

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

CARLA DICK DE CASTRO PINHO NOVO

**ESTUDO COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS CMOS E SOI-CMOS
APLICADAS A FOTODIODOS LATERAIS PIN**

São Bernardo do Campo

2013

CARLA DICK DE CASTRO PINHO NOVO

ESTUDO COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS CMOS E SOI-CMOS
APLICADAS A FOTODIODOS LATERAIS PIN

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

São Bernardo do Campo

2013

Pinho Novo, Carla Dick de Castro.

Estudo comparativo de tecnologias CMOS e SOI-CMOS aplicadas a fotodiodos laterais PIN / Carla Dick de Castro Pinho Novo. São Bernardo do Campo, 2013.

150 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Renato C. Giacomini.

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

CDU 621.383



Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGE-10

Programa de Mestrado de Engenharia Elétrica

Aluno: Carla Dick de Castro Pinho Novo

Matrícula: 112118-5

Título do Trabalho: Estudo comparativo de tecnologias CMOS e SOI-CMOS aplicadas a fotodiodos laterais PIN.

Área de Concentração: Dispositivos Eletrônicos Integrados

Orientador: Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini

Data da realização da defesa: 12/11/2013

ORIGINAL ASSINADA

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

São Bernardo do Campo, 12 de Novembro de 2013.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini

Ass.: _____

Prof. Dr. Victor Sonnenberg

Ass.: _____

Prof.^a Dr.^a Katia Franklin Albertin Torres

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Dedico este trabalho ao meu esposo Fábio, pelo amor e doação que me permitiram desenvolver este trabalho com tranquilidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Renato Camargo Giacomini, meu orientador, por ter me dado uma nova oportunidade de trilhar um caminho que é realmente a minha vocação, confiando no meu trabalho e dando autonomia para a sua realização.

A amiga Arianne Pereira, pela sua generosidade contagiante, pela sua constante alegria e pela ajuda em todos os momentos.

Aos amigos do grupo de pesquisa André Perin, Darcio Silvestre, Cleiton Fidelix e Frederico Madeira, pela parceria nos trabalhos realizados em conjunto com os quais pude avançar em meu aprendizado e desenvolvimento.

Aos demais amigos Caio, Geisa, Andrey, Bruna, Juliana, Ligia e Genaro, pelo compartilhamento de experiências, medos, expectativas e pelas simples conversas nos momentos de descontração.

Aos professores do grupo IED Dr. Marcelo Antonio Pavanello, Dra. Michelly de Souza, Dr. Salvador Pinillos Gimenez e Dr. Rodrigo Doria pelo conhecimento e experiência compartilhados.

Ao meu pai Alberto, minha mãe Lizete, meus irmãos Junior e Renato e minhas tias Lenice e Beth, pelo amor, fé e por sempre acreditarem na minha capacidade.

Ao meu marido Fábio, por estar ao meu lado dando suporte e carinho durante esses dois anos.

Ao Centro Universitário da FEI, por oferecer a infraestrutura necessária para a realização dessa pesquisa.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro indispensável para a realização deste trabalho.

A tantas outras pessoas, que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho e que, de forma involuntária foram aqui omitidos.

*O heroísmo do trabalho está em “acabar”
cada tarefa.*

São Josemaría Escrivá

RESUMO

A detecção óptica tem várias aplicações comerciais importantes, tais como sistemas de imagem, armazenamento de dados ópticos, comunicação óptica de dados, aplicações nas áreas médica, de meio-ambiente e espacial. Tais funções exigem a utilização de fotodetectores eficientes, tais como os fotodiodos PIN. Este trabalho consiste em um estudo sobre as características dos fotodiodos PIN de silício, tais como sua responsividade, eficiência quântica, fotocorrente e corrente de escuro. Através dessa análise foi possível demonstrar a adequação destes dispositivos às diferentes aplicações dependendo do tipo de tecnologia utilizada (CMOS SOI ou BULK). Por meio de simulações numéricas foi constatado que o fotodiodo PIN CMOS SOI, com camada de silício de 80nm, apresenta maior responsividade na faixa de comprimento de onda (λ) de 400nm. Já a responsividade dos fotodiodos PIN CMOS BULK atinge seu valor máximo para 470nm. Este fato demonstra que a tecnologia SOI estudada é vantajosa na faixa do ultravioleta do espectro eletromagnético. Também foram realizadas simulações numéricas com dispositivos *multifingers*. Um dos parâmetros analisados foi o comprimento da sua região intrínseca (L_I). Para os fotodiodos PIN CMOS SOI totalmente depletados, a maior eficiência quântica total (aproximadamente de 50% com $\lambda=390\text{nm}$), foi obtida para L_I de 35,5 μm , pois a região fotossensível é maior. Já nos dispositivos parcialmente depletados, a maior eficiência foi obtida com L_I de 13,4 μm , devido à menor influência do fenômeno de recombinação de portadores. O comprimento de difusão dos portadores minoritários (elétrons) foi estimado entre 3,71 e 11,11 μm . A corrente de escuro se mostrou mais evidente em dispositivos BULK, já que há maior área de junção. A tensão reversa (V_D) e a temperatura são parâmetros importantes para determinar a intensidade desta corrente. Outro parâmetro estudado neste trabalho foi a tensão de polarização de porta traseira, que altera a intensidade da fotocorrente que passa de 28pA em acumulação, para mais de 40pA em depleção nos fotodiodos SOI. Os resultados experimentais de intensidade de corrente e relação de sinal-ruído relativos aos dispositivos multifinger de tecnologia 2 μm testados demonstraram o mesmo comportamento previsto nas simulações numéricas a respeito da polarização de porta traseira (V_{BG}), sendo que a maior relação sinal-ruído foi obtida em acumulação do filme de silício (V_{BG} negativa), sendo aproximadamente quatro vezes maior que aquela apresentada com $V_{BG}=0\text{V}$; especialmente em altas temperaturas (maior que 360 K). Todas as características analisadas neste trabalho fundamentam a utilização dos fotodiodos SOI para aplicações específicas de baixos comprimentos de onda, tais como medidas de concentração de gases, mensuração de proteínas e níveis bacterianos, medidas de concentração de DNA e leitura de dados ópticos como o Blue-Ray. Além disso, aplicações que necessitam de resposta em velocidade alta também são indicadas para utilização do fotodiodo PIN SOI. Em contrapartida, os dispositivos BULK apresentam melhor desempenho quando toda a faixa do espectro visível é comparada, por isso, são indicados para sistemas de imagem em geral como a câmera digital.

Palavras chave: PIN, fotodiodo, fotocorrente, temperatura, polarização

ABSTRACT

Optical detection has several important commercial applications, such as imaging systems, optical data storage, optical data communication, medical applications, environmental and special areas. These functions require the use of efficient photodetectors, such as PIN photodiodes. This work consists of a study on the characteristics of silicon PIN photodiodes, such as its responsivity, quantum efficiency, dark current and photocurrent. Through this analysis it was possible to demonstrate the suitability of these devices for different applications depending on the type of used technology used (BULK or SOI). Through numerical simulations it was found that the PIN photodiode CMOS SOI with 80nm of silicon film, shows greater responsivity in the range of wavelength (λ) of 400nm. Although for BULK photodiodes, the responsivity reaches its maximum value at 470nm. This fact shows that the SOI technology is advantageous in the ultraviolet range of the electromagnetic spectrum. Also numerical simulations were performed in multifingers devices, in which one of the main parameter analyzed was the length of its intrinsic region (L_I). For PIN photodiodes fully depleted CMOS SOI, the total quantum efficiency (approximately 50% with $\lambda = 390\text{nm}$) was obtained for L_I of 35.5 μm , since the photosensitive region is larger. Already in the partially depleted devices, greater efficiency was obtained with 13.4 μm of L_I , where it is detected smaller influence of the recombination phenomenon. Thus, the diffusion length of the minority carriers (electrons) was estimated between 3.71 and 11.11 microns. The dark current was more evident in BULK devices, since there is a greater junction area. Moreover, the reverse voltage (V_D) and the temperature are important parameters to determine the intensity of this current. One of the main parameters studied in this work was the back-gate bias, which alters the intensity of the photocurrent from 28pA in accumulation to 40pA in depletion for SOI photodiodes. The experimental results of photocurrent and signal-to-noise ratio of multifinger technology showed the same behavior predicted in numerical simulations about the back-gate bias (V_{BG}), and the highest signal to noise ratio was obtained in accumulation of silicon film (negative V_{BG}), approximately four times greater than that presented with $V_{BG} = 0\text{V}$, especially at high temperatures (greater than 360 K). All traits analyzed in this study justify the use of SOI photodiodes for specific applications of low wavelengths, such as gas concentration measurements, measurement of protein and bacterial levels, measures of DNA concentration and optical data reading such as the Blue-Ray. In addition, applications that require high response speed are also indicated for SOI PIN photodiodes. Although, BULK devices have better performance when the entire range of the visible spectrum is compared, so they are suitable for general imaging systems like digital cameras.

Keywords: PIN, photodiode, photocurrent, temperature

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de telescópios refrativos: A) Telescópio Galileano (ocular côncava) B) Telescópio Kepleriano (ocular convexa). Fonte: [11].....	26
Figura 2 - O Espectro Eletromagnético. Fonte: [12].....	28
Figura 2 - Espectro Eletromagnético Visível ao Homem. Fonte: [13].....	28
Figura 4 - Uma onda eletromagnética representada por um raio de duas frentes de onda. Fonte: [14].....	29
Figura 5 – Representação do comprimento de onda (λ). Fonte: Autor.....	30
Figura 6 – Reflexão e refração de um raio luminoso numa interface dielétrica. Fonte: Autor “adaptado de” [15].....	31
Figura 7 – Banda de valência e condução em um metal (A) e em um semicondutor ou isolante (B). Fonte: [16].....	34
Figura 8 – Nível de condução e valência no espaço real. Fonte: Autor “adaptado de” [17]....	34
Figura 9 – A) Semicondutor de banda direta, B) Semicondutor de banda indireta. Fonte: Autor “adaptado de” [16].....	36
Figura 10 – “Salto” de um elétron do nível de energia permitido para a banda de condução. Fonte: Autor.....	37
Figura 11 – Movimento dos elétrons. A) Na ausência de campo elétrico. B) Na presença de campo elétrico. (As estrelas representam colisões). Fonte: [16].....	39
Figura 12 – Resistividade do silício a $T=300K$ em função da concentração de impurezas dopantes. Fonte: [16].....	40
Figura 13 – Processo de foto excitação direto e indireto. Fonte: Autor.....	43
Figura 14 – Coeficiente de absorção para o germânio, silício e GaAs. Fonte: [17].....	43
Figura 15 – Profundidade de Penetração do Silício em função do comprimento de onda. Fonte: [15].....	44
Figura 16 – Recombinação através dos centros de recombinação. Fonte: Autor “adaptado de” [17].....	45
Figura 17 – Junção PN e a sua simbologia. Fonte: Autor.....	47
Figura 18 – Diagrama de banda de energia em regiões do tipo N e P separadamente. Fonte: [16].....	47
Figura 19 – Diagrama de bandas da junção PN. Fonte: [17].....	48
Figura 20 – Criação da região de depleção por difusão de lacunas e elétrons. Fonte: [16].....	48

Figura 21 – 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 “adaptado de” [17].....	49
Figura 22 – Correntes de difusão, geração e recombinação em uma junção real. Fonte: [17].	51
Figura 23 – Vista frontal e lateral de um fotodiodo PIN. Fonte: Autor	52
Figura 24 – Largura de Banda. Fonte: [27]	57
Figura 25 – Tipos básicos de fotodiodos em tecnologia CMOS: P+/Nwell, N+/P _{SUB} e Nwell/P _{SUB} . Fonte: Autor	59
Figura 26 – Fotodiodo tipo PIN Vertical. Fonte: [29].....	60
Figura 27 – Fotodiodo PIN Lateral Circular. Fonte: [30].....	61
Figura 28 – Fotodiodo Finger em Nwell em tecnologia CMOS convencional de 0,35 μ m. Fonte: [32]	62
Figura 29 – Fotodiodo lateral PIN SOI. Fonte: Autor “adaptado de” [15]	63
Figura 30 – Fotodetector SOI do tipo metal-semicondutor-metal (trincheira). Fonte: [38].....	64
Figura 31 – Ilustração da rugosidade da camada de silício utilizado para aumentar a responsividade. Fonte: [40]	65
Figura 32 – Visão esquemática do fotodetector SOI RCE. Fonte: [41]	65
Figura 33 – Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura de faixa proibida do silício em função da temperatura. Fonte: [46].....	70
Figura 34 – Variação do potencial de Fermi e da porcentagem de impurezas ionizadas com a temperatura para	71
Figura 35 – Esquema simplificado do fotodiodo CMOS convencional. Fonte: Autor	77
Figura 36 – Esquema simplificado do fotodiodo PIN CMOS. Fonte: Autor	78
Figura 37 – Esquema simplificado do fotodiodo PIN CMOS SOI. Fonte: Autor.....	78
Figura 38 – Módulo da fotocorrente normalizada em função de V_D para o fotodiodo convencional CMOS com $L_{CAV}= 9\mu$ m, $t_{CAV}= 300$ nm. Fonte: Autor	79
Figura 39 – Módulo da fotocorrente normalizada em função de V_D para o fotodiodo convencional CMOS com $L_{CAV}= 9\mu$ m, para três diferentes tecnologias e $\lambda=400$ nm. Fonte: Autor.....	80
Figura 40 – Módulo da fotocorrente normalizada em função de V_D para o fotodiodo PIN CMOS. Fonte: Autor	81
Figura 41 – Módulo da corrente fotogerada normalizada em função de V_D para o fotodiodo PIN CMOS SOI. Fonte: Autor	82
Figura 42 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para o diodo convencional CMOS com diferentes L_{CAV} . Fonte: Autor	83

Figura 43 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para o diodo PIN em tecnologia SOI e BULK. Fonte: Autor.....	84
Figura 44 – Corrente Fotogerada normalizada pelo seu valor com $L_{P,N}$ de 4,5 μm em função de V_D para $\lambda=470\text{nm}$ para o fotodiodo PIN em tecnologia SOI e BULK com $L_i=9\mu\text{m}$. Fonte: Autor.....	85
Figura 45 – Corrente fotogerada em função da tensão aplicada para fotodiodo PIN CMOS SOI e BULK com diferentes $t_{p,N}$ e t_{SI} para iluminação de $\lambda=400\text{nm}$. Fonte: Autor.....	86
Figura 46 – Responsividade dos três dispositivos simulados em função do comprimento de onda para tensão de anodo de -0,5V. Fonte: Autor	87
Figura 47 – Módulo da corrente total normalizada por W em função da intensidade óptica incidente por unidade de área para fotodiodos PIN CMOS SOI e BULK para $\lambda=400\text{nm}$, $t_{si}=t_{p,N}=80\text{nm}$. Fonte: Autor	88
Figura 48 – Razão entre a corrente total e corrente de escuro em função da intensidade óptica incidente por unidade de área para fotodiodos PIN CMOS SOI e BULK para $\lambda=400\text{nm}$. Fonte: Autor.....	89
Figura 49 –Corrente fotogerada em função de V_D para fotodiodos PIN CMOS SOI e BULK com $\lambda=400\text{nm}$ e diferentes valores de N_I Fonte: Autor	90
Figura 50 – Refletividade do fotodiodo PIN CMOS BULK em função de λ para diferentes reflexões. Fonte: Autor	91
Figura 51 – Estrutura multi-camada de uma estrutura SOI. Fonte: Autor “adaptado de” [15]	92
Figura 52 – Refletividade do fotodiodo PIN CMOS SOI em função de λ para diferentes reflexões. Fonte: Autor	93
Figura 53 – Amplitude de I_D em função da frequência de modulação da intensidade luminosa para três diferentes dispositivos com $\lambda=800\text{nm}$. Fonte: Autor.....	94
Figura 54 – Amplitude de I_D em função da frequência de modulação da intensidade luminosa para três diferentes dispositivos com $\lambda=400\text{nm}$. Fonte: Autor.....	95
Figura 55 – Amplitude de I_D em função da frequência de modulação da intensidade luminosa para o fotodiodo PIN CMOS SOI com substrato HR e SR com $\lambda=800\text{nm}$. Fonte: Autor	96
Figura 56 – Palavra digital simulada na resposta dos fotodiodos no domínio do tempo. Fonte: Autor.....	97
Figura 57 – Resposta temporal dos fotodiodos PIN CMOS BULK e CMOS SOI com $\lambda=400\text{nm}$. Fonte: Autor	97
Figura 58 – Resposta temporal do fotodiodo PIN CMOS SOI com $\lambda=400\text{nm}$ para dois tipos de substrato. Fonte: Autor	98

