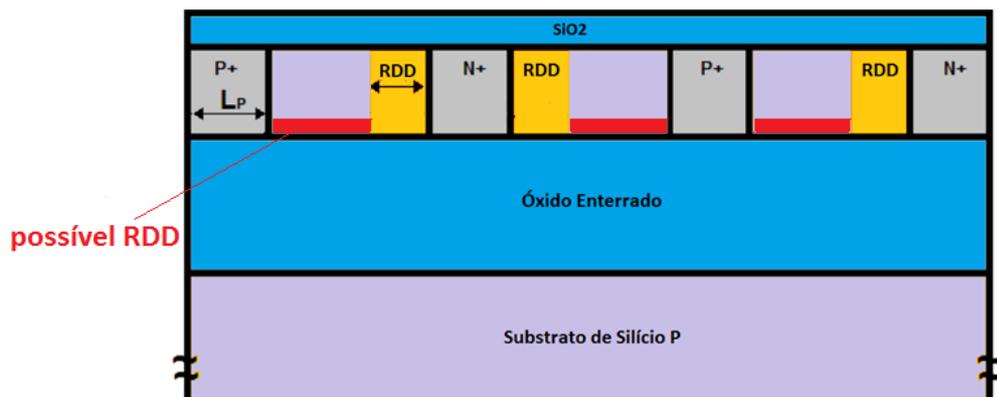
Os fotodiodos de $1\mu m$, $2\mu m$, $5\mu m$ e $10\mu m$ estão com a região intrínseca totalmente depletada. Portanto a região de depleção total será o número de dedos multiplicado pela região intrínseca, ou seja, para o fotodiodo com trinta e nove dedos ($m=39$), há trinta e nove regiões intrínsecas de comprimento $L_i=5\mu m$, sendo o valor obtido de região de depleção $dx=79,7\mu m$. Como o valor de dx é maior que L_i , a região intrínseca estará totalmente depletada e o valor da RDD em cada dedo será exatamente o valor de L_i . Como há trinta e nove dedos, o comprimento total da região de depleção deste dispositivo será trinta e nove vezes o valor de L_i , portanto, $dx_{TOTAL}=195\mu m$, conforme Figuras 45 e 46 que representam um fotodiodo com 3 dedos. Sendo assim, quando o filme está em acumulação, a corrente de escuro diminui com o aumento da região intrínseca, pois a junção formada entre N^+ e P possui somente depleção lateral, resultando numa dependência direta de (I_{DARK}) com o número de dedos. Quando o filme está em inversão, a corrente de escuro aumenta com o aumento da região intrínseca, nesse momento o filme comporta-se como $P+N-P^+$, logo, uma alta taxa de geração se estende ao longo da região intrínseca. Essa extensão pode ser uma possível formação da região de depleção vertical, conforme Figura 46.

Figura 45 – Esquema simplificado do fotodiodo PIN CMOS SOI 3D indicando W e L_{TOTAL}



Fonte: Autor

Figura 46 – Esquema simplificado do fotodiodo PIN CMOS SOI 2D indicando RDD lateral e possível RDD vertical



Fonte: Autor

7.2 EFEITOS DA TEMPERATURA E POLARIZAÇÃO DE SUBSTRATO NOS DISPOSITIVOS ILUMINADOS

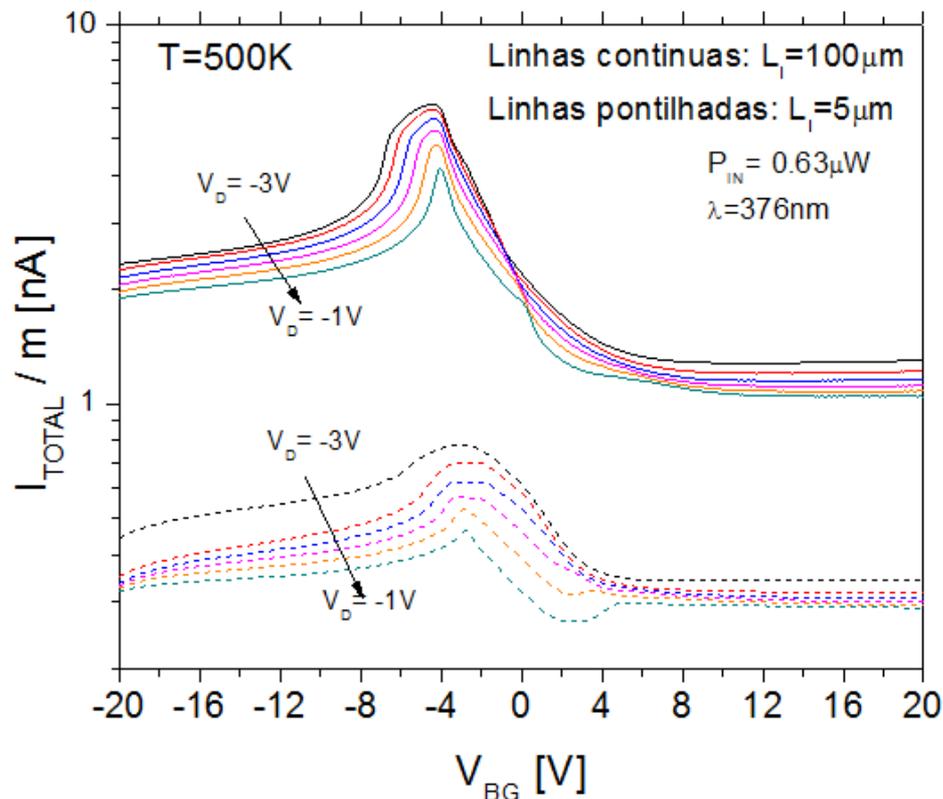
No capítulo anterior, foi apresentada a tendência do comportamento da corrente de escuro nos fotodiodos PIN CMOS SOI que servirá de base para entender como os dispositivos se comportam quando os mesmos estão iluminados com potência incidente de $P_{IN}=0,63\mu W$ sob radiação ultravioleta de comprimento de onda $\lambda=376nm$.

A variação de polarização de porta traseira modifica a disponibilidade de portadores no filme de silício [1] [37] fazendo com que os modos de operação sejam alterados. Esta afirmação pode ser comprovada através da Figura 47 que apresenta a corrente total do fotodiodo em função de V_{BG} para diferentes V_D em alta temperatura (500K). Observa-se que a

maior corrente obtida em qualquer comprimento intrínseco é para o valor de V_D mais negativo, devido ao aumento da RDD.

A corrente devida à fotogeração é proporcional à área fotossensível do fotodiodo. Esta área é responsável pela captação dos fótons emitidos para dentro da região intrínseca, onde serão separados pela ação do campo elétrico dentro da RDD e coletados pelo terminal do anodo. Sendo assim, os maiores níveis de corrente serão para os fotodiodos que apresentarem maior área fotossensível, por isso o nível da corrente total do fotodiodo de $L_i=100\mu\text{m}$ é maior que a do fotodiodo com $L_i=5\mu\text{m}$.

Figura 47 – Medida experimental da corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=100\mu\text{m}$ e $5\mu\text{m}$ iluminado com $\lambda=376\text{nm}$ para diferentes V_D

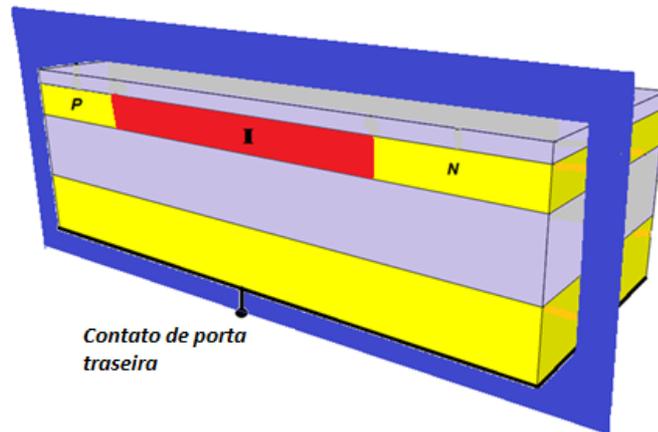


Autor

Outra característica importante a ser analisada na Figura 47 é a diferença dos níveis de corrente entre os regimes de acumulação e inversão. Notas-se que a corrente da acumulação é maior que a corrente de inversão. Como o fotodiodo está polarizado reversamente, o fenômeno de geração será predominante em relação ao processo de recombinação, já que, o produto pn é menor que n_i^2 . Portanto, os níveis de corrente serão altamente influenciados pelas taxas de geração/recombinação. Para verificar esta dependência, foram realizadas

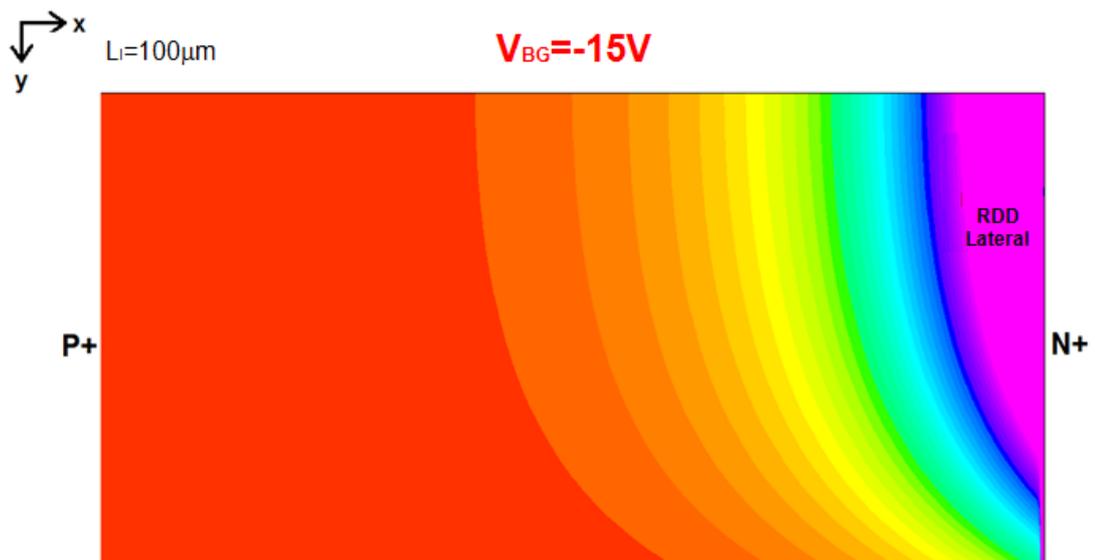
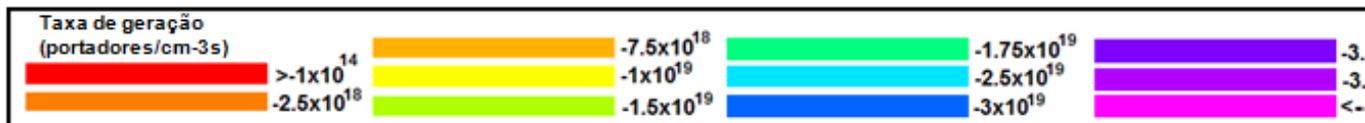
simulações no simulador Atlas [41], com os mesmos parâmetros da tecnologia ST empregada na fabricação dos fotodiodos, conforme Figuras 48 e 49, que representam a distribuição das taxas de geração/recombinação na região intrínsecas para alguns valores de V_{BG} .