Figura 59 – Resposta temporal do fotodiodo PIN CMOS SOI com $\lambda=800\text{nm}$ para dois tipos de substrato. Fonte: Autor	98
Figura 60 – Leiaute de um fotodiodo PIN CMOS com vários dedos. Fonte: Autor.....	99
Figura 61 – Figura esquemática de um fotodiodo PIN CMOS BULK com 3 dedos. Fonte: Autor.....	100
Figura 62 – Figura esquemática de um fotodiodo PIN CMOS SOI com 3 dedos. Fonte: Autor	101
Figura 63 – Eficiência quântica total de um fotodiodo PIN CMOS SOI em função de L_I para três comprimentos de onda. Fonte: Autor	102
Figura 64 – Eficiência quântica interna e $P_{\text{ABS}}/P_{\text{IN}}$ de um fotodiodo PIN CMOS SOI em função de L_I . Fonte: Autor	104
Figura 65 – Corrente total de um fotodiodo PIN CMOS BULK HR em função de λ . Fonte: Autor.....	106
Figura 66 – Corrente total de um fotodiodo PIN CMOS BULK SR em função de λ . Fonte: Autor.....	106
Figura 67 – Eficiência máxima (η) e $A_{\text{FOTO}}/A_{\text{TOTAL}}$ para os fotodiodos PIN CMOS BULK e SOI SR. Fonte: Autor	107
Figura 68 – EQ_T em função de λ para o fotodiodo PIN CMOS SOI com diferentes $L_{P,N}$. Fonte: Autor.....	108
Figura 69 – EQ_T em função de λ para o fotodiodo PIN CMOS BULK SR com diferentes $L_{P,N}$. Fonte: Autor.....	109
Figura 70 – Corrente de escuro em função de L_I para os fotodiodos PIN CMOS SOI. Fonte: Autor.....	110
Figura 71 – Corrente de escuro em função de L_I para os fotodiodos PIN CMOS BULK. Fonte: Autor.....	110
Figura 72 – Corte Lateral do Fotodiodo PIN CMOS BULK com 5 dedos. Fonte: Autor.....	111
Figura 73 – Corte Lateral do Fotodiodo PIN CMOS BULK com 20 dedos. Fonte: Autor....	112
Figura 74 – SNR em função de L_I para os fotodiodos PIN CMOS BULK e SOI SR. Fonte: Autor.....	113
Figura 75 – I_D em função de V_{BG} para o fotodiodo PIN CMOS SOI SR. Fonte: Autor	114
Figura 76 – Concentração de lacunas em função da profundidade do filme de silício para o fotodiodo PIN CMOS SOI SR. Fonte: Autor.....	114
Figura 77 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS BULK em função de V_{BG} . Fonte: Autor	115

Figura 78 – Potencial do fotodiodo PIN CMOS BULK com um dedo em corte lateral com $V_{BG}=5V$. Fonte: Autor.....	116
Figura 79 – Potencial do fotodiodo PIN CMOS BULK com dez dedos em corte lateral com $V_{BG}=5V$. Fonte: Autor.....	116
Figura 80 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS BULK em função de L_I para diferentes V_{BG} . Fonte: Autor.....	117
Figura 81 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para um fotodiodo PIN CMOS BULK com $m=10$ para várias temperaturas de operação. Fonte: Autor.....	118
Figura 82 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para um fotodiodo PIN CMOS SOI com $m=10$ para várias temperaturas de operação. Fonte: Autor.....	118
Figura 83 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI em função da temperatura para diferentes comprimentos de onda. Fonte: Autor.....	119
Figura 84 – Corrente total do fotodiodo normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função de λ , para o fotodiodo PIN CMOS SOI em diferentes temperaturas. Fonte: Autor.....	120
Figura 85 – Corrente total do fotodiodo normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função de λ , para o fotodiodo PIN CMOS SOI com $m=10$ e $m=30$. Fonte: Autor..	121
Figura 86 – Largura da faixa proibida em função de x para duas temperaturas no dispositivo PIN CMOS SOI SR $m=10$. Fonte: Autor.....	121
Figura 87 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI iluminado com $\lambda=397nm$ para diferentes temperaturas. Fonte: Autor.....	123
Figura 88 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI iluminado com $\lambda=397nm$ para diferentes valores de V_D em função de V_{BG} . Fonte: Autor.....	124
Figura 89 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI iluminado com $\lambda=397nm$ em função de V_D . Fonte: Autor.....	124
Figura 90 – Corrente de escuro e corrente total normalizada pelo seu valor em 300K; em função da temperatura. Fonte: Autor.....	125
Figura 91 – Relação Sinal-Ruído normalizada pelo seu valor com $V_{BG}=0V$, em função da temperatura para $V_D=-1,5V$. Fonte: Autor.....	126
Figura 92 – Relação Sinal-Ruído normalizada pelo seu valor com $V_{BG}=0V$, em função da temperatura para $V_D=-0,5V$. Fonte: Autor.....	126
Figura 93 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI em função de V_{BG} para diferentes comprimentos de onda. Fonte: Autor.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais dimensões e parâmetros dos dispositivos simulados.....	78
Tabela 2 – Comprimentos da região de depleção em função de N_1	89
Tabela 3 – Principais dimensões dos dispositivos Multi-Finger	100
Tabela 4 –Valores da RDD dos dispositivos Multi-Finger	101
Tabela 5 –Valores da RDD total dos dispositivos Multi-Finger	103

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{FS}	Área fotossensível do dispositivo [m^2]
A_T	Área total do dispositivo [m^2]
B	Campo magnético [T]
B	Largura de banda [Hz]
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo [3×10^8 m/s]
d	Largura da região de depleção total [m]
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]
E	Campo elétrico [N/C]
E	Energia do fóton [eV]
E_C	Mínima energia da banda de condução [eV]
E_d	Energia do nível permitido 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	Frequência [Hertz]
$G_{N,P}$	Taxa de geração de pares elétron-lacuna originada por fontes externas de energia [$cm^{-3}.s^{-1}$]
h	Constante de Planck [eV.s]
I_{DARK}	Corrente de escuro [A]
I_{DISP}	Corrente disponível no dispositivo sem recombinação [A]
$I_{FG(max)}$	Corrente fotogerada máxima [A]
I_{FG}	Corrente gerada pela incidência de luz [A]
I_T	Corrente total [A]
I_{Tder}	Corrente total de deriva [A]
I_{Tdif}	Corrente total de difusão [A]

J	Densidade de corrente ideal [A/m ²]
J _N	Densidade de corrente de deriva de elétrons [A/m ²]
J _{N(dif)}	Densidade de corrente de difusão de elétrons [A/m ²]
J _P	Densidade de corrente de deriva de lacunas [A/m ²]
J _{P(dif)}	Densidade de corrente de difusão de lacunas [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 x 10 ⁻²³ 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 da radiação luminosa [m]
L _{CAV}	Comprimento da cavidade de um fotodiodo convencional [m]
L _d	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 _P	Comprimento de difusão de lacunas [m]
m	Quantidade de dedos do fotodiodo multi-finger [adimensional]
m _e [*]	Massa efetiva do elétron [Kg]
m _h [*]	Massa efetiva da lacuna [Kg]
n	Concentração de elétrons em um semiconductor intrínseco [cm ⁻³]
n ₀	Concentração de elétrons em equilíbrio [cm ⁻³]
N _A	Concentração de dopantes do tipo P [cm ⁻³]
N _A ⁻	Quantidade de portadores aceitadores ionizados [cm ⁻³]
N _C	Densidade de estados da banda de condução [adimensional]
N _D	Concentração de dopantes do tipo N [cm ⁻³]
N _D ⁻	Quantidade de portadores doadores ionizados [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]
q	Carga elementar do elétron [$1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$]
R	Refletividade [adimensional]
R	Responsividade [A/W]
SNR	Relação sinal-ruído [adimensional]
T	Temperatura [K]
t_{CAV}	Espessura da cavidade de um fotodiodo convencional [m]
t_{ox}	Espessura do óxido de passivação [m]
t_{oxb}	Espessura do óxido enterrado [m]
$t_{P,N}$	Espessura das regiões P+ e N+
t_{si}	Espessura da camada de silício [m]
U	Taxa de geração-recombinação intrínseca total [$\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
$U_{N,P}$	Taxa de geração-recombinação intrínseca para elétrons e lacunas [$\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
U_T	Tensão térmica [V]
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_{dN}	Velocidade de deriva dos elétrons [m/s]
$v_{sat,e}$	Velocidade de saturação de elétrons [m/s]
$v_{sat,h}$	Velocidade de saturação de lacunas [m/s]
W	Largura do fotodiodo [m]
α_m	Coeficiente de absorção [m^{-1}]
ζ	Campo elétrico originado pelos íons da região de depleção [N/C]
η	Máxima eficiência alcançável [adimensional]
λ	Comprimento de onda [m]
λ_c	Maior comprimento de onda que pode ser absorvido pelo silício [m]
μ_0	Mobilidade dos portadores independentes do campo elétrico [$\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$]

μ_N	Mobilidade dos elétrons [$\text{m}^2/\text{V.s}$]
μ_P	Mobilidade das lacunas [$\text{m}^2/\text{V.s}$]
ρ	Resistividade de um semiconductor homogeneamente dopado [$\Omega.\text{cm}$]
σ	Condutividade de um semiconductor homogeneamente dopado [$\Omega^{-1}.\text{cm}^{-1}$]
τ_e	Tempo de vida efetivo da geração térmica na região de depleção [s]
τ_N	Tempo de relaxação de elétrons [s]
τ_P	Tempo de relaxação de lacunas [s]
ϵ_{si}	Permissividade do silício [F/m]
Φ_F	Potencial de Fermi [V]

LISTA DE ABREVIATURAS

ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BGN	Band Gap Narrowing
BOX	Buried Oxide
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DBR	Distributed Bragg Reflector
DNA	Ácido Desoxirribonucléico
DVD	Digital Versatile Disc
HR	High Resistivity
IONIZ	Ionization
MOS	Metal Oxide Semiconductor
RCE	Resonant Cavity Enhancement
RDD	Região de Depleção
SHI	Shirahata
SOI	Silicon On Insulator
SR	Standard Resistivity
SRH	Shockley Read Hall
TFA	Thin-Film-On-ASIC
UV	Ultra-Violeta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	FUNDAMENTOS DA ÓPTICA	26
2.1	Uma visão histórica	26
2.2	Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética.....	29
2.3	Descrição corpuscular da luz.....	30
2.4	Reflexão, absorção e transmissão.....	30
3	FÍSICA DOS SEMICONDUTORES	33
3.1	Bandas de energia.....	33
3.2	Teoria da condução elétrica.....	38
3.2.1	Deriva	38
3.2.2	Difusão	41
3.2.3	Relação de Einstein	41
3.3	Fenômenos de geração e recombinação.....	42
3.3.1	Transições indiretas e diretas.....	42
3.3.2	Tipos de geração e recombinação.....	44
3.3.3	Recombinação SRH.....	45
3.4	Junção PN.....	46
3.4.1	Junção PN não polarizada.....	47
3.4.2	Junção PN polarizada	49
3.4.3	Corrente de geração e recombinação (diodo não ideal)	51
3.5	Fotodiodo PIN	52
4	DESEMPENHO DOS FOTODETECTORES.....	54
4.1	Eficiência quântica	54
4.2	Responsividade	55
4.3	Relação sinal-ruído	56
4.4	Sensibilidade	56
4.5	Velocidade de resposta	56
5	FOTODETECTORES EM SILÍCIO	58

5.1	Tecnologia CMOS convencional (BULK)	58
5.1.1	Fotodiodos convencionais (verticais)	59
5.1.2	Fotodiodos tipo PIN vertical.....	59
5.1.3	Fotodiodo PIN lateral circular	60
5.1.4	Fotodiodo PIN tipo finger.....	61
5.2	Tecnologia CMOS SOI	62
5.2.1	Tipos de dispositivos SOI fotodetectores	62
5.2.2	Dispositivos no substrato.....	67
5.2.3	Dispositivos verticalmente integrados.....	68
6	EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA	69
6.1	O efeito na concentração intrínseca e na ionização incompleta de portadores	69
6.2	O efeito na corrente de escuro	71
6.3	O efeito na mobilidade	72
7	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	75
7.1	O simulador Atlas	75
7.2	Modelos	75
8	DISPOSITIVOS SIMULADOS E RESULTADOS	77
8.1	Simulações de dispositivos com um único dedo	77
8.1.1	Estruturas simuladas	77
8.1.2	Comparação entre corrente fotogerada e corrente de escuro.....	79
8.1.3	Comparação entre responsividade dos fotodiodos	86
8.1.4	Potência óptica variável.....	87
8.1.5	Variação da concentração de dopantes da região intrínseca (N_I)	89
8.1.6	Estruturas multi-camadas	90
8.1.7	Resposta em frequência	93
8.1.8	Resposta transiente	96
8.2	Simulações de dispositivos multi-finger	99
8.2.1	Efeito da variação do comprimento da região intrínseca	101
8.2.2	Efeitos da variação da polarização do substrato	113
8.2.3	Efeito da variação da temperatura	117
9	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES	122
10	CONCLUSÕES	128
11	PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE O PERÍODO DE MESTRADO ...	131
	REFERÊNCIAS	132

APÊNDICE A – EXEMPLO DE ESTRUTURA COM ÚNICO DEDO	138
APÊNDICE B – EXEMPLO DE ESTRUTURA MULTIFINGER	142

1 INTRODUÇÃO

O sentido da visão dos seres humanos depende da luz. Sem luz, não se poderia enxergar o mundo ao redor [1]. Em função do estudo da luz ao longo da história, foram conquistados grandes avanços, como a demonstração do efeito fotoelétrico realizada por Einstein em 1905 [2], admitindo a natureza corpuscular da luz; ou a invenção da primeira máquina fotográfica em 1829 [2] realizada pelo francês Joseph Nicéphore Niépce em que uma lâmina de cobre recebia um banho de iodo, sendo que a imagem era captada através de uma lente e revelada com mercúrio quente. Somente em 1990, foi desenvolvida, pela Kodak, a primeira câmera fotográfica digital [3], que utilizava sensores CCD (charge-coupled device).

Atualmente o mercado optoeletrônico de silício está em rápida expansão. A tendência é a utilização da tecnologia CMOS em substituição à CCD, pois permite a integração das funções de imagem e do processamento de sinais dentro de um único chip, reduzindo o custo e incluindo uma série de funcionalidades.

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 à CCD, acesso aleatório de dados da imagem [4], mecanismos de leitura seletiva [5] e alta velocidade de imagem [6]. Todas estas características tornam a tendência da substituição da tecnologia CCD pela CMOS ainda mais evidenciada.

Neste contexto, o mercado de armazenamento de dados ópticos, como por exemplo, o DVD, também surgiu e se desenvolveu chegando ao padrão Blue-Ray [7], que permite uma maior capacidade de armazenamento e maior velocidade.

O mercado de comunicação óptica também se desenvolveu ao longo das últimas décadas. Primeiramente, este tipo de tecnologia era utilizado para longa distância através de fibra óptica, na qual a utilização de materiais custosos como os módulos III-V poderiam ser permitidos. Entretanto, cada vez mais, havia necessidade de expandir e melhorar a comunicação óptica de curta distância, tal como a comunicação de chip para chip ou mesmo dentro de um único chip para transferência de dados. Para tais aplicações, a utilização de materiais mais baratos, como o silício, se faz necessário, já que a solução necessita ser comercialmente viável em termos de custo.

De fato, o aparecimento da optoeletrônica não é uma mera coincidência. “A computação dever ser feita com elétrons, porém a comunicação com fótons” [8]. Essa é uma

frase do diretor dos laboratórios da HP em Palo Alto, Sr. Waguïh 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.

Devido ao fato do fóton, chamado de “partícula da luz”, descoberta por Einstein, não interagir de maneira significativa com outro fóton, eles podem propagar a informação que carregam de forma muito rápida. Por isso, são indicados para realizar a comunicação entre os sistemas ou mesmo dentro de um único chip. Pode-se dizer portanto que, pelo menos nos próximos anos, o processamento de sinais continuará a ser feito eletronicamente e a comunicação opticamente.

A era da comunicação já começou. Por isso, nunca foi tão importante melhorar as taxas de processamento de sinais e de comunicação. Mas até recentemente, somente foi visado o escalamento dos transistores, na tentativa de integrar o maior número de funcionalidades dentro de um único chip. Entretanto, se a taxa de processamento de sinais está crescendo; a efetiva transferência de dados através de conexões elétricas não está aumentando tanto quanto a velocidade dos transistores. Atualmente, estas interconexões constituem o gargalo para aumentar a velocidade de todo um sistema.

Deste modo, para substituir as interconexões elétricas por ópticas, é necessário desenvolver um completo sistema óptico composto por um emissor, e um receptor (o fotodetector), os quais devem estar integrados ao circuito eletrônico a fim de aumentar o desempenho e a velocidade, sem introduzir custos extras de fabricação.

Os campos da medicina e do meio ambiente também fazem uso de fotodetectores, como na medição de concentração de DNA e proteínas, nas taxas de raios ultravioletas (UV), e ozônio [9]. Ou seja, em todas as aplicações mencionadas até aqui, como na câmera fotográfica, no DVD, no Blue-Ray e nos sistemas de comunicação óptica; o fotodetector é o dispositivo mais importante, pois é através dele que o sinal óptico se transformará em elétrico. O fotodetector mais utilizado na atualidade é o diodo PIN de silício, composto por uma região P+ e uma região N+, intercaladas por uma região intrínseca.

Embora este seja o dispositivo mais utilizado recentemente em sistemas ópticos, ainda há lacunas de conhecimento no que diz respeito ao seu funcionamento, pois a maior parte dos estudos realizados em microeletrônica foi direcionada ao transistor. E no caminho de

melhorar o escalamento dos transistores, de acordo com a Lei de Moore [10], houve a introdução da tecnologia SOI que, devido à presença do óxido enterrado, o qual isola a região ativa do dispositivo do substrato, melhorou o desempenho dos transistores.

A contribuição desta dissertação consiste em um estudo sobre as características dos fotodiodos PIN de silício, demonstrando a sua adequação às diferentes aplicações mencionadas dependendo do tipo de tecnologia utilizado (CMOS SOI ou BULK). Este objetivo é alcançado através de simulações numéricas bidimensionais e medidas experimentais, os quais permitiram identificar os fenômenos físicos e parâmetros tecnológicos de interesse, analisando os seus impactos no desempenho dos dispositivos.

No segundo capítulo desta dissertação é feita uma revisão dos conceitos básicos da óptica moderna, incluindo uma revisão histórica, seguida da descrição qualitativa de radiação eletromagnética e a sua interação com a matéria, a fim de expor os fenômenos de reflexão, absorção e transmissão da luz.

No terceiro capítulo são introduzidos conceitos em relação à física dos semicondutores, representando apenas uma pequena parte da vasta literatura, sendo que apenas os assuntos pertinentes à operação dos dispositivos são incluídos aqui. Além disso, é apresentada uma breve discussão das junções p-n, bem como suas características relacionadas à geração-recombinação dentro da região de depleção.

No quarto capítulo é apresentado o conceito de desempenho de fotodetectores e seus indicadores, tais como responsividade, eficiência quântica interna e total, além da sensibilidade.

No quinto capítulo são apresentadas as tecnologias CMOS convencional e SOI, bem como os fotodetectores de silício que representam o estado da arte atual. Além disso, são apresentados os dispositivos a serem analisados nesta dissertação: os fotodiodos PIN.

No sexto capítulo é apresentado o efeito da variação da temperatura na operação dos semicondutores, tais como efeitos na mobilidade e no tempo de vida dos portadores.

No sétimo capítulo é feita uma breve introdução ao simulador utilizado, descrevendo os modelos físicos, bem como a estrutura simulada. São detalhados os parâmetros estudados ao longo do trabalho de forma a considerar os diversos efeitos de suas variações.

No oitavo capítulo, são apresentados os resultados obtidos pelas simulações, bem como dos dispositivos medidos. Inicialmente é feita a comparação da corrente fotogerada dos dispositivos SOI e BULK, em relação à variação de sua espessura, assim como a sua responsividade. Posteriormente, são apresentados os efeitos da variação do comprimento da

região intrínseca, da variação da dopagem e da variação da temperatura. Por fim, é apresentado um estudo em relação ao tempo de atraso dos dispositivos.

No nono capítulo são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do trabalho desenvolvido, através de comparações dos resultados encontrados no oitavo capítulo.

2 FUNDAMENTOS DA ÓPTICA

A óptica é o ramo da física que estuda a propagação da luz e a sua interação com a matéria. Em muitas áreas da ciência e tecnologia, o entendimento de determinados conceitos pode ser difícil porque seus efeitos não são facilmente visualizados. Na óptica, entretanto, é possível a visualização de resultados de um experimento em função de vários parâmetros. Tendo em vista esta facilidade de visualização, neste capítulo será apresentada uma visão histórica da óptica e seus desenvolvimentos iniciais, para que a compreensão da relação óptica ondulatória versus corpuscular fique mais clara.

2.1 Uma visão histórica

Alguns aspectos que merecem destaque na óptica estão ligados às ideias sobre a natureza da luz e aos caminhos paralelos que a óptica e o eletromagnetismo trilharam ao longo da história durante séculos.

Antes do século XVII existia pouco embasamento teórico para os fenômenos ópticos observados. Eram conhecidos alguns elementos tais como lentes e espelhos, mas a teoria descrevendo seu princípio de funcionamento não estava sedimentada. A primeira grande revolução óptica ocorreu durante o século XVII, quando houve um desenvolvimento significativo da sua formulação matemática, o que possibilitou a previsão dos fenômenos observados até então. Foram introduzidos alguns sistemas ópticos como o telescópio refrativo (Figura 1-A), que foi utilizado por Galileo Galilei (1564-1642) [1], para descobrir as luas de Júpiter, os anéis de Saturno e a rotação do Sol. O telescópio com ocular convexa [11], mostrado na Figura 1-B, foi introduzido por Johannes Kepler (1571-1630), que o utilizou para fazer importantes observações astronômicas, que se tornaram conhecidas como as leis de Kepler.

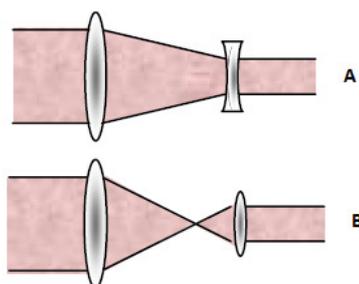


Figura 1 - Tipos de telescópios refrativos: A) Telescópio Galileiano (ocular côncava) B) Telescópio Kepleriano (ocular convexa). Fonte: [11]

Logo depois, em 1609, foi inventado o microscópio e começou neste período a elaboração da formulação matemática que permite o cálculo da propagação dos raios. Em 1611, Kepler apresenta a lei de refração para pequenos ângulos, estabelecendo que os ângulos de incidência e refração sejam proporcionais. A lei de Snell foi deduzida pela primeira vez em 1637, por René Descartes (1596-1650), que lançou mão de uma formulação matemática baseada em ondas de pressão num meio elástico. Aparentemente, esta foi a primeira vez em que a luz foi tratada como onda.

O fenômeno de difração foi descoberto por Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), através da observação de bandas de luz na sombra de um bastão iluminado por uma pequena fonte. Em seguida, Robert Hooke (1635-1703) refez os experimentos de Grimaldi sobre difração e observou padrões coloridos de interferência em filmes finos. Ele concluiu, corretamente, que o fenômeno observado devia-se à interação entre a luz refletida nas duas superfícies do filme e propôs que a luz originava-se de um movimento ondulatório rápido no meio, propagando-se a uma velocidade muito grande.

Surgiam assim, as primeiras idéias da teoria ondulatória, ligadas às observações de difração e interferência que eram conhecidas no caso das ondas sobre uma superfície de águas calmas.

Contribuições relevantes para a óptica foram feitas por Isaac Newton (1642-1727). Em 1665 ele realizou experimentos de dispersão num prisma, que o levou à conclusão da composição espectral da luz branca. Também introduziu a teoria corpuscular que afirmava que “a luz é composta de corpos muito pequenos, emitidos por substâncias brilhantes”. Nesta época Newton aceitava as duas teorias, tanto a corpuscular como a ondulatória.

Independente da natureza corpuscular ou ondulatória da luz, um dado importante a ser obtido era sua velocidade de propagação. Muitos acreditavam que ela se propagava instantaneamente, com velocidade infinita. Porém, em 1676, Dane Ole Christensen Römer (1644-1710) sugeriu a medida da velocidade da luz pela verificação do intervalo entre eclipses da lua de Júpiter, que se move praticamente no mesmo plano que este planeta se move em torno do Sol [11]. Durante o século XVIII acabou prevalecendo a teoria corpuscular, principalmente devido ao grande peso científico de Newton, que havia se inclinado na direção desta.

O início do século XIX presenciou o ressurgimento da teoria ondulatória. Entre 1801 e 1803, Thomas Young (1773-1829) propôs o princípio da superposição e com ele explicou o fenômeno de interferência em filmes finos. Devido ao peso científico de Newton e suas ideias

sobre a teoria corpuscular, Young foi bastante criticado pela comunidade científica inglesa devido a estes trabalhos.

Enquanto isso, a eletricidade e o magnetismo desenvolviam-se paralelamente à óptica. Em 1845 foi feita a primeira ligação entre o magnetismo e a luz por Michael Faraday (1791-1867) que ficou conhecido como efeito Faraday, que consiste na rotação da polarização da luz quando esta passa por certos tipos de materiais submetidos a campos magnéticos intensos. Entretanto, o relacionamento completo entre a óptica e o eletromagnetismo só foi estabelecido por James Clerk Maxwell (1831-1879), que inicialmente introduziu a corrente de deslocamento e reescreveu, numa forma diferencial, as equações empíricas existentes na época. As expressões resultantes, hoje conhecidas como equações de Maxwell, foram combinadas e geraram uma equação de ondas para o campo eletromagnético. Com isto concluiu-se que a luz era uma onda transversal, de natureza eletromagnética. Esta descoberta foi ratificada pelo trabalho de Heinrich Rudolf Hertz (1857- 1894), que em 1888 produziu e detectou ondas longas através de uma antena. Hoje, sabe-se que a luz visível é uma forma de onda eletromagnética, mas com comprimento de onda restrito ao intervalo que vai de 4×10^{-5} cm a 7.2×10^{-5} cm, como mostram as Figuras 2 e 3.

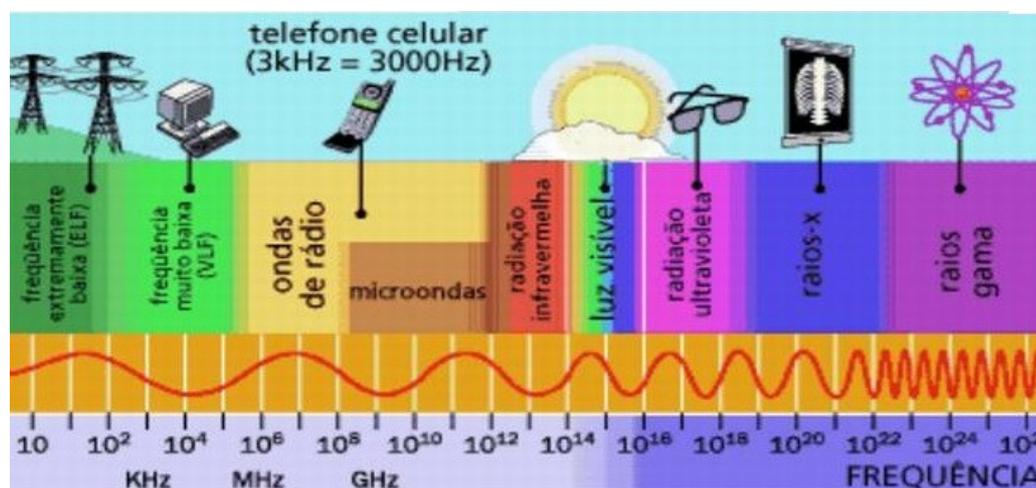


Figura 2 - O Espectro Eletromagnético. Fonte: [12]

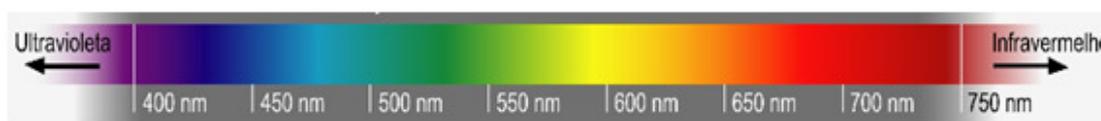


Figura 3 - Espectro Eletromagnético Visível ao Homem. Fonte: [13]

Mas foi entre 1900 e 1905, que Albert Einstein (1879-1955), desenvolveu os seus trabalhos sobre a teoria da relatividade e sobre o efeito fotoelétrico. Neste último, admitia-se a

teoria corpuscular da luz, e consistia na emissão de elétrons pela matéria sob a ação da luz. Por isso, atualmente, diz-se que a luz tem natureza dual porque, devido aos trabalhos de quantização do campo de radiação eletromagnética, conclui-se que as ondas eletromagnéticas são constituídas por partículas relativísticas, chamadas fótons. Portanto, certos fenômenos, como a interferência, podem ser descritos considerando-se o caráter ondulatório, e outros fenômenos, como o efeito fotoelétrico, considerando-se o caráter de partícula da luz. [1]

2.2 Descrição qualitativa de uma onda eletromagnética

Uma onda eletromagnética é definida como sendo a composição variável dos campos magnético (B) e elétrico (E) conforme mostra a Figura 4. Várias propriedades importantes da onda eletromagnética podem ser observadas nesta figura, como por exemplo, que os campos elétricos e magnéticos são perpendiculares à direção de propagação da onda e são perpendiculares entre si. Além disso, o produto vetorial entre os campos aponta no sentido de propagação da onda e variam senoidalmente com a mesma frequência e fase [14].

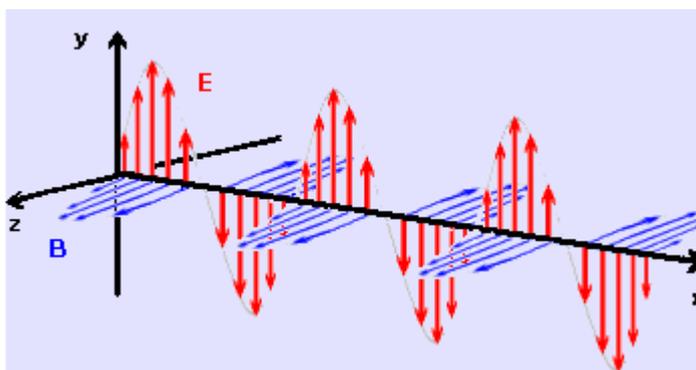


Figura 4 - Uma onda eletromagnética representada por um raio de duas frentes de onda. Fonte: [14]

A figura 4 ajuda a visualizar o que é, na verdade, uma situação muito complexa. Pode-se verificar que o campo magnético, está variando senoidalmente e, portanto, induz, um campo elétrico perpendicular que também varia senoidalmente. Entretanto, como o campo elétrico está variando senoidalmente, induz um campo magnético perpendicular que também varia senoidalmente e assim por diante. Os dois campos se criam mútua e continuamente.

A equação (1) descreve a relação entre a frequência (f), a velocidade de propagação (c) e o seu comprimento de onda (λ), como mostra a Figura 5.

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

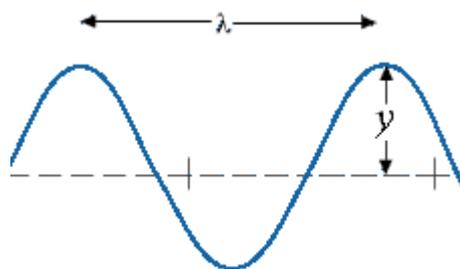


Figura 5 – Representação do comprimento de onda (λ). Fonte: Autor

2.3 Descrição corpuscular da luz

Conforme já mencionado, Einstein propôs que a radiação eletromagnética (ou simplesmente luz) era quantizada, ou seja, o seu quantum (quantidade elementar) é chamado de fóton. Segundo Einstein, um quantum de luz de frequência f tem uma energia dada pela equação (2).

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

Onde h é a constante de Planck, que tem o valor de $h=6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$

A menor energia que uma onda luminosa pode ter é hf (Equação 2), que é a energia de um único fóton. Se a onda possui uma energia maior, esta deve ser um múltiplo inteiro de hf .