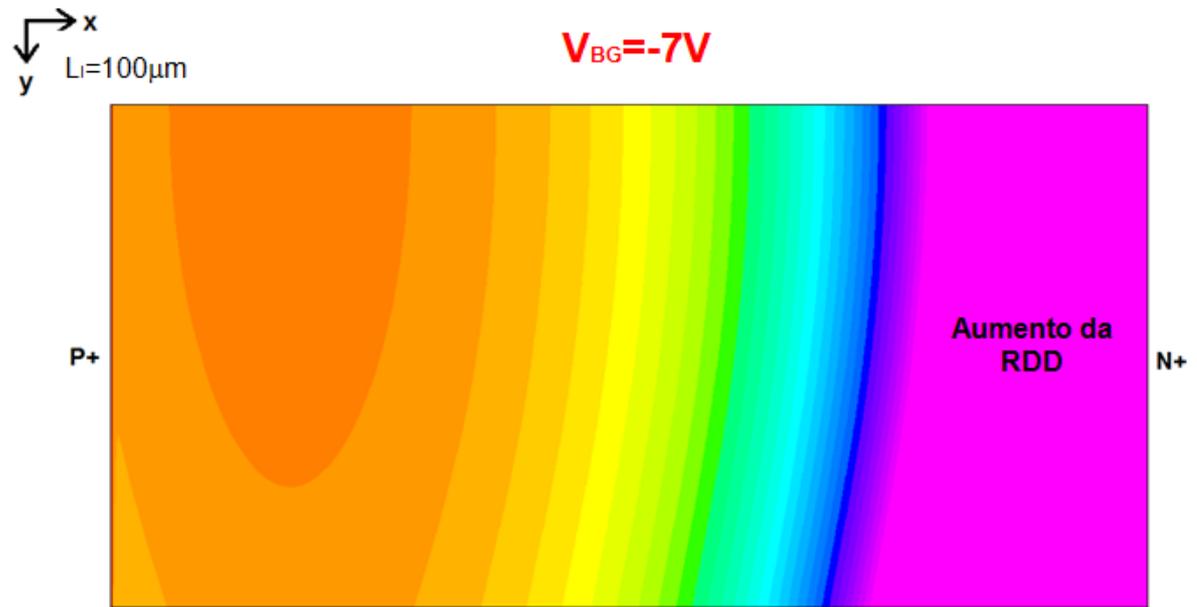
Figura 48 – Simulação do fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=100\mu\text{m}$ para $T=500\text{K}$

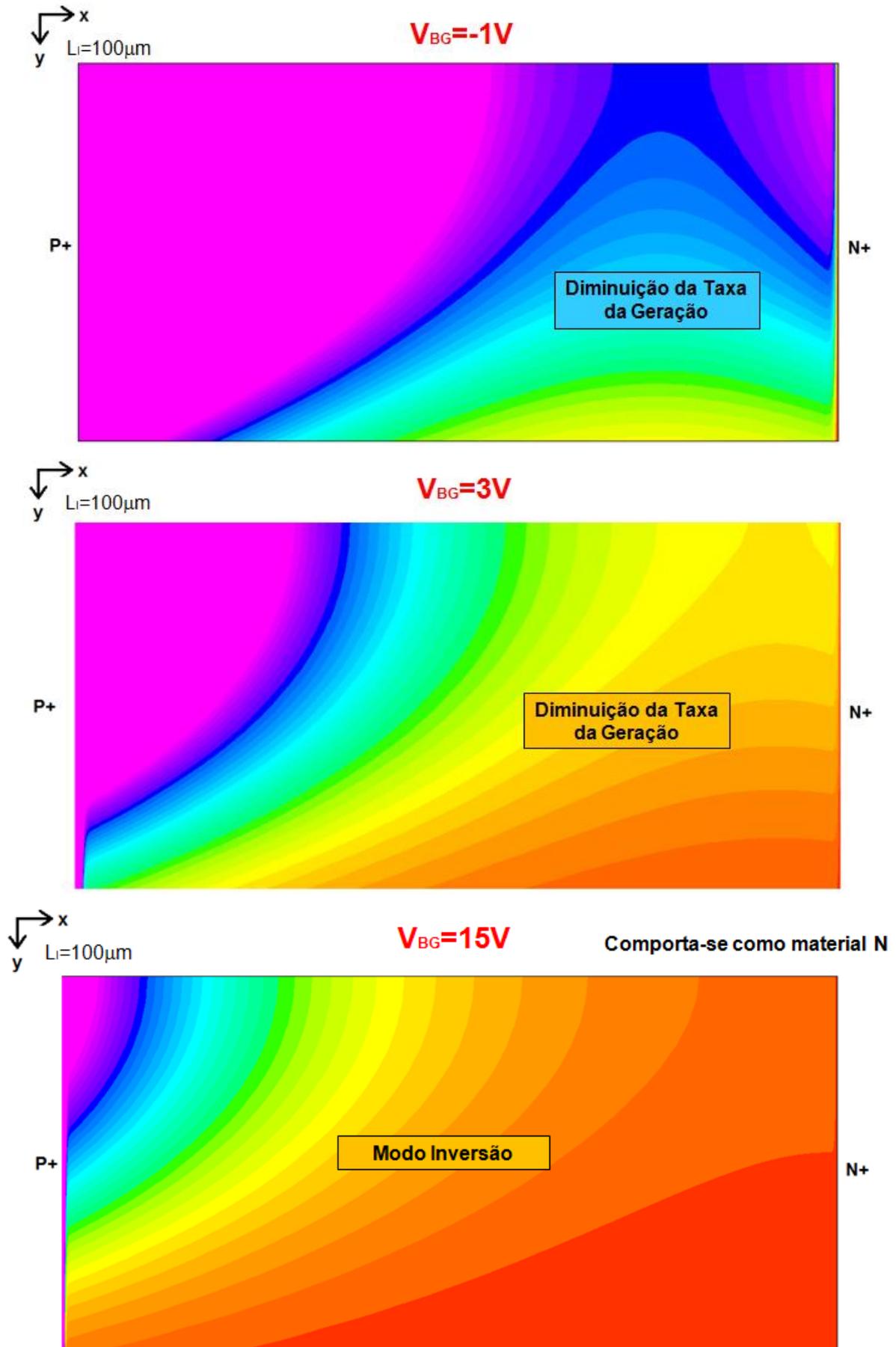


Autor

Figura 49 – Simulação da taxa de geração na região intrínseca para diferentes valores de V_{BG} com $T=500\text{K}$ do fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=100\mu\text{m}$





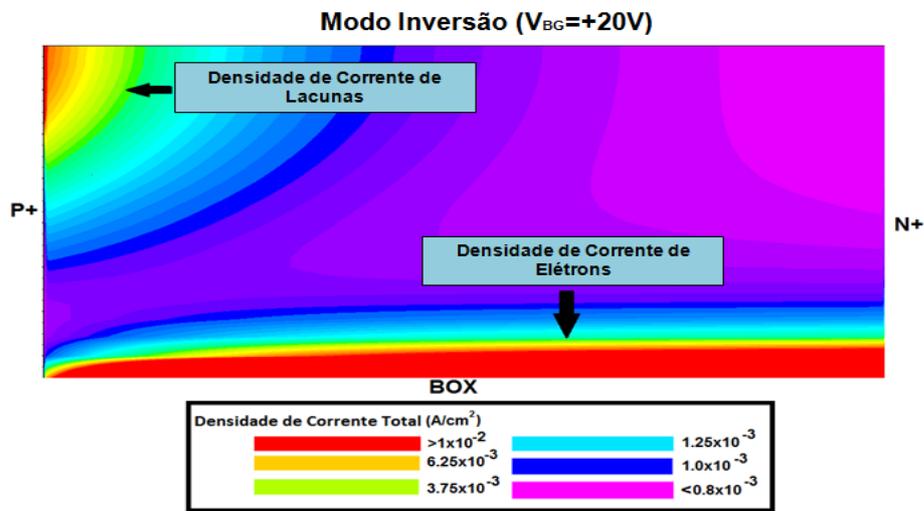


Quando $V_{BG}=-15V$ o filme de silício encontra-se no regime de acumulação. Neste instante, os portadores majoritários são as lacunas e os portadores minoritários são os elétrons. Grande parte da região intrínseca apresenta baixa taxa de geração, devido à recombinação dos portadores minoritários. Ao aumentar a tensão V_{BG} para $-7V$, a concentração de lacunas diminui, resultando num aumento da taxa de geração e da região de depleção. Aumentado V_{BG} para $-5V$, nota-se que a taxa de geração começa a ficar mais pronunciada, pois a concentração dos portadores majoritários se reduz cada vez mais, resultando numa baixa recombinação de portadores minoritários. À medida que V_{BG} aumenta, a região intrínseca caminha para a RDD máxima. Quando $V_{BG}=-3V$, o filme de silício possui depleção lateral e vertical, onde a taxa de geração é máxima, fazendo com que o aproveitamento dos fotoportadores seja máximo, aumentando a corrente total do dispositivo. Quando V_{BG} possui valores cada vez mais positivos, a taxa de geração começa a diminuir, pois a concentração de lacunas diminui enquanto a concentração de elétrons aumenta. Aumentando ainda mais o V_{BG} para $+15V$, a concentração de elétrons aumenta tanto, que a região intrínseca se comporta como um material N, ou seja, houve uma inversão de portador, e neste instante, o perfil de dopantes dos fotodiodos passam a se comportar como $P+N-N+$ e os portadores majoritários passam a ser os elétrons e os portadores minoritários as lacunas.

Os portadores minoritários em ambos os modos de operação (acumulação/inversão), são os responsáveis pelas variações das taxas geração/recombinação dos fotodiodos, conforme Equação (18). Estas variações resultam no aumento/diminuição dos níveis da corrente total, que são compostas pelas correntes de elétrons e lacunas. Assim como a concentração, o tempo de vida dos portadores é fundamental para informar qual o tipo de taxa (geração/recombinação) está ocorrendo no semiconductor. O significado do “tempo de vida” representa quanto tempo os portadores livres, quer seja elétrons ou lacunas, conseguem sobreviver desde a sua geração até a sua recombinação [17]. De acordo com a Figura 50 é possível verificar a composição da corrente total de inversão. Nota-se que a densidade de corrente de elétrons é mais pronunciada devido aos portadores majoritários serem os próprios elétrons. Entretanto os portadores minoritários são de extrema relevância, pois os mesmos irão ditar o ritmo da taxa de geração/recombinação. Sendo assim, a Figura 51 mostra a relação entre a corrente de inversão pela corrente de acumulação em função do tempo de vida do portador minoritário, que neste caso são as lacunas em alta temperatura ($T=500K$). Fixando o tempo de vida dos elétrons em ambos os modos de operação, na simulação, e variando o tempo de vida das lacunas é possível verificar o quanto a corrente de inversão é afetada. À medida que o tempo de vida dos portadores minoritários aumenta a relação entre as correntes

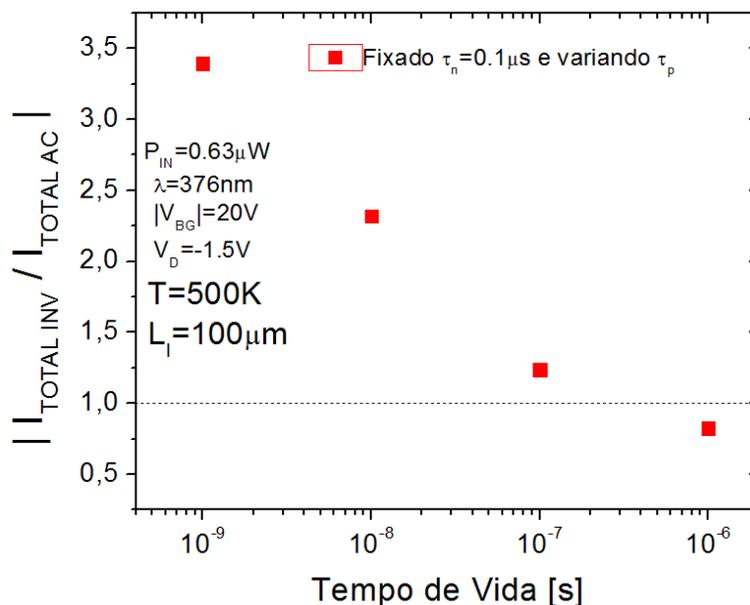
diminui. Isso ocorre porque na acumulação a corrente aumenta devido aos portadores majoritários serem as lacunas. Como o tempo de vida se torna cada vez maior, a taxa de recombinação se reduz, resultando no aumento da corrente. Entretanto na inversão, o fenômeno ocorre ao contrário. Como o dispositivo está em alta temperatura, o fenômeno da geração térmica é mais pronunciado, sendo assim, quanto maior for o tempo de vida dos portadores minoritários (lacunas), menor será a taxa de geração dos portadores majoritários (elétrons), resultando numa diminuição da corrente de inversão.