Einstein propôs ainda que sempre que a luz é absorvida ou emitida por um corpo, esta absorção ou emissão ocorre nos átomos do corpo. Quando um fóton de frequência f é absorvido por um átomo, a energia hf do fóton é transferida da luz para o átomo. Este evento de absorção implica na aniquilação do fóton. Quando um fóton de frequência f é emitido por um átomo, uma energia hf é transferida do átomo para a luz. Assim, os átomos de um corpo podem emitir ou absorver fótons.

2.4 Reflexão, absorção e transmissão

Como já foi mencionado no item 2.2, uma onda eletromagnética é composta pelo campo elétrico e magnético e a sua amplitude está ligada a magnitude do campo elétrico, que define a potência que está sendo transportada pela onda.

Nos meios homogêneos a propagação da luz é retilínea e quando um raio atinge a interface que separa dois meios distintos, uma fração da potência do raio incidente (P_{IN}) é

refletida (P_R) como se pode verificar na Figura 6, há também uma parte da potência que é transmitida (P_T) e uma terceira fração que é absorvida (P_A).

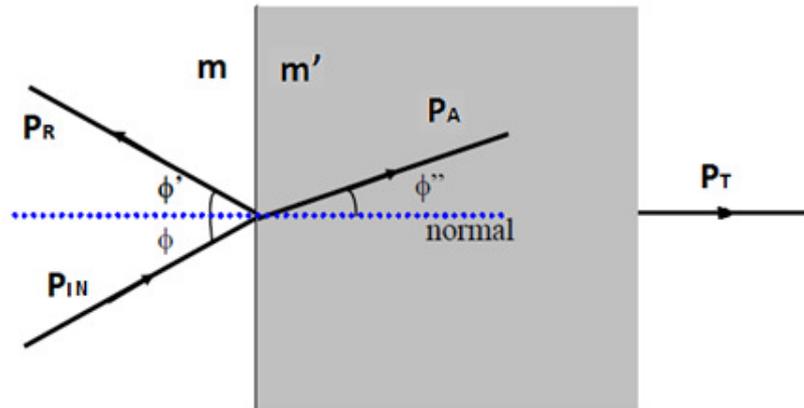


Figura 6 – Reflexão e refração de um raio luminoso numa interface dielétrica. Fonte: Autor “adaptado de” [15]

De acordo com a Lei da Conservação de Energia, tem-se que (equação 3):

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

A razão entre a potência refletida e a potência incidente é chamada de refletividade (R).

Cada meio (m) é caracterizado por um parâmetro chamado índice de refração, N_m , que determina a velocidade com que o raio se propaga naquele meio [8].

O índice de refração N_m é na verdade um índice complexo, pois a propagação da onda eletromagnética tem natureza complexa, já que é composta dos vetores E e B (campo elétrico e magnético) e é dado pela equação (4).

$$N_m = n_m - i.k_m \quad (4)$$

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, tem-se que n_m é definido pela equação (5):

$$n_m = \frac{c}{v} \quad (5)$$

Já a parte imaginária do índice de refração é chamada de coeficiente de extinção (k_m) e determina o coeficiente de absorção (α_m) de acordo com a equação (6):

$$\alpha_m(\lambda) = \frac{4 \cdot \pi \cdot k_m}{\lambda} \quad (6)$$

Portanto, nos semicondutores, o coeficiente de absorção depende do comprimento de onda e da energia do fóton. Este coeficiente e a espessura do meio m determinam a intensidade da potência absorvida (P_A). De fato, devido à absorção, após se propagar uma distância y , a intensidade da potência inicial P_{IN} da luz decai de acordo com a equação (7) de Lambert-Beer [15].

$$P(y) = P_{IN} \cdot e^{-\alpha_m \cdot y} \quad (7)$$

3 FÍSICA DOS SEMICONDUTORES

Neste capítulo são introduzidos conceitos em relação à física dos semicondutores, representando apenas uma pequena parte da vasta literatura, sendo que apenas os assuntos pertinentes à operação dos dispositivos são incluídos aqui. Além disso, é apresentada uma breve discussão das junções p-n, bem como suas características devido à geração-recombinação dentro da região de depleção.

3.1 Bandas de energia

Reações químicas se originam da troca de elétrons das camadas mais superficiais de um átomo. Elétrons das camadas mais internas não participam das reações químicas por causa da alta atração eletrostática dos seus núcleos [16]. Portanto, o fenômeno de transporte de energia é proveniente dos elétrons das camadas mais externas. Em termos de banda de energia, os elétrons responsáveis por formar as ligações são aqueles que ocupam a última banda, onde há maior nível energético. As primeiras bandas (mais baixas), chamadas de “1s” contêm elétrons que estão firmemente ligados aos átomos, enquanto que nas últimas bandas (mais altas) não há elétrons. A última banda que contém elétrons é chamada de banda de valência, e são os elétrons presentes nesta camada os responsáveis pelas ligações entre os átomos. A banda de energia permitida diretamente acima da banda de valência é chamada de banda de condução, a qual, em um semicondutor a $T=0K$ está vazia de elétrons. Em temperaturas mais altas, alguns elétrons têm energia térmica suficiente para “saltar” da banda de valência para a banda de condução, onde eles são livres para se mover. A diferença de energia entre o nível inferior da camada de condução e o nível superior da camada de valência é chamada de gap proibido ou “bandgap” (E_g).

Levando em conta um caso mais genérico, há duas situações que podem ocorrer dependendo da localização do átomo dentro da tabela periódica que pode ser observado na Figura 7:

- a) A camada de valência pode estar completamente preenchida com elétrons em $T=0K$, mas a próxima banda de energia se sobrepõe a ela ($E_g < 0$);
- b) A camada de valência pode estar completamente preenchida com elétrons e não há bandas vazias que se sobrepõem a ela ($E_g > 0$).

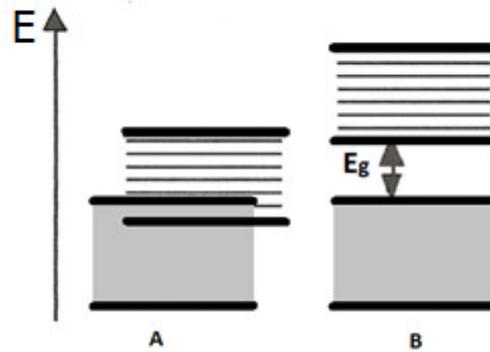


Figura 7 – Banda de valência e condução em um metal (A) e em um semicondutor ou isolante (B). Fonte: [16]

No caso A, os elétrons podem deixar o átomo e se mover através do cristal sem receber nenhuma energia. Os materiais com este tipo de características são os metais. No caso B, os elétrons devem receber uma quantidade de energia para poder saltar ao nível de condução e então se mover através do cristal. Os materiais com este tipo de energia são os semicondutores ou isolantes.

Portanto, a distinção entre um isolante ou semicondutor é quantitativa e é baseada no valor do seu gap de energia. O valor de E_g no silício é de 1,12eV [16].

É conveniente representar as bandas de energia no 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 E_c .

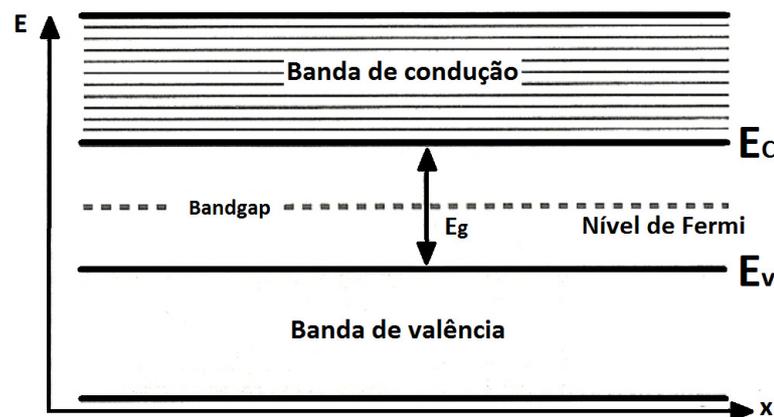


Figura 8 – Nível de condução e valência no espaço real. Fonte: Autor “adaptado de” [17]

O conceito do nível de Fermi, E_F , representa a máxima energia de um elétron a zero Kelvin (0 K). Nesta temperatura, todos os estados permitidos de energia abaixo do nível de

Fermi estão ocupados. De uma maneira análoga, o nível de Fermi pode ser definido como um nível de energia que tem 50% de probabilidade de ser preenchido com elétrons.

O nível de Fermi (Φ_F) pode ser visto nas Figuras 8 e 9 e pode ser calculado através das equações (8) e (9) dependendo do tipo de material (N ou P), que serão explicados posteriormente.

$$\Phi_{F(\text{Semicondutor tipo N})} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \quad (8)$$

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

Onde k é a constante de Boltzman, T é a temperatura em Kelvin, q é a carga elementar do elétron, N_A e N_D é a concentração de dopantes do tipo P e N respectivamente e n_i é a concentração intrínseca de portadores (será definida posteriormente).

Há também outra forma de representar os diagramas de banda de energia em função do vetor de onda ou momentum dos portadores (k), como representado na Figura 9, o que permite a análise de algumas propriedades dos semicondutores. Por exemplo, na Figura 9-A, a mínima energia da banda de condução e a máxima energia da banda de valência ocorrem no mesmo valor de momentum ($k=0$), o que define um semicondutor de banda direta. Neste tipo de semicondutor, um elétron pode “cair” da banda de condução para a banda de valência sem violar a lei da conservação de momento (sem mudar o seu momento) [17]. Este processo tem uma alta probabilidade de ocorrência e a energia perdida pelo elétron, pode ser emitida em forma de fóton com uma energia descrita pela equação (10), sendo h a constante de Planck e v a velocidade do fóton. Na maioria dos semicondutores de banda direta, a energia emitida através dos fótons por um fenômeno de recombinação geralmente corresponde à energia da faixa visível ou infravermelho conforme mostrado na Figura 3. Um evento de recombinação onde fótons são emitidos é chamado de recombinação radioativa, e é explorado em dispositivos como diodos emissores de luz.

No caso da Figura 9-B, a mínima energia da banda de condução e a máxima energia da banda de valência ocorrem em valores de momentos diferentes. Este tipo de semicondutor é chamado de semicondutor de banda indireta, no qual um elétron não pode “cair” da banda de condução para a banda de valência sem mudança de momentum, o que reduz a probabilidade de ocorrência. O silício e o germânio são exemplos deste tipo de semicondutor.

$$E_g = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (10)$$

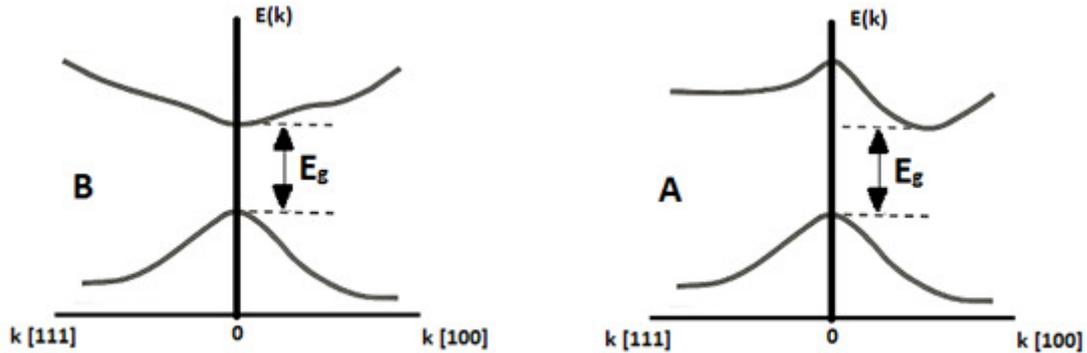


Figura 9 – A) Semicondutor de banda direta, B) Semicondutor de banda indireta. Fonte: Autor “adaptado de” [16].

Outra importante característica dos semicondutores é sua concentração intrínseca de portadores (n_i), a qual já foi mencionada nas equações (8) e (9). De fato, esta concentração representa o produto do número de elétrons (n) e número de lacunas (p) de um semicondutor intrínseco, como mostra a equação (11):

$$pn = n_i^2 \quad (11)$$

O semicondutor é dito intrínseco 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 exatamente igual ao número de lacunas da banda de valência, conforme demonstra a equação (12):

$$p = n = n_i \quad (12)$$

Desta forma, é determinada a energia do nível intrínseco (E_i), a qual é igual à E_F (energia de Fermi descrita nas equações (8) e (9)) em um semicondutor intrínseco e é definida através da equação (13). No silício, $n_i=1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ para temperatura ambiente ($T=300\text{K}$). A dependência de n_i com a temperatura será discutida no capítulo 6 desta dissertação.

$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} \quad (13)$$

O silício utilizado na indústria de semicondutores tem um alto nível de pureza, mais de 99,99% [16]. Porém, podem-se introduzir elementos que estão próximos ao silício na tabela periódica, tais como o boro (que está na coluna III) ou como o arsênio e o fósforo (que estão na coluna V).

A introdução de átomos doadores como o fósforo ou arsênio cria um nível de energia permitido dentro do bandgap (E_d na Figura 10). Este nível está localizado alguns meV (mili elétron-Volt) abaixo da banda de condução e em temperatura ambiente, os elétrons presentes neste nível possuem energia térmica suficiente para “saltar” do nível E_d para o nível de condução, então o átomo da impureza se torna ionizado. O mesmo processo acontece quando um átomo aceitador, como o boro, é introduzido no semicondutor, criando um nível de energia permitido próximo ao topo da banda de valência, o que pode criar um átomo de impureza ionizado quando os elétrons da camada de valência adquirem energia suficiente para “saltar” para o nível permitido, criando lacunas na camada de valência.

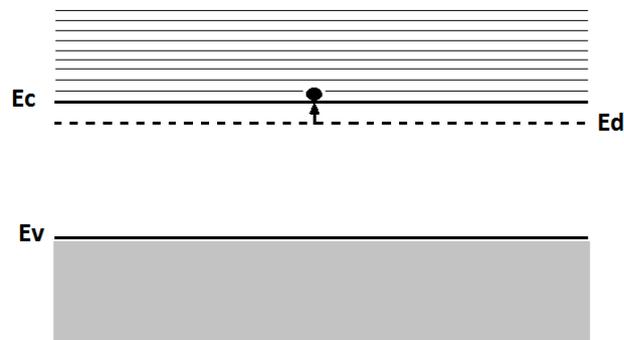


Figura 10 – “Salto” de um elétron do nível de energia permitido para a banda de condução. Fonte: Autor

Impurezas doadoras e aceitadoras são comumente introduzidas ao semicondutor para aumentar a concentração de elétrons ou de lacunas, os quais modificam as propriedades físicas dos semicondutores. Ao conter impurezas doadoras, o semicondutor é dito do tipo N e a concentração destes átomos chamada de N_D . Da mesma forma, ao conter impurezas aceitadoras, o semicondutor é dito do tipo P e a sua concentração chamada de N_A .

A concentração de elétrons (n_N) e lacunas (p_N) num material do tipo N é dada pela equação (14):

$$n_N \cong N_D \text{ e } p_N = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (14)$$

A concentração de elétrons (n_p) e lacunas (p_p) num material do tipo P é dada pela equação (15):

$$p_P \cong N_A \text{ e } n_P = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (15)$$

3.2 Teoria da condução elétrica

Neste item será descrito o movimento das cargas elétricas, bem como as relações entre cargas, campo elétrico e potencial.

3.2.1 Deriva

O cristal de semiconductor contém defeitos intersticiais e espaços vazios devido ao deslocamento de átomos ou átomos faltantes. Além disso, os átomos vibram em torno da sua própria posição de equilíbrio. A amplitude destas vibrações depende da temperatura, desta forma, emerge o conceito de fônon, a qual é uma quase partícula que representa a propagação da vibração ou calor, através do cristal [18]. Tanto as imperfeições do cristal, quanto os fônons podem interagir com os elétrons, isso faz com que haja uma série de colisões que obedecem ao princípio da conservação de energia e momento [19].

Como consequência, os elétrons nunca estão “parados”, e a sua trajetória é regida por uma série de vetores de velocidades [16]. Com a ausência de uma força externa, todos estes movimentos são em média neutros e o deslocamento da carga é nulo (Figura 11-A). Porém ao aplicar-se um campo elétrico, surge uma corrente de deriva na direção oposta, como mostra a Figura 11-B.