Figura 50 – Simulação da densidade de corrente de elétrons e lacunas no modo inversão para $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$



Fonte: Autor

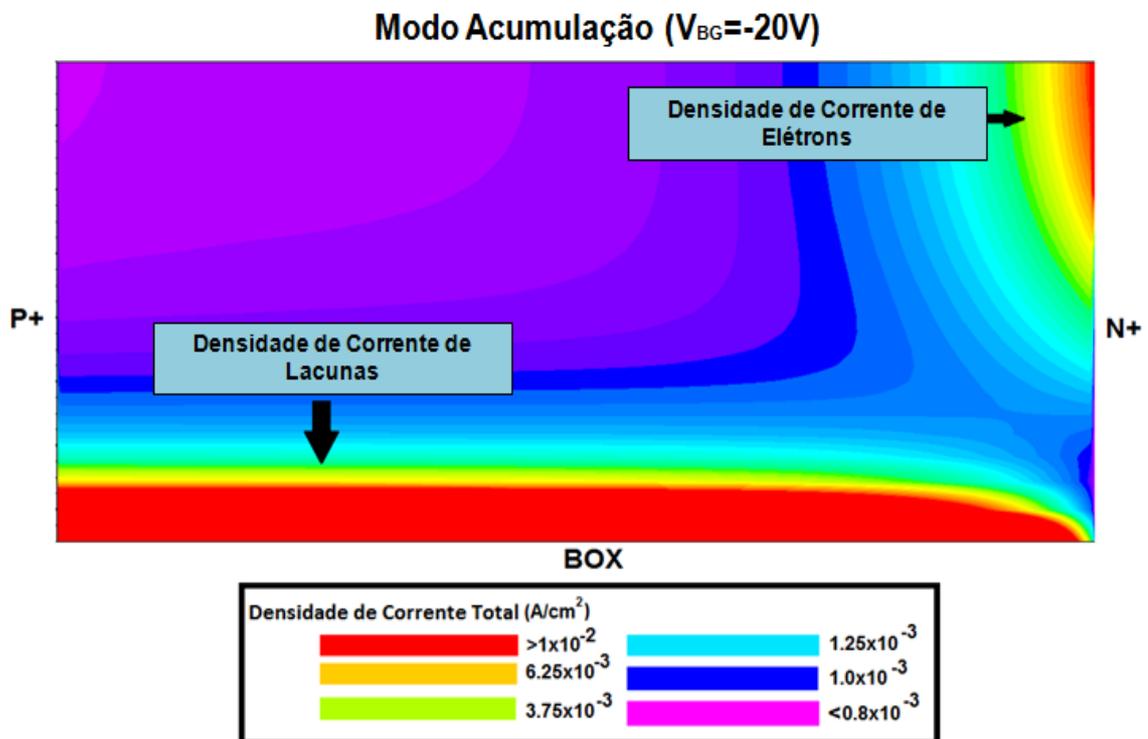
Figura 51 – Simulação da corrente de inversão pela corrente de acumulação em função do tempo de vida das lacunas para $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$, iluminado com $\lambda=376\text{nm}$



Fonte: Autor

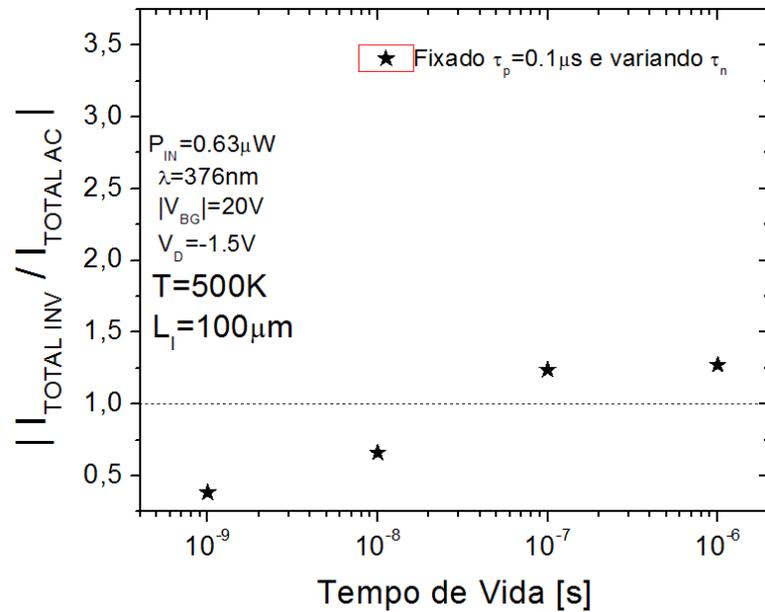
O mesmo princípio de análise é válido para o fotodiodo operando no modo acumulação. Neste caso, a densidade de corrente de lacunas é mais pronunciada devido às mesmas serem os portadores majoritários conforme Figura 52. Fixando o tempo de vida das lacunas e variando o tempo de vida dos elétrons que são os portadores minoritários, é possível verificar o quanto a corrente de acumulação é afetada. De acordo com a Figura 53 é possível verificar que, quanto maior for o tempo de vida dos elétrons, a relação entre as correntes se torna cada vez maior. Isso ocorre porque na inversão a corrente aumenta devido aos portadores majoritários serem os elétrons. Logo, a taxa de recombinação diminui, resultando no aumento da corrente. Entretanto a corrente de acumulação diminui, pois quanto maior for o tempo de vida dos portadores minoritários, menor será a taxa de geração dos portadores majoritários (lacunas), que são os responsáveis pela maior contribuição da corrente de acumulação.

Figura 52 – Simulação da densidade de corrente de elétrons e lacunas no modo acumulação para $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$



Fonte: Autor

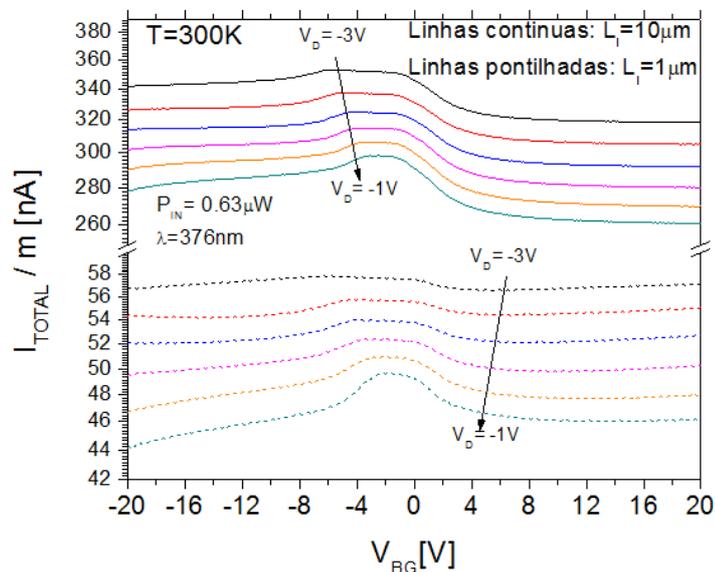
Figura 53 – Simulação da corrente de inversão pela corrente de acumulação em função do tempo de vida dos elétrons para $L_i=100\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$, iluminado com $\lambda=376\text{nm}$



Fonte: Autor

Operando com comprimentos intrínsecos pequenos, os níveis de corrente dos modos de operação (acumulação/inversão) também são afetados. Neste caso, a corrente de inversão torna-se maior que a corrente de acumulação, conforme Figura 54 para $L_i=1\mu\text{m}$. O nível de corrente do fotodiodo com $L_i=10\mu\text{m}$ é maior comparado com $L_i=1\mu\text{m}$, pois sua área fotossensível é maior.

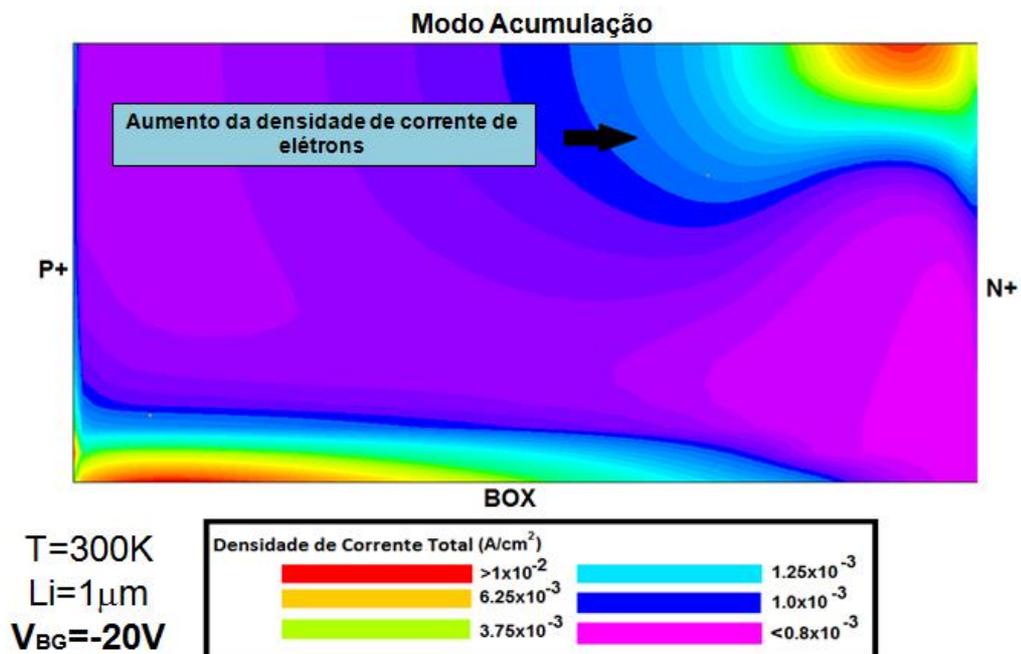
Figura 54 – Medida experimental da corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI de $L_i=10\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$ iluminado com $\lambda=376\text{nm}$ para diferentes V_D