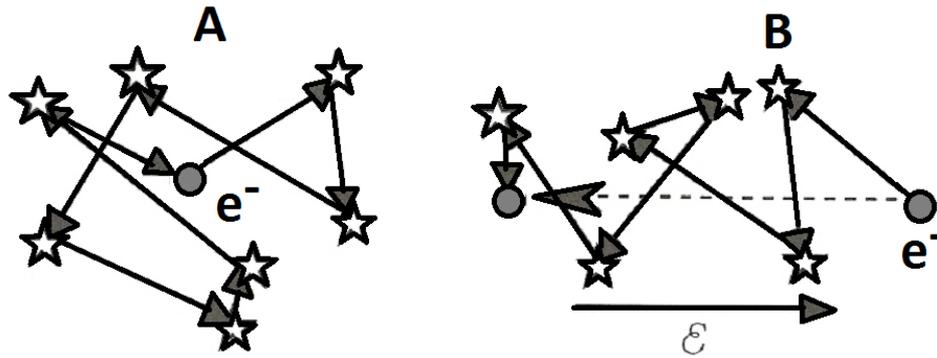


Figura 11 – Movimento dos elétrons. A) Na ausência de campo elétrico. B) Na presença de campo elétrico. (As estrelas representam colisões). Fonte: [16]

A média de tempo entre duas colisões de elétrons é chamada de tempo de relaxação (τ_N). Este tempo é da ordem de dezenas de pico segundos em temperatura ambiente, durante o qual um elétron pode se movimentar na ordem de 10 nanômetros [16].

Adicionalmente, a velocidade de deriva dos elétrons (v_{dN}) resultante da aplicação de um campo elétrico é dada pela equação (16):

$$v_{dN} = -\frac{q \tau_N}{m_e^*} E \equiv -\mu_N E \quad (16)$$

Onde m_e^* é a efetiva massa do elétron, q é a sua carga elementar e E é o campo elétrico.

A mobilidade dos elétrons na banda de condução é μ_N , e a sua unidade é cm^2/Vs , e é dada pela equação (17):

$$\mu_N = \frac{q \tau_N}{m_e^*} \quad (17)$$

Portanto, a mobilidade é proporcional ao tempo de relaxação e inversamente proporcional à sua massa efetiva. No entanto, o tempo de relaxação (média de tempo entre duas colisões de elétrons) é inversamente proporcional à temperatura, já que as vibrações térmicas da rede ou fônons aumentam com o aumento da temperatura. Sendo assim, a mobilidade é inversamente proporcional à temperatura. Similarmente, as impurezas e os defeitos da rede causam espalhamento (colisões) entre os elétrons, e, portanto, a mobilidade cai com o aumento das impurezas ou concentração de defeitos.

Para lacunas na camada de valência tem-se que a mobilidade é dada pela equação (18).

$$\mu_P = \frac{q \tau_P}{m_h^*} \quad (18)$$

Se a concentração de elétrons na banda de condução é igual a n , a densidade de corrente de deriva de elétrons é dada pela equação (19):

$$J_N = q \mu_N n E \quad (19)$$

De maneira análoga, a densidade de corrente de deriva de lacunas é dada pela equação (20):

$$J_P = q \mu_P p E \quad (20)$$

A condutividade, σ ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), e a resistividade, ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$) de um semiconductor homogeneamente dopado são dados pelas equações (21) e (22):

$$\sigma = q(n \mu_N + p \mu_P) \quad (21)$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (22)$$

Na Figura 12, pode-se observar que a resistividade de um semiconductor pode variar várias ordens de magnitude simplesmente alterando a concentração de dopantes.

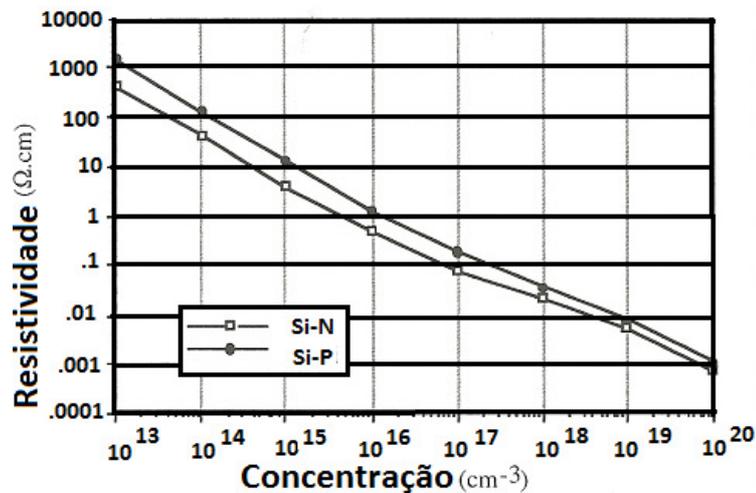


Figura 12 – Resistividade do silício a T=300K em função da concentração de impurezas dopantes. Fonte: [16]

3.2.2 Difusão

Nos semicondutores a corrente pode ser produzida por diferença de concentração de portadores. A corrente, neste caso, é chamada de corrente de difusão. Os elétrons irão se difundir da região com maior concentração para a de menor concentração. O fluxo de elétrons, F_N , resultante do processo de difusão é diretamente proporcional ao gradiente da concentração de elétrons, dn/dx . Este fluxo, ao ser multiplicado por $-q$, é igual à densidade de corrente de difusão (J_N) dado pela equação (23):

$$J_{N(dif)} = qD_N \frac{dn}{dx} \quad (23)$$

Analogamente, a densidade de corrente de lacunas é dada pela equação (24):

$$J_{P(dif)} = -qD_P \frac{dp}{dx} \quad (24)$$

D_P e D_N são constantes chamadas de coeficientes de difusão para elétrons e lacunas respectivamente. Essa constante representa a facilidade de fluidez com a qual os portadores podem se mover e se difundir em um material semiconductor.

Portanto, a densidade total de corrente fluindo através de um semiconductor será a soma da corrente de deriva com a de difusão [14] de acordo com a equação (25).

$$J = J_N + J_P = q \mu_N n E + qD_N \frac{dn}{dx} + q \mu_P p E - qD_P \frac{dp}{dx} \quad (25)$$

3.2.3 Relação de Einstein

A mobilidade e o coeficiente de difusão estão relacionados um ao outro, conforme mostram as equações (26) e (27):

$$D_N = \frac{k T}{q} \mu_N \quad (26)$$

$$D_P = \frac{k T}{q} \mu_P \quad (27)$$

Estas relações mostram que os coeficientes de difusão e a mobilidade representam a mesma coisa, exceto por um fator multiplicador, kT/q , que é chamado de tensão térmica (U_T) e vale 25,9 mV em temperatura ambiente.

3.3 Fenômenos de geração e recombinação

Conforme já foi mencionado nos capítulos anteriores, há elétrons na banda de condução e lacunas na banda de valência de um semicondutor acima de zero Kelvin. Um elétron da banda de condução está livre para se mover no cristal e também pode “saltar” para um “lugar vazio” (lacuna) que fica dentro da banda de valência. Através deste processo, o elétron libera energia, e tal fenômeno é chamado de evento de recombinação.

Analogamente, se houver energia suficiente disponível, um elétron pode “saltar” da banda de valência para a banda de condução, criando uma lacuna e um elétron livre e este processo é chamado de evento de geração.

No equilíbrio termodinâmico, os eventos de geração e recombinação são balanceados, tal que a concentração de elétrons e lacunas ao longo do tempo mantém-se constante. No entanto, um estado de não equilíbrio pode ser atingido ao usar uma fonte de energia externa, tal como uma fonte de luz.

3.3.1 Transições indiretas e diretas

Conforme já foi mencionado no item 3.1, há semicondutores de banda direta e banda 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 momento do portador (k). Isso faz com que o fenômeno de recombinação banda para banda, através do qual, um elétron “salta” da banda de condução para a banda de valência se torne muito improvável, fazendo com que este semicondutor não emita luz. Os fenômenos de recombinação, portanto, ocorrem através de níveis energéticos dentro do bandgap, chamados de centros de recombinação, os quais são introduzidos no semicondutor por átomos de impurezas ou defeitos no cristal, conforme mostra a Figura 13.

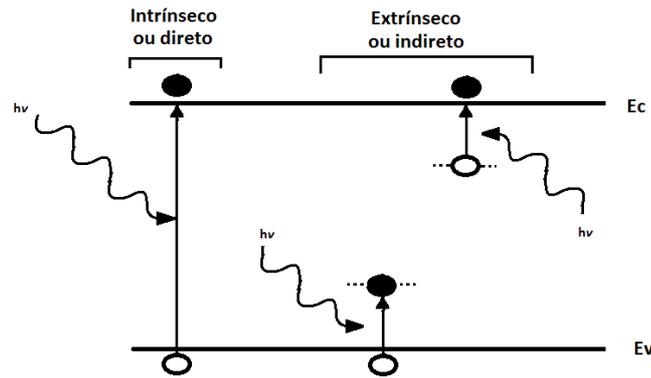


Figura 13 – Processo de fotoexcitação direta e indireto. Fonte: Autor

Um dos principais responsáveis pelo fenômeno de geração extrínseca nos semicondutores é a incidência de radiação luminosa, e sua absorção é determinada pelo coeficiente de absorção (α), definido na equação 5. O silício é transparente a fótons com energia $h\nu$ menor que o seu bandgap, por isso, o maior comprimento de onda (λ_c) que pode ser absorvido pelo silício é definido pelo seu bandgap através da equação (28), pois o coeficiente de absorção é muito baixo para comprimentos de onda maiores que λ_c (conforme mostra a Figura 14). No silício, λ_c é de aproximadamente $1,1\mu\text{m}$ [17].

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (28)$$

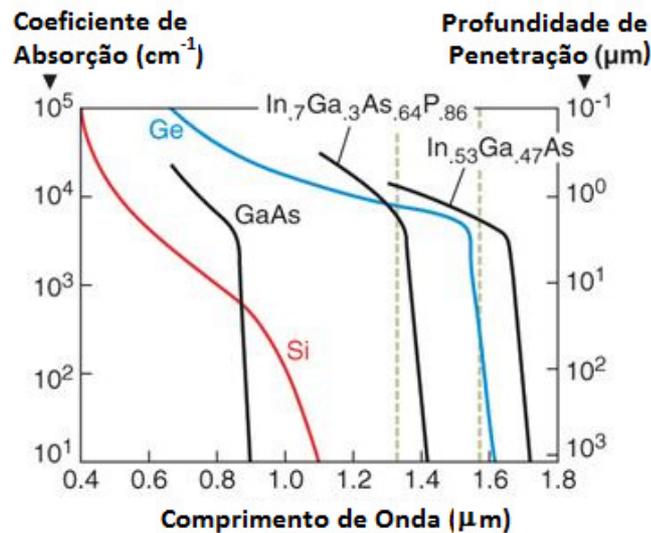


Figura 14 – Coeficiente de absorção para o germânio, silício e GaAs. Fonte: [17]

O inverso do coeficiente de absorção é a profundidade de penetração (L_{abs}), o qual é demonstrado na Figura 15 utilizando o modelo apresentado em [20] [21] e define a medida da distancia que a luz pode “viajar” dentro de um material antes de ser absorvida.

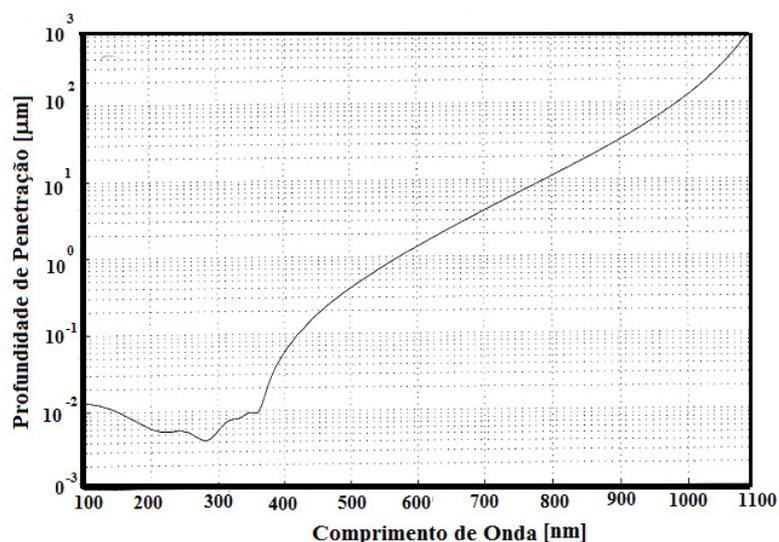


Figura 15 – Profundidade de Penetração do Silício em função do comprimento de onda. Fonte: [15]

Desta forma, 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, e, portanto, a radiação é absorvida muito próxima à superfície, onde o tempo de recombinação é muito curto e os fotoportadores se recombinam antes de serem coletados. (a recombinação de superfície será explicada posteriormente).

3.3.2 Tipos de geração e recombinação

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

- num evento de recombinação radioativa de banda para banda, a energia é liberada em forma de fótons;
- num evento de recombinação Auger, a energia é transferida para outro elétron ou lacuna, o qual é excitado para um nível de maior energia;
- num evento de recombinação SRH, o qual envolve níveis de energia dentro da bandgap, a energia é transferida para o cristal na forma de calor (fônons).

A recombinação de portadores não acontece somente no substrato de um cristal, mas também na sua superfície, onde a periodicidade das ligações é interrompida, e onde o contato com outros materiais é feito (ar, SiO₂, metal, etc). A taxa de recombinação de superfície é chamada de S_N e S_P .

3.3.3 Recombinação SRH

Na Figura 16, as transições A e C correspondem a eventos de recombinação e as transições B e D correspondem a eventos de geração. Estas transições são muito mais prováveis de acontecer, pois envolvem trocas de energia menor 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. Entretanto, a taxa de geração-recombinação intrínseca (não gerada por eventos externos), é chamada de U_N e U_P para elétrons e lacunas respectivamente.

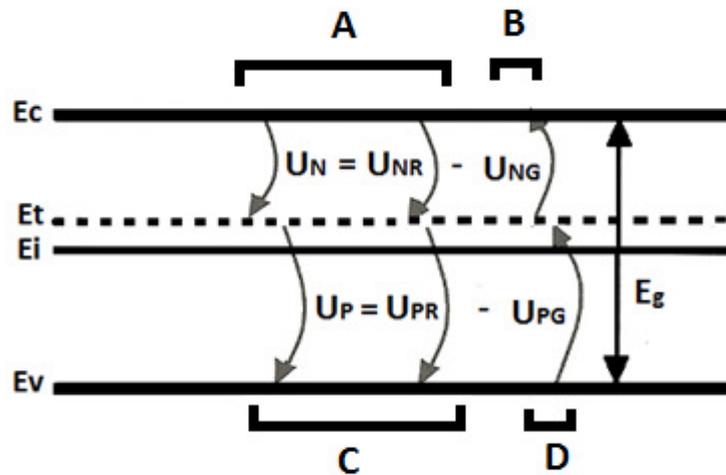


Figura 16 – Recombinação através dos centros de recombinação. Fonte: Autor “adaptado de” [17]

A taxa de geração e de recombinação intrínseca total (U) é igual à diferença entre a taxa de recombinação e a taxa de geração térmica, ou seja, $U = U_{NR} - U_{NG}$, a qual é igual à zero em equilíbrio termodinâmico e que pode ser calculada através da equação (29).

$$U = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p \left(n + n_i \cdot \exp \left[\frac{E_d - E_i}{kT} \right] \right) + \tau_n \left(p + n_i \cdot \exp \left[\frac{E_i - E_d}{kT} \right] \right)} \quad (29)$$

Onde τ_p e τ_n é o tempo de vida das lacunas e dos elétrons em estado-estacionário, respectivamente e E_d é a energia dos estados permitidos dentro do bandgap (ou centros de recombinação).

Pode-se verificar que a taxa de geração e recombinação intrínseca é diretamente proporcional a $pn - n_i^2$, portanto U é definido pela relação (30).

$$\begin{cases} U = 0 \text{ se } pn = n_i^2 \text{ (equilíbrio)} \\ U > 0 \text{ se } pn > n_i^2 \text{ (recombinação)} \\ U < 0 \text{ se } pn < n_i^2 \text{ (geração)} \end{cases} \quad (30)$$

Alguns dispositivos semicondutores operam no regime de injeção de portadores minoritários, tal como os fotodiodos PIN, portanto, o tempo de vida dos portadores minoritários é muito importante para a eficiência destes dispositivos. Na maioria dos casos, a ordem de magnitude da concentração dos portadores minoritários é muito menor que a dos portadores majoritários. Portanto, a taxa de recombinação intrínseca é definida pelo tempo de vida dos portadores minoritários e é dada pelas equações (31) e (32).

$$U = \frac{n - n_0}{\tau_n} \text{ em um semicondutor tipo P} \quad (31)$$

$$U = \frac{p - p_0}{\tau_p} \text{ em um semicondutor tipo N} \quad (32)$$

Onde n_0 e p_0 é a concentração de elétrons e lacunas em equilíbrio.