Fonte: Autor

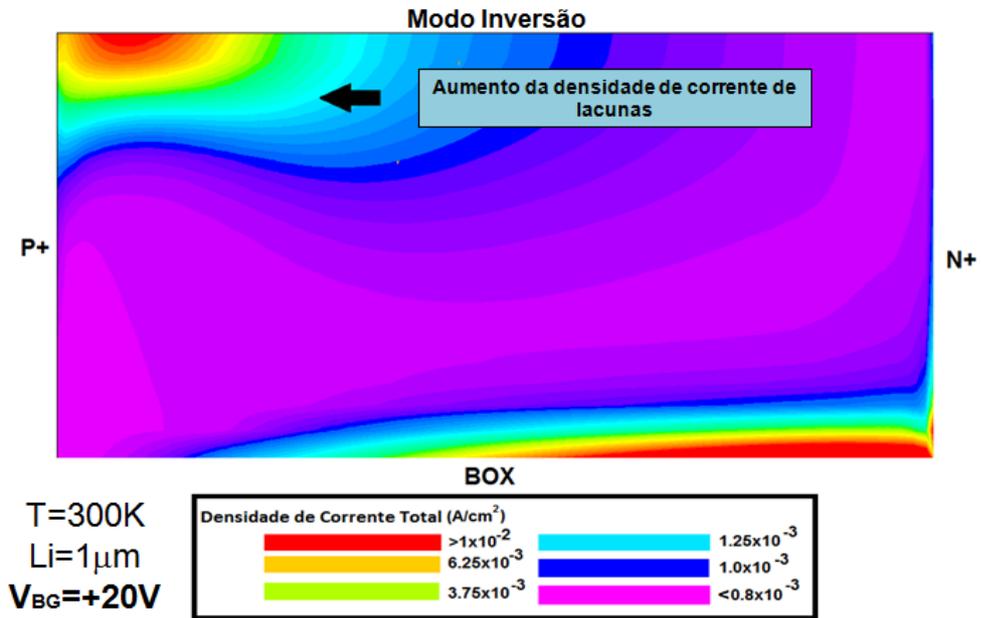
Para entender a causa da inversão dos níveis de corrente (acumulação/inversão) para fotodiodos com comprimentos intrínsecos pequenos, foram feitas simulações das densidades de correntes de elétrons e lacunas em temperatura ambiente ($T=300\text{K}$). De acordo com a Figura 55, é possível verificar que houve um aumento significativo na densidade de corrente de elétrons que são os portadores minoritários no regime de acumulação. Já na Figura 56, este mesmo efeito acontece, ou seja, houve um aumento na densidade de corrente de lacunas que são os portadores minoritários no regime de inversão. Em ambos os casos, verifica-se que a densidade de corrente dos portadores minoritários aumenta, enquanto a densidade de corrente dos portadores majoritários tende a diminuir. O aumento da densidade de corrente dos portadores minoritários está relacionado com o fenômeno de “inversão de portador” causado em dispositivos com (L_i) pequenos [1] [9] [37]. Este efeito causa um impacto significativo na corrente total do dispositivo, dependendo do seu modo de operação. Como a concentração dos portadores minoritários aumentou, a taxa de recombinação será mais pronunciada dependendo do tamanho da região intrínseca, fazendo com que a corrente de inversão seja maior que a corrente de acumulação conforme comentado anteriormente na Figura 54.

Figura 55 – Simulação do aumento da densidade de corrente dos portadores minoritários em acumulação para $L_i=1\mu\text{m}$ em $T=300\text{K}$ com $V_{BG}=-20\text{V}$



Fonte: Autor

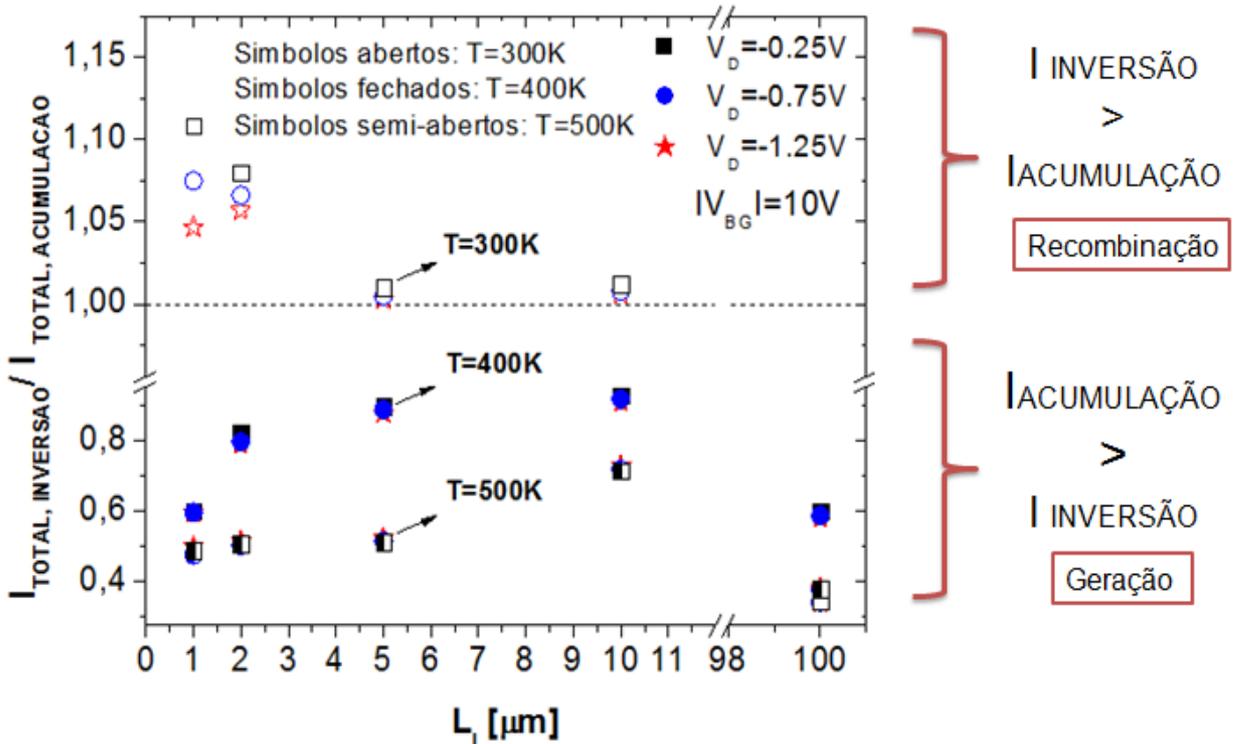
Figura 56 – Simulação do aumento da densidade de corrente dos portadores minoritários em inversão para $L_i=1\mu\text{m}$ em $T=300\text{K}$ com $V_{BG}=+20\text{V}$



Fonte: Autor

Em resumo, a Figura 57 mostra o efeito da taxa de geração/recombinação em função do comprimento intrínseco para temperaturas de 300K, 400K e 500K.

Figura 57 – Simulação da corrente $I_{(TOTAL,INVERSAO)}/I_{(TOTAL,ACUMULACAO)}$ vs L_i para diferentes valores de V_D e temperatura



Fonte: Autor

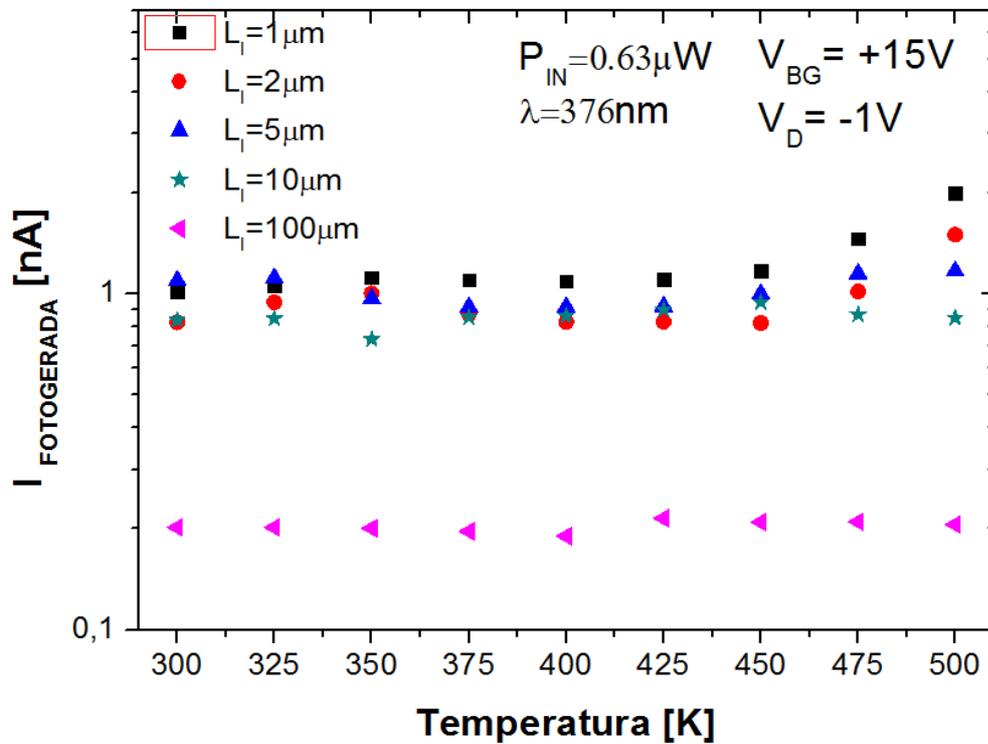
Operando em temperatura ambiente ($T=300\text{K}$), os dispositivos com menores L_i ($1\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$) apresentaram maiores taxas de variação entre as correntes de inversão e acumulação. Quando a relação entre as correntes é maior que 1 ($I_{\text{INVERSÃO}} > I_{\text{ACUMULAÇÃO}}$), o processo de recombinação é mais evidente, pois este efeito é mais pronunciado em dispositivos que apresentam menores comprimentos intrínsecos devido ao fenômeno de inversão de portador, resultando num aumento significativo na concentração dos portadores minoritários. Quando a relação é menor que 1 ($I_{\text{INVERSÃO}} < I_{\text{ACUMULAÇÃO}}$), o processo de geração é mais pronunciado, independente do comprimento intrínseco. Nota-se que esta situação ocorre quando o fotodiodo está operando em alta temperatura, onde a taxa de geração térmica torna-se mandatória. Portanto, quanto maior for o tempo de vida dos portadores minoritários, menor será a taxa de geração dos portadores majoritários.

7.3 EFEITOS DA TEMPERATURA E POLARIZAÇÃO DE SUBSTRATO NA CORRENTE FOTOGERADA

Serão analisados os efeitos da temperatura, nas regiões de inversão e acumulação na corrente devido à fotogeração. Além da corrente de escuro, a corrente fotogerada (I_{FG}) é de suma importância para análise da eficiência quântica total, relação sinal ruído e responsividade.

A Figura 58 mostra a corrente fotogerada em função da temperatura ($I_{\text{FOTOGERADA}}$ vs Temperatura) para alguns comprimentos intrínsecos iluminados com $\lambda=376\text{nm}$. Quando o fotodiodo está operando no modo inversão ($V_{\text{BG}}=+15\text{V}$), verifica-se que a corrente devida à fotogeração aumenta com a temperatura, sendo mais evidente a partir de 400K . O aumento da (I_{FG}) está relacionado com o aumento do coeficiente de absorção (α_m) para altas temperaturas [38] [39]. O aumento deste coeficiente, resulta numa menor profundidade de penetração (L_{ABS}), contribuindo com o aumento dos portadores livres gerados dentro da RDD [46], uma vez que, a fotodeteção de comprimentos na faixa do ultravioleta ocorre nas camadas superficiais dos dispositivos.

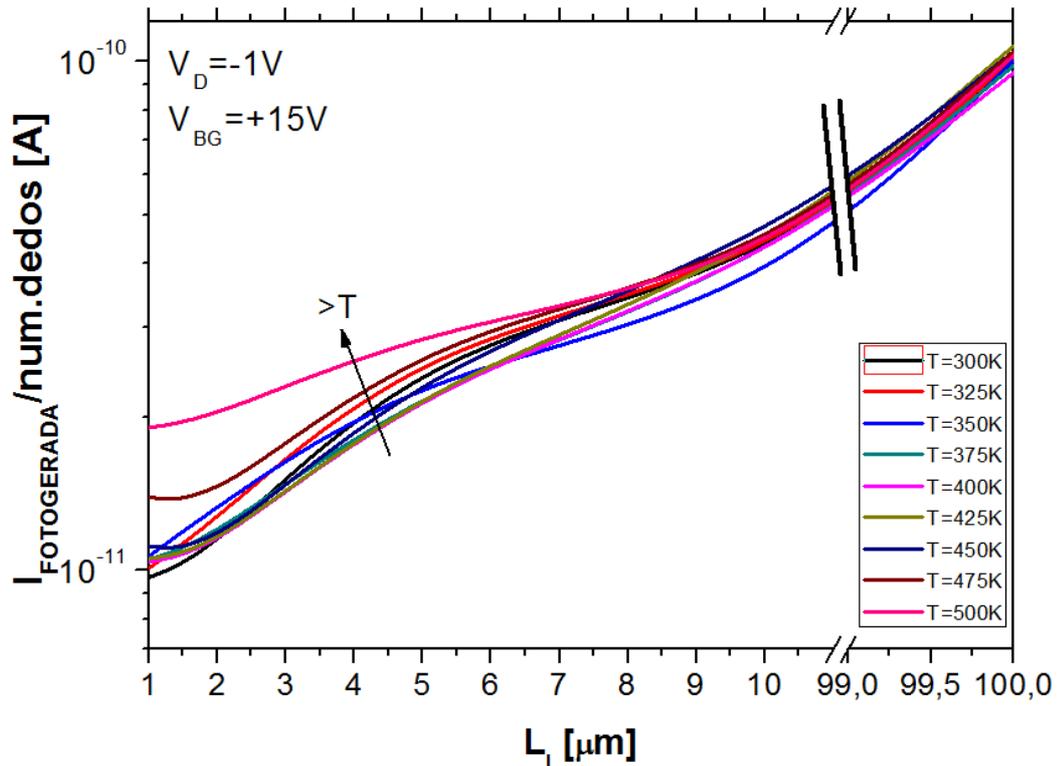
Figura 58 – Medida experimental da corrente $I_{\text{FOTOGGERADA}}$ vs Temperatura para diferentes L_i no modo inversão com $V_D = -1V$, iluminado com $\lambda = 376nm$.



Fonte: Autor

Normalizando a corrente devida a fotogeração pelo número de dedos é possível verificar o efeito de apenas um dedo nos fotodiodos, conforme na Figura 59. Nota-se que a corrente fotogerada é maior para os comprimentos intrínsecos grandes, devido aos mesmos apresentarem maior área fotossensível. Outra observação importante na Figura 59 é a sensibilidade da corrente fotogerada com a temperatura, sendo mais pronunciada em comprimentos intrínsecos pequenos compreendidos entre ($1\mu m$ à $8\mu m$) aproximadamente. Acima de $L_i = 10\mu m$ a (I_{FG}) torna-se menos sensível as variações da temperatura.

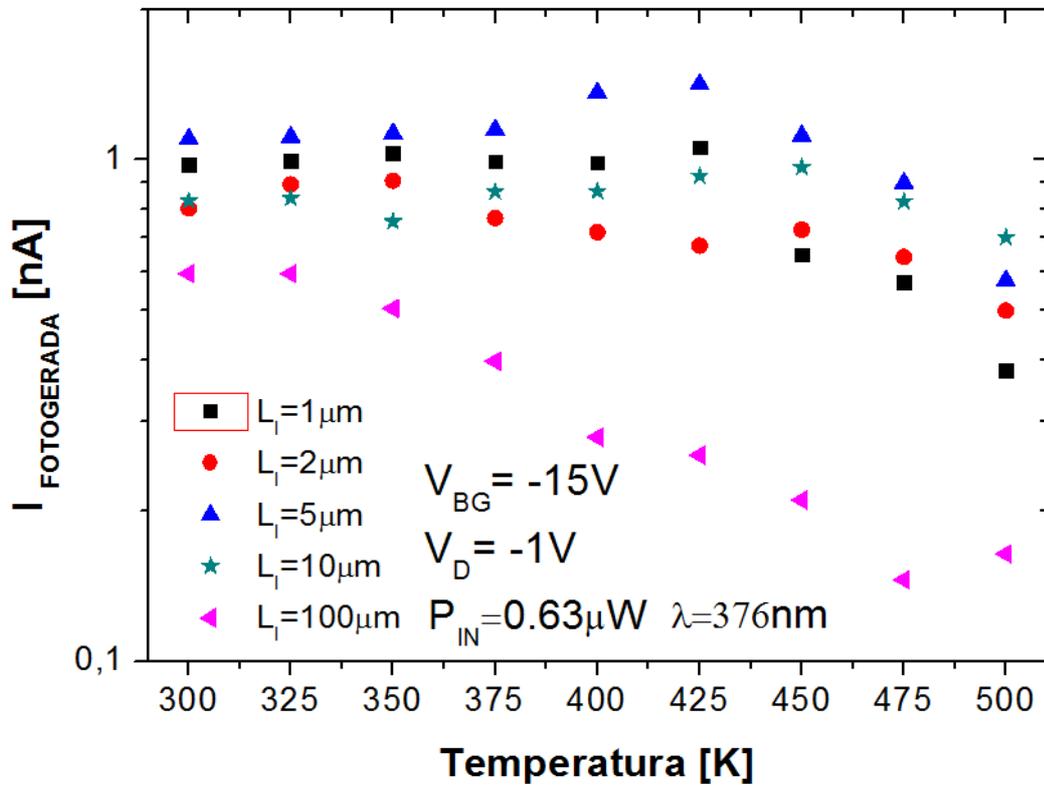
Figura 59 – Corrente normalizada pelo número de dedos (m) $I_{\text{FOTOGERADA}}/\text{num.dedos}$ vs L_1 para diferentes temperaturas em inversão (experimental)



Fonte: Autor

Operando com o fotodiodo no regime de acumulação, o efeito torna-se oposto do modo inversão, ou seja, a partir de $T=400\text{K}$ a corrente fotogerada diminui com o aumento da temperatura, conforme Figura 60. A explicação para a diminuição da corrente fotogerada está relacionada com a redução do comprimento de difusão (L_{dif}) em virtude do aumento da concentração de portadores em altas temperaturas. Através da Equação (30), verifica-se que o comprimento de difusão dos elétrons que são os portadores minoritários no modo acumulação é dependente do coeficiente de difusão (D_N) e do seu tempo de vida (τ_N). Relacionando a Equação (30) com a Equação (52), que representa a relação de Einstein entre o coeficiente de difusão e a mobilidade, tem-se que o comprimento de difusão é dependente da temperatura, mobilidade e tempo de vida dos portadores minoritários, conforme Equação (53).

Figura 60 – Medida experimental da corrente $I_{\text{FOTOGNERADA}}$ vs Temperatura para diferentes L_i no modo acumulação com $V_D = -1V$, iluminado com $\lambda = 376nm$

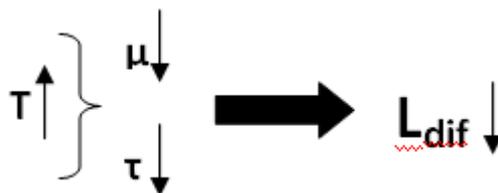


Fonte: Autor

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{K \cdot T}{q} \tag{52}$$

$$L_{dif.} = \sqrt{\frac{\mu \cdot \tau \cdot K \cdot T}{q}} \tag{53}$$

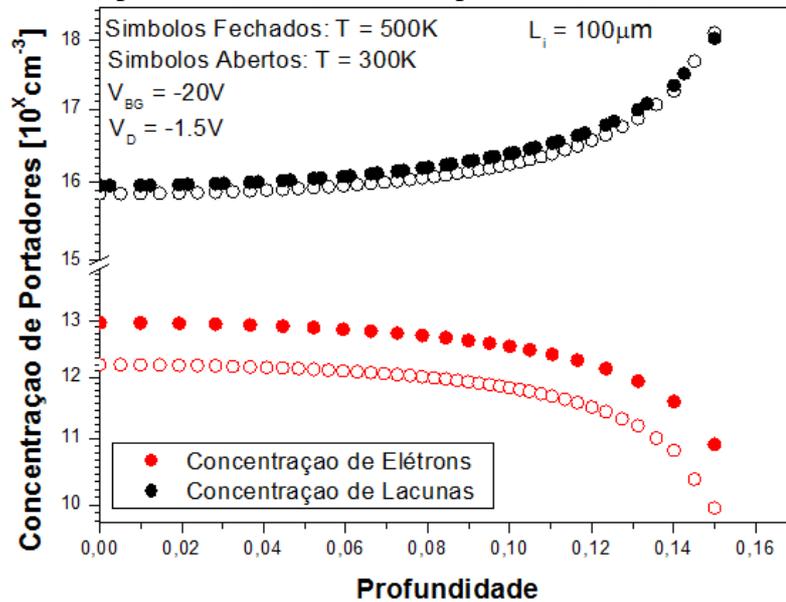
Tanto a mobilidade como o tempo de vida dos portadores são afetados pelo aumento da temperatura. Estes parâmetros são mais pronunciados na Equação (53) mesmo que a temperatura seja uma variável diretamente proporcional ao ($L_{dif.}$), conforme Equação (54).



(54)

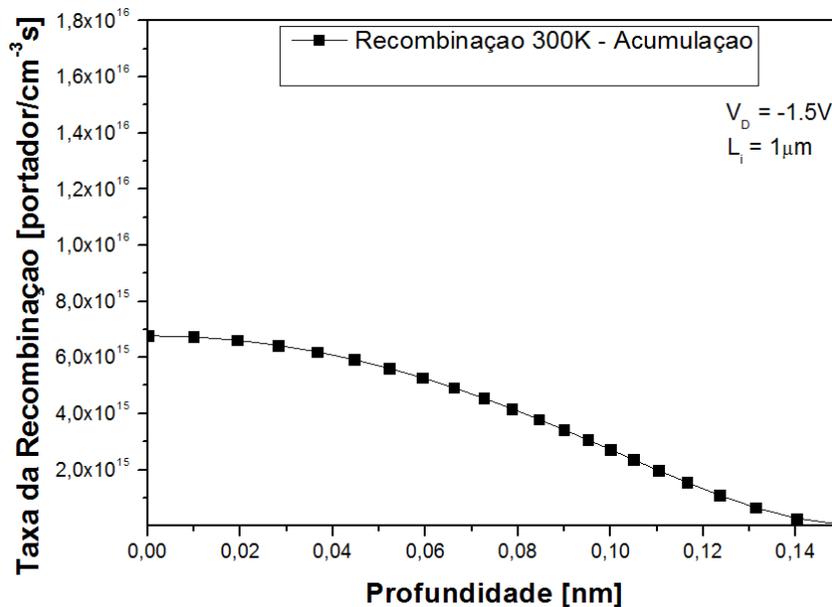
O aumento da temperatura faz com que a concentração de portadores aumente, sendo mais pronunciada nos portadores minoritários, conforme Figura 61, que representa a concentração de elétrons e lacunas para dentro do cristal, iniciando na superfície (0,0nm) até a profundidade de (0,16nm) em T=300K e T=500K no modo acumulação. Fazendo um corte transversal no sentido da profundidade do silício, tem-se na Figura 62 e 63 o efeito causado na taxa de recombinação e geração para T=300K e T=500K respectivamente.