3.4 Junção PN

Uma junção PN é formada quando um semicondutor do tipo N é colocado em contato com um semicondutor do tipo P e o seu símbolo está representado na Figura 17.

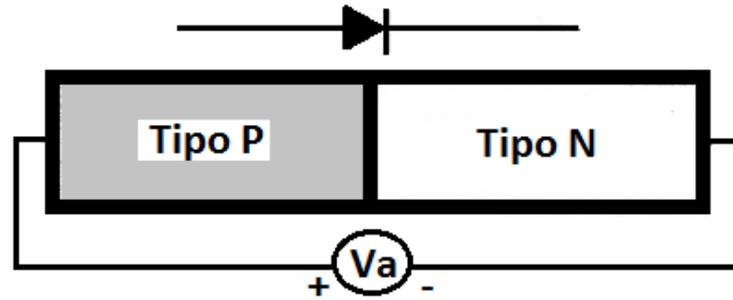


Figura 17 – Junção PN e a sua simbologia. Fonte: Autor

3.4.1 Junção PN não polarizada

Na Figura 18 estão demonstrados os diagramas de banda de dois pedaços de semicondutores diferentes, um do tipo N e outro do tipo P e por simplicidade, a concentração de dopantes em ambos é considerada constante, sendo N_D (cm^{-3}) a concentração do lado N, e N_A (cm^{-3}), a concentração do lado P.

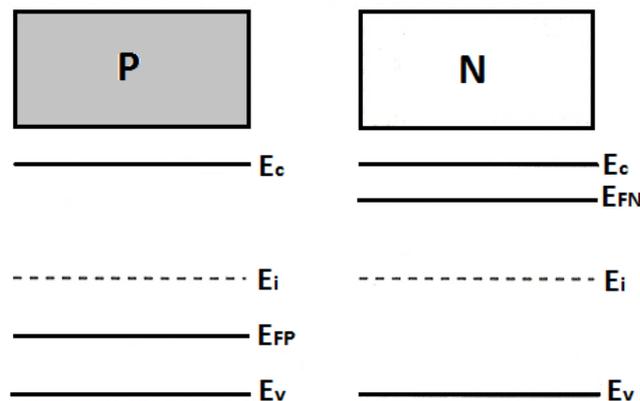


Figura 18 – Diagrama de banda de energia em regiões do tipo N e P separadamente. Fonte: [16]

Ao conectar dois pedaços de material N e P, forma-se uma junção metalúrgica, e em equilíbrio termodinâmico, um potencial de junção (V_{BI}) é formado, devido ao deslocamento das cargas, já que acontece uma difusão de elétrons da região N para a P e uma difusão de lacunas da região P para a N.

O potencial de junção é dado pela equação (33) [22] e pode visto na Figura 19.

$$V_{BI} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (33)$$

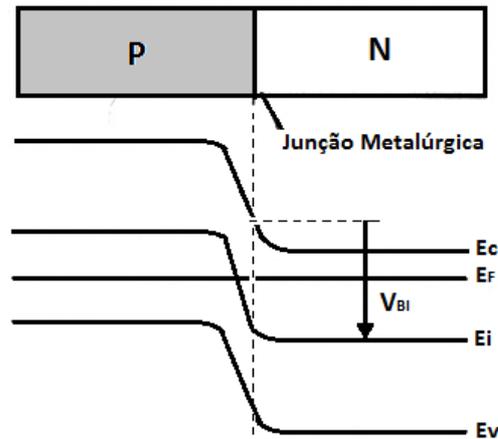


Figura 19 – Diagrama de bandas da junção PN. Fonte: [17]

Quando os elétrons se difundem do lado N para o lado P “deixam para trás” íons positivos, que não podem se mover ao longo do cristal. O mesmo acontece quando lacunas se difundem do lado P para o lado N, deixando íons negativos. (Figura 20). A região onde estes íons estão localizados constitui uma região de carga espacial chamada região de depleção (RDD). Os íons localizados nesta região dão origem a um campo elétrico (ζ , com sentido do lado N para o lado P) e conseqüentemente, ao aparecimento de uma diferença de potencial.

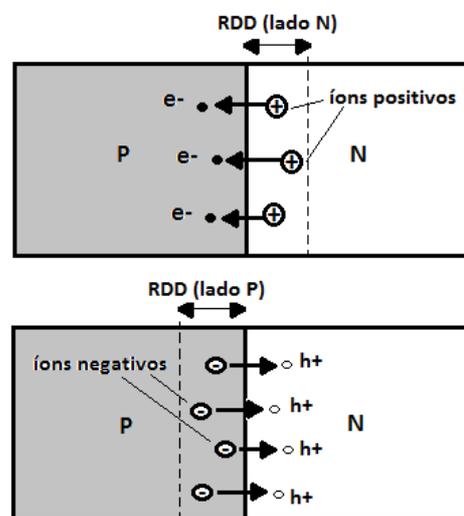


Figura 20 – Criação da região de depleção por difusão de lacunas e elétrons. Fonte: [16]

A diferença de potencial entre os dois lados da RDD dá origem a uma corrente de deriva, em que as lacunas da região tipo N (minoritárias) se deslocam para a região P e os elétrons da região P se deslocam para a região N. Ambos os casos favorecidos pelo campo elétrico.

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 possuem sentidos opostos.

O perfil de cargas, do campo elétrico e do potencial após o equilíbrio térmico pode ser visto na Figura 21.

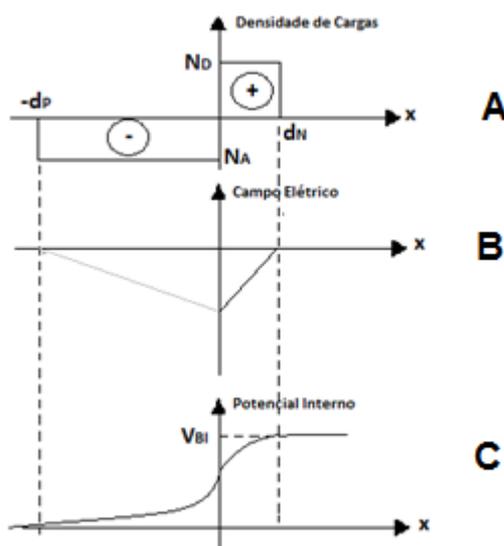


Figura 21 – Modelo Físico de uma junção PN com N_A diferente de N_D : A) Densidade de cargas. B) Campo elétrico. C) Potencial elétrico. Fonte: Autor “adaptado de” [17]

3.4.2 Junção PN polarizada

A largura da RDD é modificada com a aplicação de 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 o diodo está polarizado diretamente. 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 o diodo está polarizado reversamente.

As larguras da região de depleção do lado N (dn) e do lado P (dp) são dadas pelas equações (34) e (35).

$$dn = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si}(V_{BI} - V_D)N_A}{qN_D(N_A + N_D)}} \text{ largura da RDD do lado N} \quad (34)$$

$$dp = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si}(V_{BI} - V_D)N_D}{qN_A(N_A + N_D)}} \text{ largura da RDD do lado P} \quad (35)$$

A densidade de corrente numa junção PN ideal é dada pela equação (36).

$$J = J_S \left[\exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) - 1 \right] \quad (36)$$

Onde J_S é a densidade de corrente de saturação ou densidade de corrente reversa, pois a magnitude da corrente fluindo através de uma junção PN reversamente polarizada é igual à J_S , o qual é independente da tensão reversa aplicada e do campo elétrico, mas depende das concentrações de dopantes, do coeficiente de difusão e do tempo de vida das cargas minoritárias, como pode ser observado na equação (37):

$$J_S = \frac{q D_N n_{PO}}{L_N} + \frac{q D_P p_{NO}}{L_P} = qn_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_P}{\tau_P}} \right) \quad (37)$$

Onde: D_N , D_P são os coeficientes de difusão de elétrons e lacunas respectivamente,

L_N e L_P são os comprimentos de difusão dos portadores minoritários (elétrons e lacunas), cujo sentido físico é o quanto os portadores minoritários podem se difundir na região P ou N antes de se recombinar. E são definidos através do tempo de vida (τ_N e τ_P) e do coeficiente de difusão (D_N e D_P), conforme mostra a equação (38).

E n_{PO} é definido como a concentração de elétrons no equilíbrio dentro da região P, já p_{NO} é definido como a concentração de lacunas no equilíbrio dentro da região N.

$$L_P = \sqrt{D_P \tau_P} \quad e \quad L_N = \sqrt{D_N \tau_N} \quad (38)$$

Finalmente, a corrente de um diodo ideal pode ser obtida multiplicando-se a densidade de corrente pela área da seção transversal (A).

3.4.3 Corrente de geração e recombinação (diodo não ideal)

Até este ponto, foi considerado um diodo ideal, negligenciando os mecanismos de geração e recombinação que acontecem dentro da RDD. Porém, nos diodos reais, estes mecanismos têm que ser levados em consideração. Os mecanismos de geração e recombinação aqui considerados são os SRH, já definidos no item 3.3.3 e que acontecem basicamente porque, ao aplicar-se uma tensão externa V_D , o valor do produto pn não é mais igual a n_i^2 (seu valor de equilíbrio). Portanto, a corrente será dada pela equação (39):

$$J = J_S \left[\exp\left(\frac{q V_D}{kT}\right) - 1 \right] + J_{rg} \quad (39)$$

Onde:

$$J_{rg} = \frac{q n_i}{2 \tau_0} \sqrt{\frac{2 \epsilon_{si} (V_{BI} - V_D)}{q}} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \left[\exp\left(\frac{q V_D}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (40)$$

Considerando $\tau_0 = \tau_p = \tau_n$ (tempo de vida dos elétrons e das lacunas são iguais)

A corrente de geração/recombinação é maior que a corrente de difusão quando o diodo está polarizado diretamente com baixas tensões ou quando o diodo está polarizado reversamente, conforme pode ser visto na Figura 22. No caso da polarização reversa, a corrente de geração é dominante já que $pn < n_i^2$. Entretanto, quando o diodo está polarizado diretamente com altas tensões de polarização, a corrente de difusão se sobrepõe a corrente de recombinação.

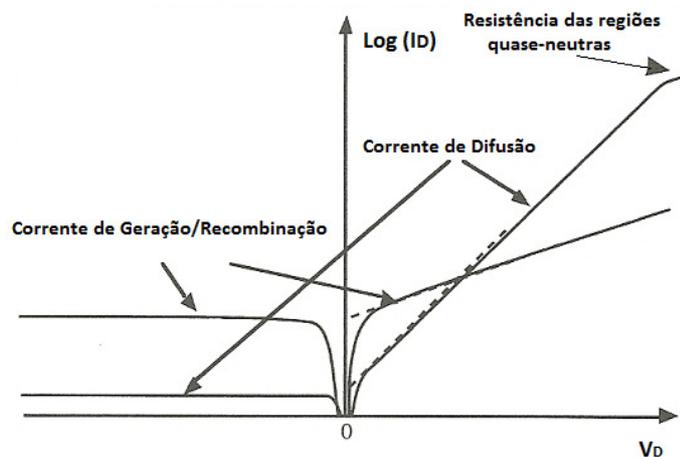


Figura 22 – Correntes de difusão, geração e recombinação em uma junção real. Fonte: [17]

Outra característica de um diodo real, é que a resistência das regiões P e N não podem ser desprezadas em alta polarização direta, o que causa uma redução da corrente (este fato pode ser observado na Figura 22).

A corrente de um diodo também é variável com a temperatura, porém os efeitos da temperatura serão considerados no capítulo 6.

3.5 Fotodiodo PIN

Pode-se verificar a estrutura de um diodo PIN na Figura 23. Este dispositivo consiste em uma junção PN com uma região intrínseca no meio de comprimento L_i . Na prática, esta região intrínseca pode ser tanto N quanto P com baixa concentração de portadores.

Esta região com baixa concentração pode estar totalmente depletada ou não, dependendo do valor da tensão aplicada ao dispositivo e da sua dopagem.

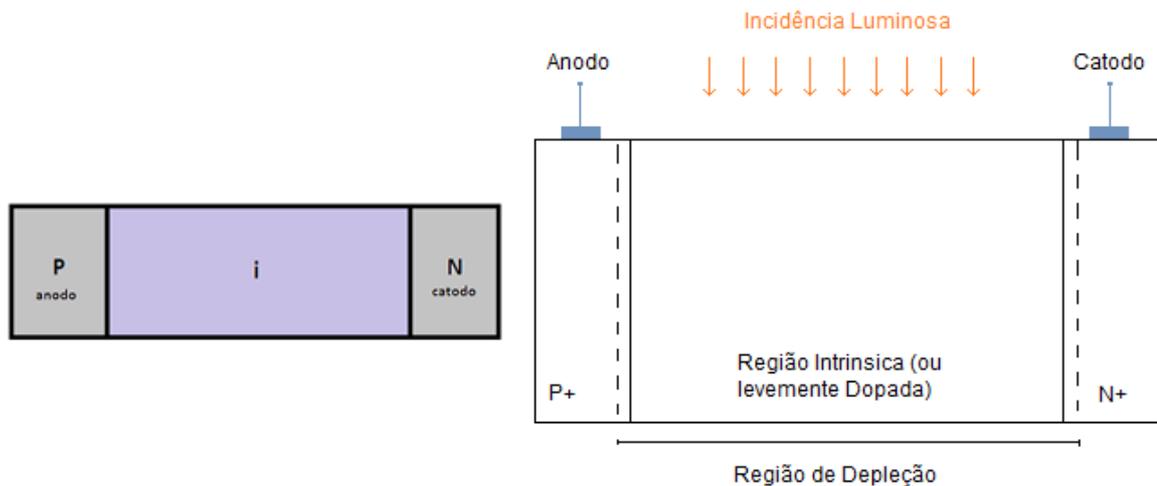


Figura 23 – Vista frontal e lateral de um fotodiodo PIN. Fonte: Autor

A absorção da luz produz pares elétron-lacuna. Os pares produzidos dentro da RDD ou a até no máximo um comprimento de difusão dela podem ser separados pela ação do campo elétrico, fazendo com que corrente flua pelo dispositivo, através da deriva dos portadores pela RDD.

Conforme já foi visto no item 3.3.1, a profundidade de penetração de luz no semiconductor varia de acordo com o seu comprimento de onda [17] [23], ou seja, quanto menor o comprimento de onda, menor a profundidade da penetração. Por isso, em fotodiodos

PIN, os portadores gerados pela radiação luminosa podem contribuir de forma mais eficiente para a fotocorrente, já que a região de depleção, nestes dispositivos, é formada desde a superfície, ao contrário dos dispositivos verticais que serão demonstrados no item 5.

Além disso, a taxa de recombinação dentro da RDD é muito menor que nas regiões P e N [17], por isso, quanto maior o tamanho da camada de depleção, menor será a perda por recombinação e, portanto, maior será a quantidade de absorção da luz. Esta é a razão pela qual os fotodiodos PIN geralmente operam em polarização reversa, aumentando assim o tamanho da sua RDD.

No entanto, os pares elétrons-lacunas gerados devem ser rapidamente separados pela ação do campo elétrico a fim de evitar a recombinação. Mas, para se ter um campo elétrico interno elevado, é necessária uma camada de depleção pequena [22]. Desta forma, há um conflito na determinação do tamanho da RDD, uma vez que ela deve ser grande o suficiente para permitir que o maior número possível de fótons seja absorvido, e suficientemente pequeno para reduzir o tempo de trânsito dos portadores fotogerados [24].

Outra importante característica dos diodos PIN é a sua corrente de escuro (I_{DARK}), que é a corrente de fuga quando o dispositivo está reversamente polarizado, mas não está exposto à luz. A corrente de escuro é devida à geração térmica de pares elétron-lacuna dentro da região de depleção, pois acima de $T=0K$, os elétrons podem adquirir energia suficiente para “saltar” para a banda de condução devido às vibrações da rede cristalina (conforme já comentado no item 3.2.1). Esta geração é observada tanto no volume do semicondutor, quanto na sua superfície e a contribuição das regiões fora da RDD é de fato várias ordens de magnitude menor [15]. A corrente de escuro é proporcional à área de junção e para uma área fixa, ela varia com a profundidade do diodo (W) e com a espessura da camada de silício (t_{si}).