Figura 61 – Simulação da concentração de elétrons e lacunas no modo acumulação para $L_i=100\mu\text{m}$ em baixa temperatura (300K) e alta temperatura (500K)



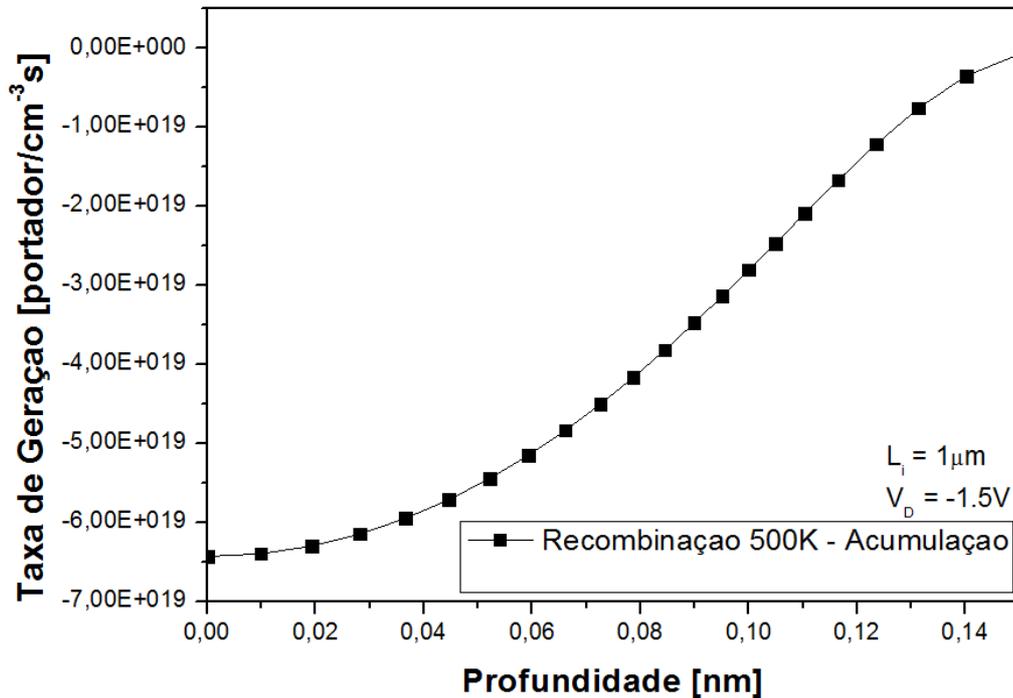
Fonte: Autor

Figura 62 – Simulação da taxa de recombinação com $L_i=1\mu\text{m}$ em T=300K no regime de acumulação



Fonte: Autor

Figura 63 – Simulação da taxa de recombinação com $L_i=1\mu\text{m}$ em $T=500\text{K}$ no regime de acumulação

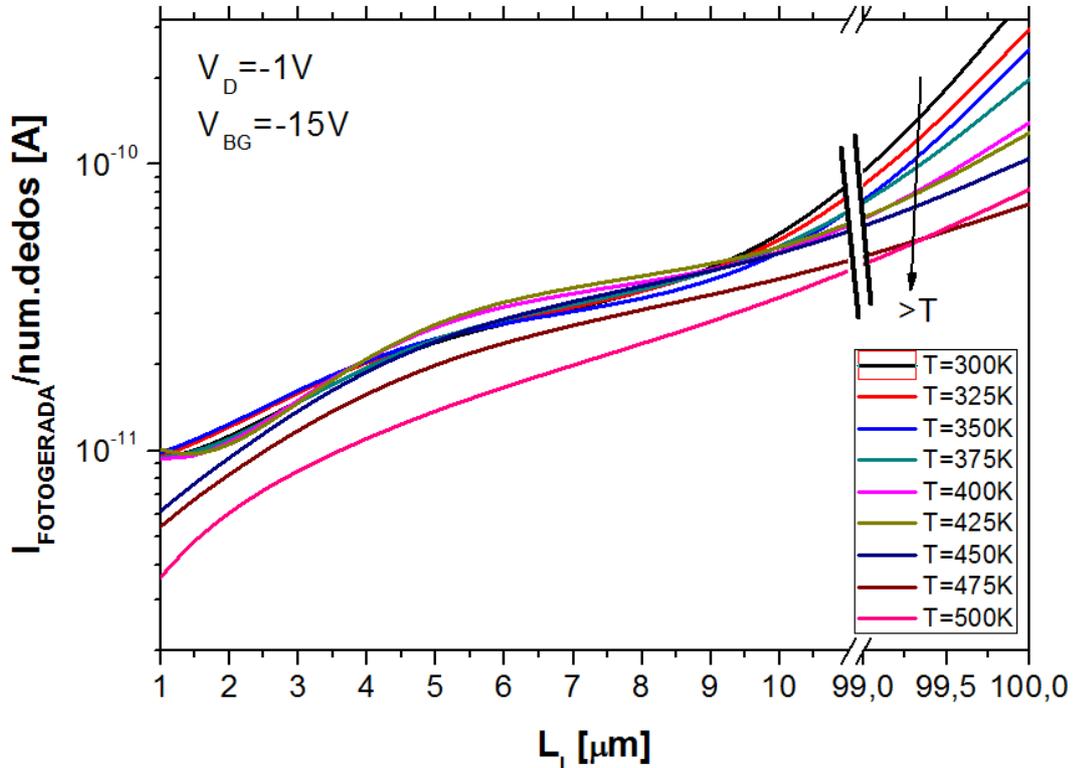


Fonte: Autor

Quando o produto $pn \gg ni^2$ em $T=300\text{K}$ (temperatura ambiente), existe uma alta geração de portadores forçando o processo de recombinação. Como resultado, a corrente fotogerada apresenta aumento até a temperatura de $T=400\text{K}$. Quando o produto $pn \ll ni^2$ em altas temperaturas ($T=500\text{K}$), existe uma alta recombinação de portadores forçando o processo de geração. Portanto, o tempo de vida dos portadores minoritários diminui contribuindo com a redução do comprimento de difusão descrito nas Equações (53) e (54), resultando na diminuição da corrente fotogerada.

Assim como na inversão, normalizando a corrente devida à fotogeração pelo número de dedos é possível verificar o efeito de apenas um dedo nos fotodiodos, conforme Figura 64. Nota-se que a corrente fotogerada é maior para os comprimentos intrínsecos grandes, devido aos mesmos apresentarem maior área fotossensível. Outra observação importante na Figura 64 é a sensibilidade da corrente fotogerada com a temperatura, sendo mais pronunciada em comprimentos intrínsecos grandes, maiores que $99\mu\text{m}$. Abaixo deste comprimento a (I_{FG}) torna-se menos sensível as variações da temperatura. Comparando os dois regimes de operação, nota-se que em altas temperaturas a corrente tende a aumentar para maiores comprimentos intrínsecos no regime de inversão e diminuir no regime de acumulação.

Figura 64 – Corrente normalizada pelo número de dedos (m) $I_{\text{FOTOGERADA}}/\text{num.dedos}$ [A] vs L_i para diferentes temperaturas em acumulação



Fonte: Autor

7.4 EFEITOS DA TEMPERATURA E POLARIZAÇÃO DE SUBSTRATO NA EFICIÊNCIA QUÂNTICA TOTAL E RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

Nos capítulos anteriores foi visto que as correntes de escuro e fotogerada são altamente influenciadas pelas variações de temperatura e polarização de porta traseira. Estas correntes de certa forma afetam os índices de mérito, que são utilizados para medir a eficiência do dispositivo. Portanto, neste capítulo será analisado o quanto estas variações irão afetar a eficiência quântica total e a relação sinal ruído.

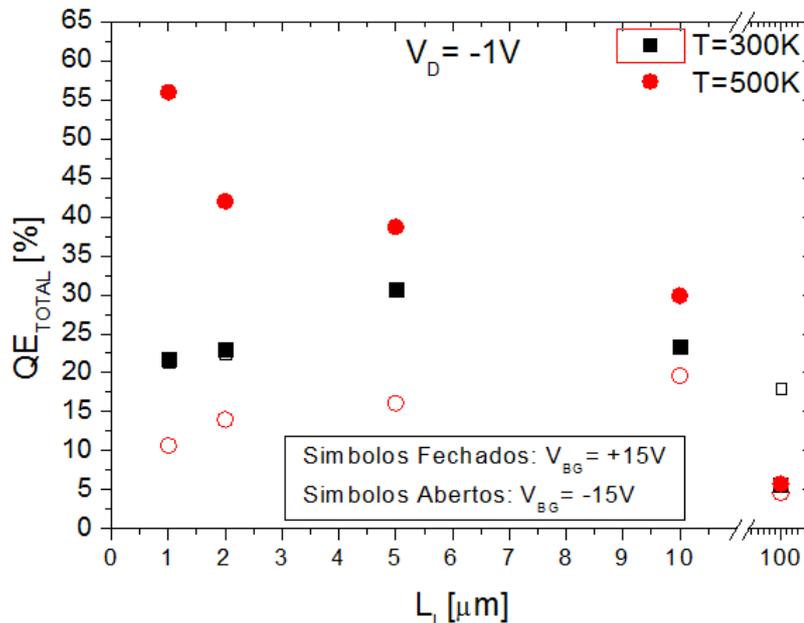
A Figura 65 mostra a eficiência quântica total (QE_{TOTAL}) em função de (L_i) para alta temperatura ($T=500\text{K}$) e temperatura ambiente ($T=300\text{K}$). Operando com o fotodiodo em temperatura ambiente ($T=300\text{K}$), a eficiência quântica total não possui nenhuma variação com (V_{BG}). Entretanto, para grandes comprimentos intrínsecos ($L_i=100\mu\text{m}$) esta variação é perceptível devido ao fenômeno da recombinação ser mais pronunciado no regime de inversão, onde o perfil de dopantes comporta-se como P+N-N+ apresentando menor concentração de portadores quando comparado ao modo acumulação. Para essa temperatura, a máxima eficiência quântica total encontrada foi para o comprimento $L_i=5\mu\text{m}$ com

$QE_{TOTAL}=33\%$. Operando com o fotodiodo em alta temperatura ($T=500K$), nota-se que as variações de (V_{BG}) são significativas para os regimes de acumulação e inversão. Entre os modos de operação, a maior eficiência quântica alcançável foi de $QE_{TOTAL}=56,2\%$ para $L_i=1\mu m$ no regime de inversão, devido ao aumento do coeficiente de absorção (α_m) contribuir na corrente foto gerada. Já no modo acumulação a máxima eficiência quântica alcançável foi de $QE_{TOTAL}=21,7\%$ para $L_i=10\mu m$ bem abaixo comparada no modo inversão, pois no regime de acumulação a corrente foto gerada diminui em altas temperaturas em virtude da redução do comprimento de difusão ocasionada com o aumento da concentração dos portadores majoritários e minoritários, conforme discutido anteriormente.

Para determinar a QE_{TOTAL} é necessário realizar medidas no claro e no escuro para determinar a corrente foto gerada ($I_{FG} = I_{TOTAL} - I_{DARK}$) no fotodiodo. Para gerar a radiação UV, foi utilizado um LED que possui a emissão no comprimento de onda de ($\lambda=376nm$). Com estas informações e as relações da Equação (55) é possível determinar a QE_{TOTAL} .

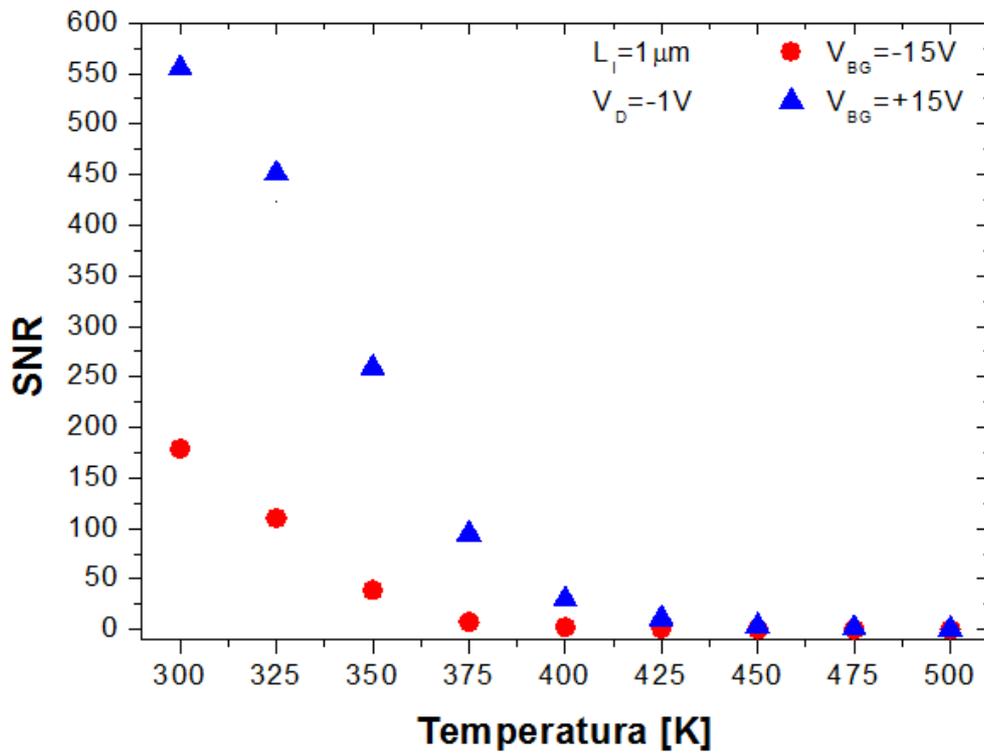
$$\begin{aligned}
 QE_{TOTAL} &= E \cdot R \\
 E &= \frac{h \cdot c}{\lambda} \\
 R &= \frac{I_{TOTAL} - I_{DARK}}{P_{IN}} = \frac{I_{FG}}{P_{IN}} \\
 QE_{TOTAL} &= \frac{h \cdot c \cdot I_{FG}}{\lambda \cdot P_{IN}}
 \end{aligned} \tag{55}$$