Portanto a corrente total (I_T) que flui através do dispositivo é a soma da corrente de escuro com a corrente gerada pela incidência de luz (corrente fotogerada: I_{FG}) e é dada pela equação (41).

$$I_T = I_{FG} + I_{DARK} \quad (41)$$

4 DESEMPENHO DOS FOTODETECTORES

O objetivo de um fotodetector é converter um sinal óptico em um sinal elétrico. Idealmente ele teria que detectar todos os fótons incidentes, independentemente do seu comprimento de onda, ou frequência e transformá-los em sinal elétrico sem introduzir nenhum tipo de ruído. Infelizmente, os fotodetectores reais, tais como o diodo PIN, não são capazes de efetuar esta conversão sem nenhum tipo de perda, por isso, a seguir, serão apresentadas as principais formas de medir o seu desempenho.

4.1 Eficiência quântica

A eficiência quântica total (EQ_T) é definida como sendo a razão entre a corrente de anodo realmente fotogerada (I_{FG}) e a máxima corrente que poderia ter sido gerada se todos os fótons tivessem sido convertidos em fotoportadores [17]. Desta forma, EQ_T é dada pela equação (42).

$$EQ_T = \frac{I_{FG}}{I_{FG(\max)}} \quad (42)$$

Idealmente a eficiência quântica total seria 100% se cada fóton gerasse um par elétron-lacuna, porém a eficiência real 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 semiconductor, já que este está coberto com metal. O próprio óxido ou silício podem refletir parte da radiação luminosa incidente. Este efeito pode ser minimizado com a utilização de coberturas anti-reflexivas [25]. Neste ponto, pode-se definir então, a eficiência quântica externa (EQ_E) que corresponde apenas à eficiência da área fotossensível (A_{FS}) do dispositivo. Em [26] define-se a equação (43):

$$EQ_T = \frac{A_{FS}}{A_T} EQ_E \quad (43)$$

- b) Pelas reflexões: Em qualquer estrutura com incidência de luz, há perdas por reflexão e transmissão, conforme foi visto no item 2.4. Nem toda a potência luminosa incidente

(P_{IN}) é absorvida pelo dispositivo (P_A). Esta relação entre P_A e P_{IN} é dependente do comprimento de onda e da profundidade do semiconductor e é chamada de máxima eficiência alcançável, η , dada pela equação (44).

$$\eta = \frac{P_A}{P_{IN}} \quad (44)$$

- c) Pela recombinação: Nem todos os portadores que foram gerados pelos fótons incidentes serão coletados pelos terminais do fotodiodo, pois alguns deles se recombinarão, principalmente fora da região de depleção. Os portadores gerados fora da RDD devem primeiramente se difundir para dentro da RDD, porém a difusão é um fenômeno lento, que aumenta a recombinação. Pode-se definir, portanto, a eficiência quântica interna (EQ_I) do dispositivo, a qual leva em consideração apenas as perdas por recombinação e é dada por [26] através da equação (45).

$$EQ_I = \frac{I_{FG}}{I_{DISP}} \quad (45)$$

Onde 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.

Portanto, pode-se chegar à expressão da eficiência EQ_T levando em consideração os três mecanismos de perda citados acima através da equação (46).

$$EQ_T = \frac{P_A}{P_{IN}} \frac{A_{FS}}{A_T} EQ_I \quad (46)$$

4.2 Responsividade

Uma importante figura de mérito para avaliar o desempenho dos fotodetectores é a sua responsividade (R), definida como sendo a relação da corrente fotogerada (I_{FG}) e a potência óptica incidente (P_{IN}) [16], dada pela equação (47).

$$R = \frac{I_{FG}}{P_{IN}} \quad em \ A/W \quad (47)$$

De acordo com a equação (41), a corrente total do dispositivo é a soma da corrente fotogerada e da corrente de escuro, por isso, chega-se à equação (48).

$$R = \frac{I_T - I_{DARK}}{P_{IN}} \quad (48)$$

4.3 Relação sinal-ruído

A corrente de escuro presente em um fotodetector, já exposta no item 3.5, 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 (49).

$$SNR = \frac{I_{FG}}{I_{DARK}} = \frac{I_T - I_{DARK}}{I_{DARK}} \quad (49)$$

Esta relação pode também ser expressa em decibéis (dB)

A relação sinal ruído é altamente influenciada pela temperatura, como será visto ao longo desta dissertação.

4.4 Sensibilidade

A sensibilidade é definida pela mínima potência do sinal incidente que é detectável [15] e depende da corrente de escuro, da responsividade e do ruído total do sensor (incluindo o ruído do circuito de leitura). Esta medida é importante, pois mesmo que o dispositivo tenha uma responsividade alta, pode ser que ele não seja sensível a uma determinada potência de sinal muito baixa, ou seja, a sua corrente fotogerada e a sua corrente de escuro não seriam distinguíveis uma da outra.

4.5 Velocidade de resposta

A velocidade de resposta de um fotodetector é limitada pela combinação de três fatores: a difusão dos portadores, o tempo de deriva dentro da RDD e a sua capacitância.

Os portadores gerados fora da região de depleção devem difundir-se para a RDD, resultando num considerável tempo de atraso (pois o mecanismo de difusão é lento) [15].

Se a região intrínseca estiver totalmente depletada, os portadores gerados ali serão coletados através do seu mecanismo de deriva, o qual é muito mais rápido. Porém, caso a região intrínseca não esteja totalmente depletada, haverá também difusão.

Portanto, a RDD não deve ser muito grande para que não haja atrasos relativos ao tempo de trânsito dos portadores dentro dela. Por isso, a determinação do tamanho da RDD e consequentemente do tamanho da região intrínseca (L_i) é um dos fatores mais importantes para a velocidade de resposta do fotodetector PIN.

A largura de banda é um parâmetro importante dos fotodetectores, principalmente em aplicações de comunicação de dados e corresponde à faixa de frequência na qual o fotodetector tem uma resposta em frequência aproximadamente plana (com variação inferior a 3 dB), conforme mostra a Figura 24.

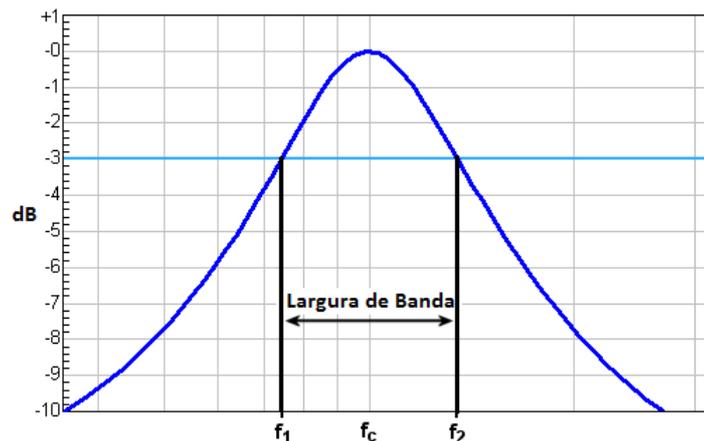


Figura 24 – Largura de Banda. Fonte: [27]

Onde a largura de banda (B) é dada pela equação (50):

$$B = f_2 - f_1 \quad (50)$$

A largura de banda também define o limite de transferência de dados, usualmente descrito em bits/segundos ou b/s.

5 FOTODETECTORES EM SILÍCIO

A topologia dos fotodetectores é dividida em dois grandes grupos, definidos de acordo com a sua aplicação e com o comprimento de onda que utilizam.

Os fotodetectores utilizados em sistemas de imagem necessitam ter uma alta eficiência quântica em todos os comprimentos de onda do espectro visível, bem como uma alta responsividade e baixa corrente de escuro.

Os fotodetectores utilizados em sistema de comunicação óptica necessitam de uma alta largura de banda e grande sensibilidade.

Neste capítulo serão mostradas algumas topologias de fotodetectores utilizadas em sistemas de imagem e também na comunicação óptica.

5.1 Tecnologia CMOS convencional (BULK)

De acordo com o que já foi visto nos capítulos anteriores, a profundidade de penetração da radiação luminosa depende do seu comprimento de onda. Como pode ser visto na Figura 15, para $\lambda=400\text{nm}$, a radiação será absorvida na profundidade de aproximadamente 80nm da camada de silício, já para $\lambda=1000\text{nm}$, a profundidade de absorção será de 100 μm . Tendo em vista esta larga diferença na profundidade de penetração, os fotodetectores utilizados em sistemas de imagem como, por exemplo, em câmeras fotográficas, têm que ser capazes de absorver radiação luminosa em toda a faixa do espectro visível, por isso, uma camada espessa de silício é necessária [15].

Porém, ao mesmo tempo em que a camada de silício espessa aumenta a sua eficiência quântica, também prejudica a sua velocidade de resposta, pois os portadores gerados no substrato terão que difundir até a camada de depleção para então contribuírem com a fotocorrente, por isso, os fotodetectores que utilizam a tecnologia CMOS convencional tem largura de banda geralmente abaixo de 100MHz [15] e, portanto, são inapropriados para utilizações que necessitem de alta velocidade de resposta.

Para aplicações em sistemas médicos ou de meio-ambiente, ou mesmo para aplicações de armazenamento de dados ópticos como o DVD; se faz necessária a fotodeteccção de comprimentos de onda na faixa do ultravioleta (UV) em torno de 390nm. Desta forma, a absorção da radiação é extremamente superficial, o que faz com que o restante do substrato do dispositivo só forneça ruído (em forma de corrente de escuro).

Nos itens a seguir, serão apresentados alguns fotodiodos que utilizam tecnologia CMOS convencional e que originaram o dispositivo estudado neste trabalho.

5.1.1 Fotodiodos convencionais (verticais)

A Figura 25 mostra três tipos de fotodiodos convencionais que utilizam o processo CMOS padrão, conhecidos como: P^+/N_{well} , N^+/P_{SUB} e N_{well}/P_{SUB} [28]. Pode-se verificar que a região de depleção formada entre as junções fica em sua grande parte distante da superfície, o que faz com que a absorção de radiação luminosa de comprimentos de ondas curtos seja bastante prejudicada. Além disso, a espessura da camada de depleção se torna de difícil controle, já que a concentração de dopantes é um parâmetro que depende da tecnologia utilizada.

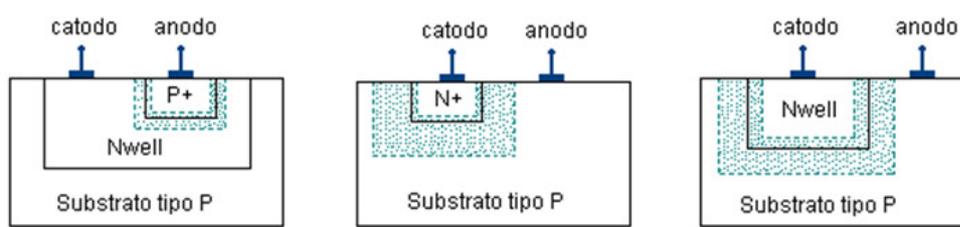


Figura 25 – Tipos básicos de fotodiodos em tecnologia CMOS: P^+/N_{well} , N^+/P_{SUB} e N_{well}/P_{SUB} . Fonte: Autor

5.1.2 Fotodiodos tipo PIN vertical

Com poucas modificações no processo de fabricação, foram desenvolvidos os fotodiodos PIN verticais, como pode ser observado na Figura 26, onde o fotodiodo é formado entre a camada N^+ , a camada epitaxial P^- e o substrato P^+ . Com a concentração de dopantes usual da camada epitaxial de 10^{15}cm^{-3} , a pequena tensão reversa disponível nos circuitos integrados resultará em uma RDD de apenas $2 \mu\text{m}$, a qual, não é suficiente para evitar o mecanismo de difusão de portadores para altos comprimentos de onda, visto que apenas uma parte da camada epitaxial é depletada (espessura típica de $7 \mu\text{m}$) [29].

Em sistemas de transmissão de dados de curta distância, a janela óptica utilizada é a de comprimento de onda de 850nm , ou seja, a radiação luminosa emitida pelo transmissor que carrega a informação é a de 850nm [1], portanto, a espessura da camada epitaxial deveria ser maior para aumentar a sensibilidade [15]. Em [29] relata-se a proposta de utilização de uma camada epitaxial de $15 \mu\text{m}$ com baixa dopagem (em torno de $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$). Estes parâmetros são necessários para depletar completamente a camada epitaxial e permitir uma diminuição do

tempo de subida para 0,55ns, quando comparado ao tempo de subida de 7,24ns (com concentração de 10^{15}cm^{-3}). Portanto, uma largura de banda de 1GHz poderia ser atingida com 40% de eficiência quântica total.

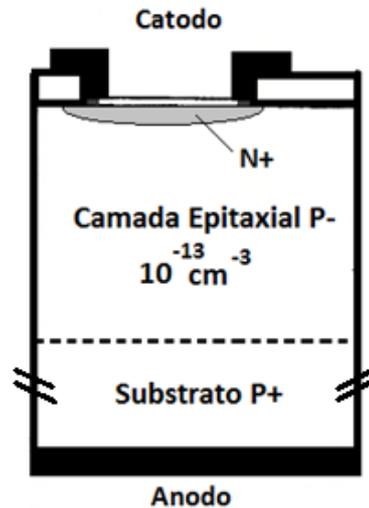


Figura 26 – Fotodiodo tipo PIN Vertical. Fonte: [29]

5.1.3 Fotodiodo PIN lateral circular

Em [30] relata-se a fabricação juntamente com transistores NMOS, de um fotodiodo PIN Circular, na tecnologia de $1\mu\text{m}$, utilizando a dopagem inicial da lâmina na camada P⁻ de $6 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$ (Figura 27). O comprimento da região intrínseca era de $1\mu\text{m}$ e como este dispositivo apresentava uma camada de depleção muito próxima à superfície, a eficiência quântica deste dispositivo era de 67% sem nenhuma cobertura anti-reflexiva e a sua largura de banda era de 1,3GHz.

A principal desvantagem destes dispositivos é que, reduzindo a concentração de dopantes da camada epitaxial, diminui-se a imunidade do efeito latch-up (tiristor parasitário) [28] ou pode-se causar problemas como punch-through [31].

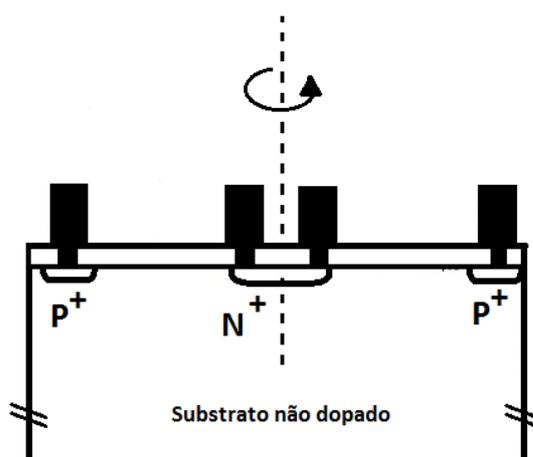


Figura 27 – Fotodiodo PIN Lateral Circular. Fonte: [30]

5.1.4 Fotodiodo PIN tipo finger

Os fotodiodos do tipo finger evoluíram dos fotodiodos PIN laterais onde a camada P⁺ foi substituída por dedos P⁺ para melhorar a eficiência quântica para baixos comprimentos de onda. Ao variar a distância entre os dedos, bem como o seu comprimento, pode-se melhorar o compromisso entre sensibilidade e velocidade de resposta [29]. Para curtas distâncias entre os dedos, os tempos de subida e descida ficaram abaixo de 0,25ns (largura de banda de 1GHz) para comprimentos de onda na faixa do azul (400nm). Já para o vermelho (por volta de 750nm), estes tempos ficaram em torno de 30ns, devido ao mecanismo lento de difusão dos fotoportadores gerados no substrato.

Em [32] foi proposto utilizar uma camada de material N (N-well) para reduzir este tempo de difusão, conforme mostra a Figura 28. Nesta configuração, a corrente de anodo fica isenta dos portadores gerados no substrato, que são coletados pelo contato de substrato. Com uma área de $16,5 \times 16,5 \mu\text{m}^2$, foi reportado uma taxa de transmissão de dados de 1Gbit/s, porém a responsividade era baixa devido à junção rasa formada entre P⁺/N_{Well} variando de 0,01 a 0,04 A/W (dependendo da tensão reversa aplicada). Entretanto, a corrente de escuro de 1nA era relativamente baixa comparada a outros fotodetectores com tecnologia convencional.