Figura 65 – Eficiência quântica total QE_{TOTAL} vs L_i para $T=300K$ e $500K$ [experimental]



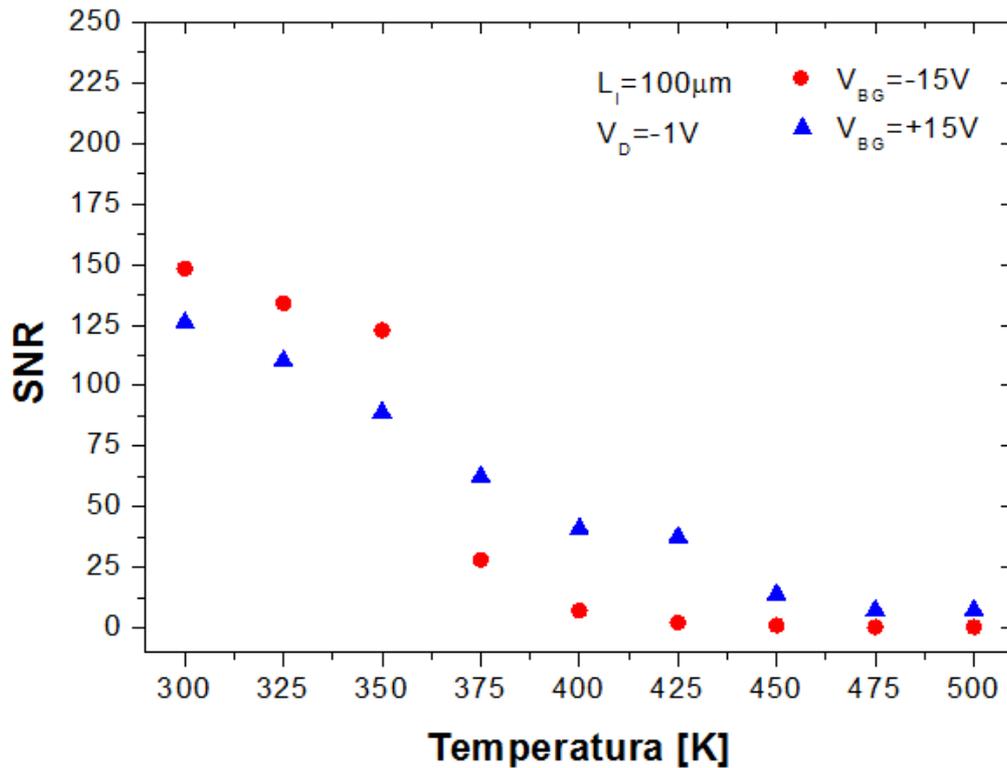
As Figuras 66 e 67 mostram a relação sinal-ruído pela temperatura para $L_i=1\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$ respectivamente.

Figura 66 – Relação sinal ruído SNR vs Temperatura com diferentes V_{BG} para $L_i=1\mu\text{m}$ [experimental]



Fonte: Autor

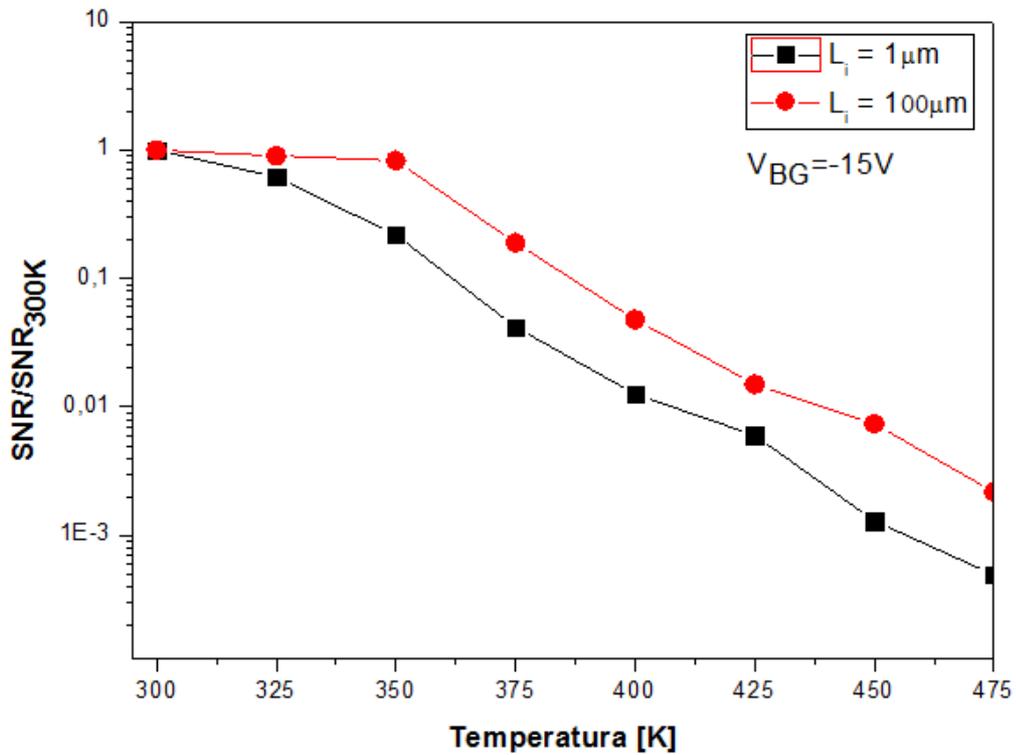
Figura 67 – Relação sinal ruído SNR vs T com diferentes V_{BG} para $L_i=100\mu\text{m}$ [experimental]



Fonte: Autor

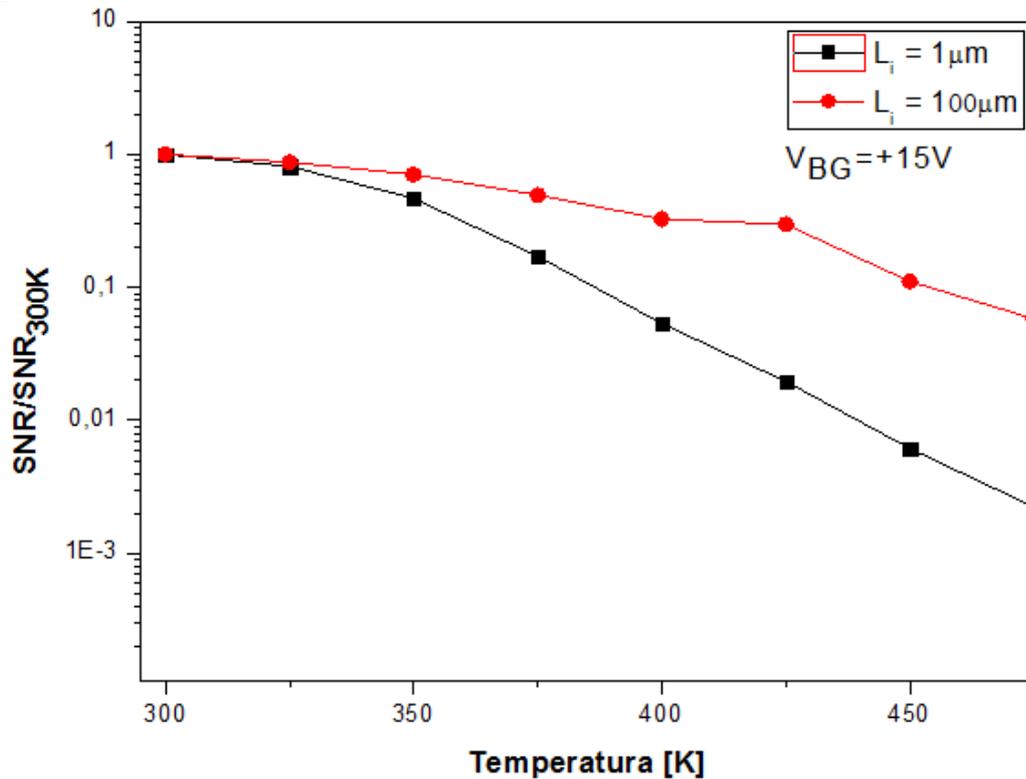
Trabalhando em baixas temperaturas, a relação sinal-ruído (SNR) aumenta, pois a corrente de escuro é baixa devido aos elétrons não terem energia suficiente para saltar da banda de valência para a banda de condução, acarretando numa baixa geração térmica de portadores [45]. Os comprimentos intrínsecos pequenos apresentam maiores SNR comparados com grandes L_i , devido à baixa recombinação de portadores livres. À medida que a temperatura aumenta, a SNR é degradada violentamente devido ao fenômeno da geração térmica ser dominante, resultando no aumento da (I_{DARK}), independente do comprimento intrínseco. Normalizando a SNR em relação à temperatura ambiente é possível verificar o quanto a SNR é sensível às variações de temperatura para $L_i=1\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$, conforme Figuras 68 e 69. Independente do modo de operação (acumulação/ inversão), os comprimentos intrínsecos grandes ($L_i=100\mu\text{m}$) apresentam menores sensibilidades à temperatura com relação aos pequenos comprimentos intrínsecos ($L_i=1\mu\text{m}$). Se numa dada aplicação a SNR for importante, os maiores L_i serão mais robustos às variações de temperatura.

Figura 68 – Relação sinal-ruído normalizada em 300K no modo acumulação para $L_i=1\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$



Fonte: Autor

Figura 69 – Relação sinal-ruído normalizada em 300K no modo inversão para $L_i=1\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$



Fonte: Autor

8 CONCLUSÕES

Através dos resultados experimentais e das simulações numéricas, foi possível constatar os efeitos causados na corrente de escuro, corrente fotogerada, eficiência quântica máxima e relação sinal ruído submetidos às variações de temperatura e polarização de porta traseira na detecção de comprimento de onda ($\lambda=376\text{nm}$) na faixa do ultravioleta (UV).

Foi demonstrado que a corrente de escuro é altamente influenciada pela temperatura em virtude do fenômeno de geração térmica de portadores e que seu nível de corrente pode ser aumentado com o aumento da tensão reversa (V_D). Adicionalmente, a corrente de escuro é proporcional ao tamanho da RDD, desde que haja uma alta taxa de geração. Logo, operando em modo acumulação, a (I_{DARK}) diminui com o aumento de (L_i), pois nesta situação, o fotodiodo possui somente depleção lateral, resultando numa dependência direta do número de dedos (m). Já no modo inversão, foi constatado o inverso, sendo que (I_{DARK}) aumenta com o aumento de (L_i), pois neste caso o perfil de dopantes comporta-se como P+N-N+, e uma alta taxa de geração se estende ao longo de (L_i), como se fosse um RDD vertical.

Foi constatado que a polarização de porta traseira altera os modos de operação do fotodiodo devido à mudança na disponibilidade dos portadores da região intrínseca. Adicionalmente, o potencial de junção também é afetado por (V_{BG}).

Foi verificado que a diferença entre as correntes de acumulação e inversão está relacionada com a alta influência das taxas de geração/recombinação. Operando em alta temperatura para $V_{\text{BG}} < 0\text{V}$ a taxa de geração é baixa fora da RDD, pois ao longo de L_i existe uma alta recombinação dos portadores minoritários que são os elétrons no modo acumulação. Para $V_{\text{BG}} > 0\text{V}$, existe uma inversão na região intrínseca, neste momento o perfil de dopantes comporta-se como P+N-N+ e a concentração de portadores minoritários neste caso são as lacunas, que irão se recombinar ao longo da região intrínseca. Adicionalmente, foi verificado por simulação que em torno de $V_{\text{BG}}=-3\text{V}$, o fotodiodo possui máxima absorção dos fótons, que contribuem para a corrente total. Neste caso, o dispositivo possui depleção lateral e vertical onde a taxa de recombinação é praticamente zero. Em ambos os regimes de inversão e acumulação operando em alta temperatura, o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários resulta na diminuição da corrente de inversão e acumulação, pois quanto maior for este tempo, menor será a taxa de geração dos portadores majoritários que contribuem para estas correntes.

Foi constatado que para comprimentos intrínsecos pequenos a corrente de inversão torna-se maior que a corrente de acumulação, pois ocorre o fenômeno de inversão de

portador, sendo mais pronunciado no regime de inversão. Portanto, quando a razão entre as correntes de inversão e acumulação for maior que um ($I_{\text{INVERSÃO}} > I_{\text{ACUMULAÇÃO}}$) temos prevalência do processo de recombinação, e se for menor que um ($I_{\text{INVERSÃO}} < I_{\text{ACUMULAÇÃO}}$) do processo de geração.

Foi verificado que a corrente fotogerada no regime de inversão, aumenta em altas temperaturas em virtude do aumento do coeficiente de absorção (α_m), contribuindo com o aumento da taxa de portadores livres dentro da RDD. Já a corrente fotogerada na acumulação apresenta comportamento contrário ao diminuir com a temperatura, pois este fenômeno está relacionado com a redução do comprimento de difusão (L_{dif}) devido ao aumento da concentração de portadores minoritários e na degradação da mobilidade e do seu tempo de vida.

A máxima eficiência quântica total alcançada foi no regime de inversão com $QE_{\text{TOTAL}}=56,2\%$ para $L_i=1\mu\text{m}$, devido ao aumento do coeficiente de absorção. Já na acumulação a máxima eficiência quântica foi de $QE_{\text{TOTAL}}=21,7\%$ para $L_i=10\mu\text{m}$, em virtude da redução do comprimento de difusão. No caso dos fotodiodos operarem em temperatura ambiente, a máxima eficiência quântica alcançada é de $QE_{\text{TOTAL}}=33\%$ para $L_i=5\mu\text{m}$, independente do modo de operação (acumulação/inversão).

Foi constatado que a relação sinal-ruído é degradada fortemente com o aumento da temperatura. Esta relação apresentou maiores valores para comprimentos intrínsecos pequenos, devido à baixa recombinação dos portadores livres. Adicionalmente, a relação sinal- ruído apresenta maior sensibilidade às variações de temperatura para comprimentos intrínsecos pequenos.

Portanto, para aplicações de fotodeteção na faixa do ultravioleta em alta temperatura, os fotodiodos devem possuir comprimentos intrínsecos pequenos operando em modo inversão, onde a eficiência quântica total apresentou-se melhor. Já em temperatura ambiente, recomenda-se que o fotodiodo possua apenas comprimento intrínseco pequeno, pois a polarização V_{BG} não afeta a eficiência do dispositivo. Se a relação-sinal ruído for importante na aplicação, existe um meio termo a ser considerado entre os comprimentos dos fotodiodos. Se a aplicação requer robustez às variações de temperatura, é recomendado que os comprimentos intrínsecos sejam grandes, pois a sensibilidade é menor, resultando numa degradação menos pronunciada quando comparado com fotodiodos de comprimentos pequenos. Entretanto, se a aplicação requer operação entre 300K a 400K, os fotodiodos com L_i pequenos apresentam melhor relação sinal-ruído.

9 PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE O PERÍODO DE MESTRADO

1. NOVO,C. ; ZAPATA, R. ; BATISTA, J. ; STOLF, R. ; GIACOMINI, R.C. **Optimized design of Lateral PIN Photodiodes regarding responsivity and SNR as a function of operating temperature.** In. International Caribbean Conference of Devices, Circuits and Systems (ICCDCS), 2014, Playa del Carmen. ICCDCS, 2014.
2. NOVO,C. ; BATISTA, J. ; GIACOMINI, R.C. ; FLANDRE, D. . **Intrinsic Length and Temperature Influence on the Operation of PIN SOI Photodiodes.** Workshop on Semiconductors and Micro and Nano Technology, 2015, São Bernardo do Campo. SEMINATEC, 2015.

REFERÊNCIAS

1. AFZALIAN, A. **Optical detectors in SOI CMOS technologies for blue DVD and short distance optical communication**. Universite Catholique de Louvain. Belgium. 2006.
2. M. BIGAS, E. C. J. F. J. S. Review of CMOS image sensors. **Microelectronics Journal**, v. 37, p. 433–451, 2006.
3. MADEIRA, F. M. **Estudo comparativo entre tecnologias CMOS, NMOS e SOI em um circuito de APS**. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo. 2012.
4. WONG, H. S. P. **CMOS Image sensors-recent advances and device scaling considerations**. International Electron Devices Meeting (IEDM). Chicago: [s.n.]. 1997. p. 201-204.
5. THEUWISSEN, A. **CCD or CMOS Image sensors for consumer digital still photography?** International Symposium on VLSI Technology, Systems, and Applications. [S.l.]: [s.n.]. 2001. p. 168-171.
6. HILLEBRAND, M. et al. **High speed camera system using a CMOS image sensor**. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. [S.l.]: [s.n.]. 2000. p. 656-661.
7. BLUE Ray Disc. Disponível em: <<http://www.bluraydisc.com/Section-13470/Sesction-13628/Index.html>>.
8. ISHAK, W. **An Overview of agile technologies and agile laboratories**. IEEE KITCHENER-WATERLOO. Waterloo: [s.n.]. 2003. p. 1-2.
9. NOVO, C. DICK. **Estudo comparativo de tecnologias CMOS e SOI-CMOS aplicadas a fotodiodos laterais PIN**. Centro Universitário da FEI, 2013.
10. BULTEEL, O.; FLANDRE, D. Optimization of Blue/UV Sensors Using p-i-n Photodiodes in Thin-Film SOI Technologie. **ECS Transactions**, v. 19, n. 4, p. 175-180, 2009.
11. MOORE, G. E. **Progress in digital integrated electronics**. Internation Electron Devices Metting. [S.l.]: [s.n.]. 1975. p. 11-13.
12. WALKER, H. R. **Ótica e física moderna**. Sexta Edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 2003.

13. CEPA. Disponível em: <http://www.cepa.if.usp.br/e-fisica/optica/universitario/cap01/cap1_02.php>.
14. JÚNIOR, C. S.; SASSON, S.; SANCHES, P. S. B. **Ciências entendendo a natureza**. São Paulo: Saraiva S A, 2009 .
15. ZÍLIO, S. C. **Óptica moderna fundamentos e aplicações**. São Paulo: Renovarum Ltda, 2000.
16. STREEMAN, B. G.; BANERJEE, S. **Solid state electronic devices**. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
17. COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. **Physics of semiconductor devices**. Massachusetts: Kluwer Academic, 2002.
18. JACOBUS. W. SWART. **Materiais elétricos**, 2011.
19. SZE, S. M. **Physics of semiconductor devices**. New York: John Wiley & Sons, 1981.
20. MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. B. **Caracterização elétrica de tecnologia e dispositivos MOS**. São Paulo: Thomson, 2003.
21. GUTIERREZ, E. A.; CLAYES, C. L. **Low temperature electronics: Physics, Devices, Circuits and Applications**. [S.l.]: Academic Press, v. 964p., 1991.
22. SELBERHERR, S. MOS Device Modeling at 77K. **IEEE Transactions on electron devices**, v. 36, n. 8, p. 1464-1474, 1989.
23. AFZALIAN, A.; FLANDRE, D. **Physical modelling and design of thin-film SOI lateral p-i-n photodiodes**. **IEEE Trans. On Electron Devices**, v. 52, n. 6th. Edition, p. 1116-1122, 2005.
24. STREEMAN, B. G.; BANERJEE, S. **Solid state electronic devices**. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
25. CAMPOS, F. D. S. **Sistemas de imagem CMOS com alta responsividade**. Unicamp. Campinas. 2008.
26. ZIMMERMANN, H. **Integrated silicon opto-electronics**. Berlin: Springer, 2000.
27. WOODWARD, T. K.; KRISHNAMOORTHY, A. **1Gb/s Integrated optical detectors and receivers in commercial CMOS technologies**. **IEEE Journal of Select. Topics in Q. Electron**, v. 5, n. 2nd. Edition, p. 146-156, 1999.

28. COLINGE, J. P. **Silicon-on-insulator technology: Materials to VLSI**. 3. ed. Boston: Kluwer Academic, 2004.
29. COLINGE, J. P. **FinFETs and other multi-gate transistors**. New York: Springer, 2008.
30. MADEIRA, F. M. **Estudo comparativo entre tecnologias CMOS, NMOS e SOI em um circuito de APS**. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo. 2012.
31. AFZALIAN, A.; FLANDRE, D. **Physical modelling and design of thin-film SOI lateral p-i-n photodiodes**. **IEEE trans. On Electron Devices**, v. 52, n. 6th. Edition, p. 1116-1122, 2005.
32. GUTIERREZ, E. A.; CLAYES, C. L. **Low temperature electronics: Physics, Devices, Circuits and Applications**. [S.l.]: Academic Press, v. 964p., 1991.
33. AMBROZIAK, A. **Semiconductor photoelectric devices**. London: Iliffe, 1968.
34. KNITTL, Z. **Optics of thin films**. Prague: Wiley & Sons, 1976.
35. AFZALIAN, A.; FLANDRE, D. **Characterization of quantum efficiency, effective lifetime and mobility in thin film ungated SOI lateral PIN photodiodes**. **Solid State Electronics**, v. 51, n. 2, p. 337-342, 2007.
36. SOUZA, M. et al. **Temperature and silicon film thickness influence on the operation of latera SOI PIN photodiodes for detection of short wavelengths**. **Journal of Integrated Circuits and Systms**, v. 6, n. 2, p 107-113, Sepetember 2011.
37. GUOLI, LI.; et al. **Operation of thin-film gated SOI lateral PIN photodetectors with gate voltage applied and intrinsic length variation**. **Journal Elsevier**, June 2014.
38. KOVALEV, D.; et al. **The temperature dependence of the absorption coefficient of porous silicon**. **American Institute of Physics**, August 1996.
39. HARRIS, THOMAS R. **Optical properties of Si at elevated temperatures**. **Air Force Institute of Technology**. March 2010.
40. STEWART, M.; HATALIS, M H. **High performance gated lateral PIN diodes**. **Solid State Electronics**. May 2000.
41. **Atlas User's Manual**. Santa Clara: Silvaco, v. 5.16.3.R, 2010.

42. KITTEL, C. **Introduction to solid state physics**. 6th Edition. ed. [S.l.]: J. Wiley and Sons, 1986. 81-85 p.
43. ZIMAN, J. M. **Principles of the theory of solids**. 2nd Edition. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 1972.
44. SELBERHERR, S. **MOS device modeling at 77K**. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 36, n. 8, p. 1464-1474, 1989.
45. MCKELVEY, J. P. **Solid state and semiconductor physics**. [S.l.]: Krieger Pub Co, v. 512p., 1982.
46. DORKEL, J. M.; LETURCQ, P. **Carrier mobilities in silicon semi-empiric related to temperature, doping and injection level**. Solid State Electronics, v. 24, p. 821-825, 1981.