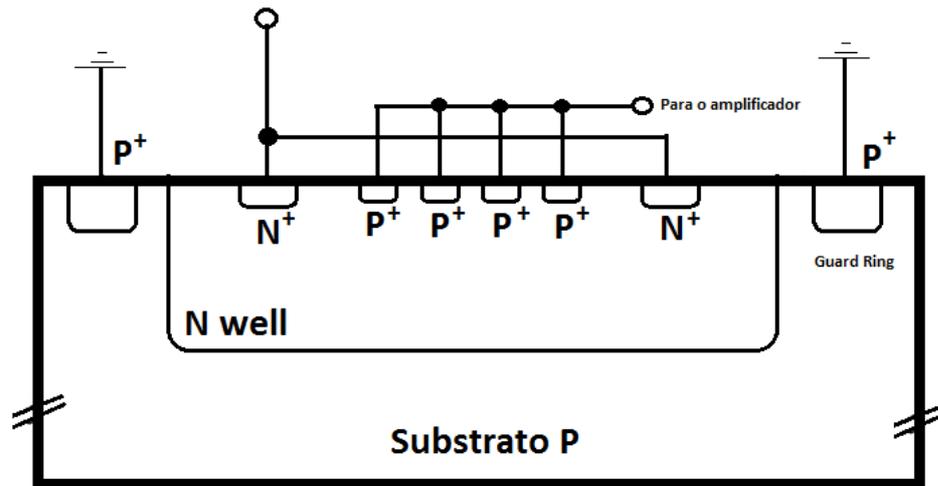


Figura 28 – Fotodiodo Finger em Nwell em tecnologia CMOS convencional de 0,35µm. Fonte: [32]

5.2 Tecnologia CMOS SOI

A tecnologia SOI consiste na fabricação de um dispositivo MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) em uma camada de silício que repousa sobre uma camada de dióxido de silício, chamada óxido enterrado (Buried OXide - BOX), que isola a região ativa do dispositivo do restante do substrato. Esta tecnologia apresenta vantagens em relação à tecnologia MOS (Metal Oxide Semiconductor – Metal Óxido Semicondutor) convencional, no que tange ao desempenho de transistores e circuitos, tais como menor inclinação de sublimar, maior transcondutância, maior imunidade à radiação e eliminação do efeito tiristor parasitário [31] [33]. Além disso, nos circuitos acoplados aos fotodetectores, como circuitos de leitura e amostragem, foi provado em [34], a melhor imunidade ao efeito de corpo na tecnologia SOI quando comparada a tecnologia CMOS convencional.

Devido a todas estas vantagens, e a larga utilização da tecnologia SOI, foram desenvolvidas algumas topologias de fotodetectores também nesta tecnologia. Neste item serão apresentadas as vantagens e desvantagens destes fotodetectores, bem como suas principais características.

5.2.1 Tipos de dispositivos SOI fotodetectores

A maioria dos processos SOI utilizam camadas de silício mais finas que 100nm [15]. Com esta dimensão, apenas dispositivos fotodetectores laterais, tais como os fotodiodos PIN (Figura 29), ou transistores bipolares podem ser considerados, já que se torna muito difícil a

implementação de dispositivos verticais, que necessitariam de uma camada de silício mais espessa para ter uma eficiência quântica aceitável.

Estes fotodetectores são muito utilizados em aplicações que envolvem comprimentos de onda curtos, na ordem de 400nm, pois a profundidade de absorção é de apenas algumas dezenas de nanômetros [15].

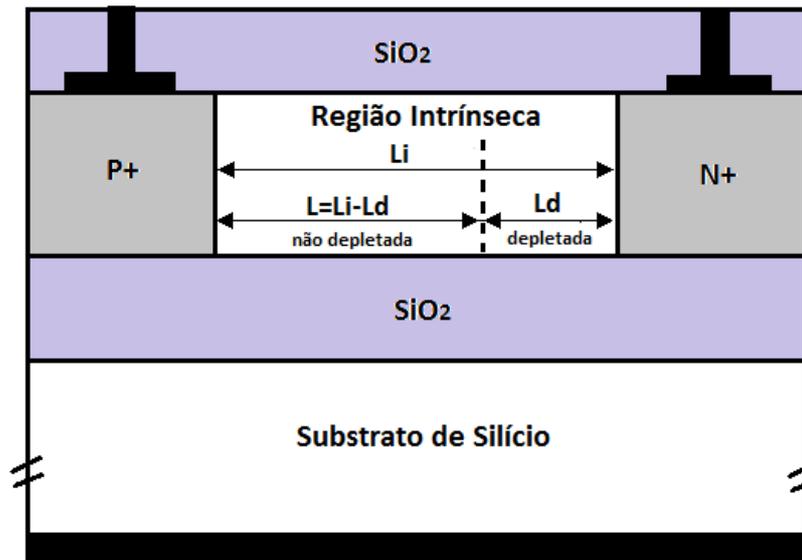


Figura 29 – Fotodiodo lateral PIN SOI. Fonte: Autor “adaptado de” [15]

Outra característica importante é que estes fotodetectores apresentam baixa corrente de escuro e excelente desempenho em termos de velocidade de resposta [23]. Estas vantagens são promovidas principalmente pela presença do óxido enterrado, que isola a região de depleção dos fotoportadores gerados no substrato e também diminui a área de junção. Por isso, são perfeitamente utilizados nas aplicações de DVD [35], ou em aplicações na área da medicina e do meio ambiente, como na medição de concentração de DNA e proteínas, nas taxas de raios ultravioletas (UV), e ozônio [9], que fazem uso de radiação luminosa na faixa de 390nm.

Entretanto, o mercado de comunicações ópticas utiliza transmissores de luz na faixa de 850nm, sendo a primeira janela óptica, utilizada para curtas distancias, pois os transmissores desta faixa de comprimento de onda são mais baratos [36]. Como os fotodetectores fazem parte do circuito de recepção, eles teriam que ser capazes de fazer a conversão da radiação luminosa para corrente elétrica com alta responsividade e sensibilidade. Porém, como os fotoportadores são gerados no substrato para 850nm (abaixo do BOX), eles não conseguem contribuir para a fotocorrente, o que diminui muito a sua responsividade e sensibilidade.

Este conflito entre responsividade e velocidade de resposta é inevitável nos dispositivos que utilizam o silício como semiconductor, devido ao seu baixo coeficiente de penetração. Como consequência, foram reportados na literatura, vários fotodetectores em SOI realizados com camadas de silício mais espessas, de aproximadamente $2\mu\text{m}$. Em [37] e em [38], por exemplo, fotodetectores do tipo trincheira (Figura 30) foram utilizados para aumentar o campo elétrico até a profundidade de $6\mu\text{m}$, portanto, melhorando a velocidade de resposta e a responsividade, com largura de banda de alguns GHz. Entretanto, a camada de silício espessa faz com que estes dispositivos sofram com alta capacitância e alta corrente de escuro.

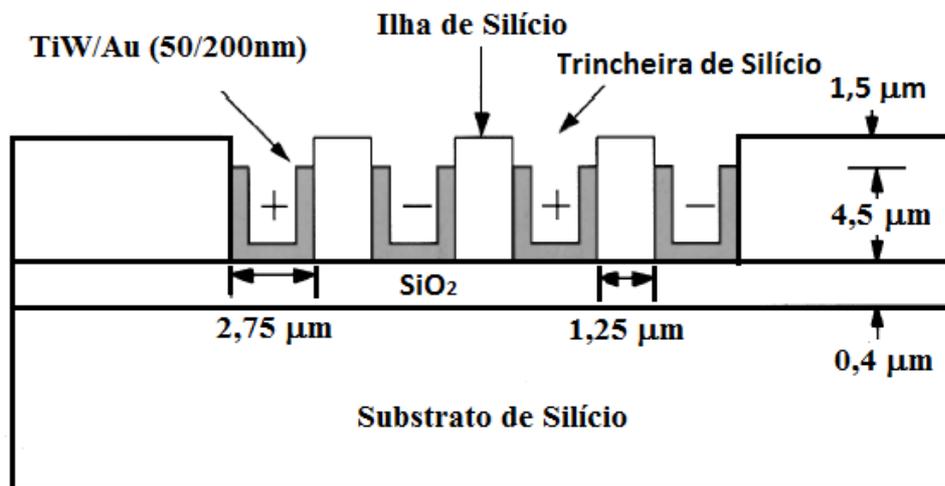


Figura 30 – Fotodetector SOI do tipo metal-semicondutor-metal (trincheira). Fonte: [38]

Outros exemplos de fotodetectores reportados na literatura com características de velocidade de resposta bastante desenvolvidas são: o dispositivo MSM (metal-semicondutor-metal) reportado em [38] e [39] que chegou a atingir 140 GHz de largura de banda ou mesmo dispositivos com rugosidades reportados em [40], que utilizam a rugosidade da superfície do silício de aproximadamente $0,1\mu\text{m}$ em uma camada espessa de $2\mu\text{m}$ para aumentar lateralmente a absorção da radiação luminosa chegando a uma velocidade de transmissão de 1Gb/s e responsividade de $0,19 \text{ A/W}$ (conforme mostra a Figura 31).

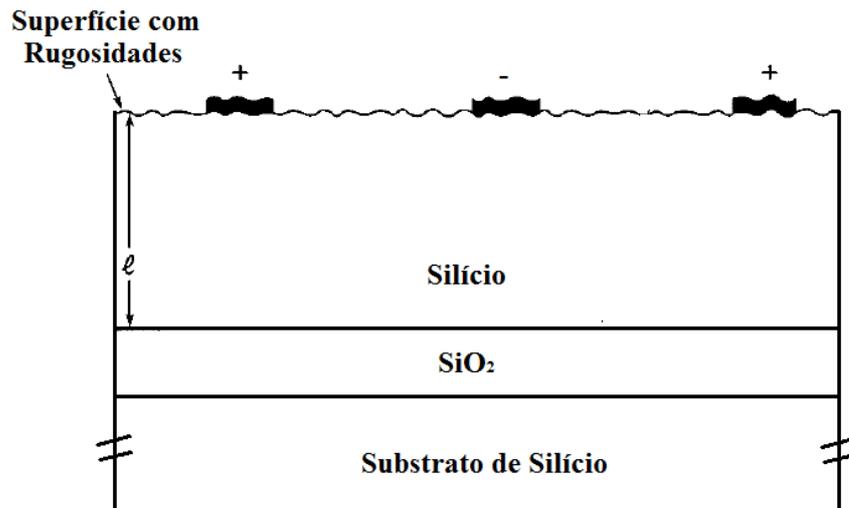


Figura 31 – Ilustração da rugosidade da camada de silício utilizado para aumentar a responsividade. Fonte: [40]

Também foram desenvolvidos dispositivos fotodetectores que utilizam uma lâmina SOI dupla [41], que é disponível comercialmente, conforme mostra a Figura 32. Estes dispositivos são chamados de DBR (distributed Bragg reflector), pois utilizam uma estrutura formada por várias camadas de diferentes materiais, nas quais, há várias reflexões que combinadas podem aumentar a eficiência quântica do dispositivo. Este fenômeno de várias reflexões também é conhecido como RCE (resonant cavity enhancement). O fotodetector resultante demonstrou uma eficiência quântica total de 40% para comprimento de onda de 860nm e um tempo de resposta de 29ps, que o torna adequado para aplicações de 10Gb/s.

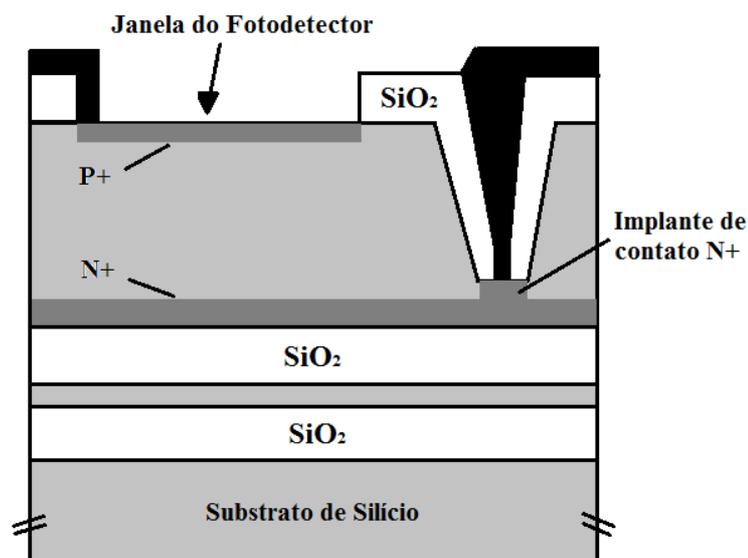


Figura 32 – Visão esquemática do fotodetector SOI RCE. Fonte: [41]

O fotodetector de avalanche foi reportado em [42]. Eles consistem em regiões P⁺ e N⁺, separadas entre si por portas de silício policristalino. Estas portas permitem depleção total das regiões N ($3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) que ficam sob elas e separam as regiões N⁺ da P⁺. A responsividade de 0,4A/W foi reportada para comprimento de onda de 850nm. Se a concentração de dopantes da região N for aumentada, o fenômeno de avalanche [31] terá início com tensões de polarização mais baixas, entretanto, também reduzirá a região de depleção, fazendo com que apenas uma parte da região intrínseca (L_i) fique depletada, aumentando o tempo de transito dos portadores. Em [43], um ganho de avalanche de quatro vezes foi atingido com tensão reversa de 9 Volts.

Dispositivos MOS fabricados em lâminas SOI também têm sido utilizados como fototransistores, explorando a sua operação no modo de transistor bipolar lateral com porta flutuante [44]. Uma responsividade muito alta foi reportada, a qual aumenta, ao diminuir o comprimento da porta. Entretanto, o desempenho em termos de velocidade de resposta é muito baixo, com tempo de subida e descida na ordem de dezenas ou centenas de microssegundos.

Fotodiodos PIN laterais, iguais aos estudados neste trabalho, foram reportados em [45], porém utilizando semiconductor germânio, em substituição ao silício. O germânio é um material compatível para integrar-se ao silício e já está presente nos dispositivos de silício a fim de aumentar a tensão mecânica da rede cristalina, aumentando a mobilidade dos portadores [46].

A utilização de camadas ultrafinas de SOI como substrato para o crescimento da camada de germânio minimiza o problema da difusão de silício sobre o germânio durante etapas de recozimento. Além disso, a profundidade de absorção do germânio é de apenas algumas centenas de nanômetros para $\lambda=850\text{nm}$ (como pode ser visto na Figura 14), por isso, é necessário uma camada de apenas 400nm de germânio para absorver radiação luminosa na faixa de 800 a 900nm. Um fotodiodo PIN lateral de $10 \times 10 \mu\text{m}$, com 29GHz de largura de banda, com tensão de polarização de -1V e eficiência quântica de 32% foi reportado em [45]. Entretanto, a corrente de escuro era muito alta, na ordem de $0,02 \mu\text{A}$, o que reduziu drasticamente a sensibilidade do fotodetector.

Os dispositivos mencionados acima têm vantagens apreciáveis sobre os dispositivos convencionais, entretanto, a sua construção requer várias etapas de processo diferentes, o que os encarece substancialmente.

A realização de um fotodetector em SOI que permita uma taxa de transmissão de dados maior que 10Gb/s, com alta sensibilidade, baixa complexidade e baixo custo para

aplicações de receptores ópticos de baixa distância, que utilizam 850nm de comprimento de onda é realmente um desafio, já que a espessura de silício utilizada para prover alta velocidade de resposta é baixa, o que faz com que a responsividade seja baixa também.

Uma opção para superar esta dificuldade seria não utilizar o comprimento de onda de 850nm para o mercado de comunicações ópticas de curta distância. Porém os transmissores de ondas mais curtas são mais caros, e têm potência de transmissão mais baixas, o que traria novos problemas.

5.2.2 Dispositivos no substrato

Com a simples adição de uma máscara litográfica extra no processo de fabricação de dispositivos em lâminas SOI a fim de corroer localmente a camada fina de silício e a camada do BOX, é possível integrar estes fotodetectores ao substrato. Desta forma, pode-se produzir um fotodiodo PIN lateral ou vertical no substrato de uma lâmina SOI convencional, que geralmente possui uma espessura de 500 μm e concentração de dopantes na ordem de 10^{15}cm^{-3} [15], os quais proporcionam uma camada de depleção de profundidade de aproximadamente 2 μm sob baixa tensão de operação e um comprimento de difusão na ordem de 20 μm . Estas características permitem um grande aumento da eficiência quântica principalmente na faixa de comprimento de onda do vermelho ou infravermelho (700-850nm), o que torna este tipo de fotodetector muito apropriado para sistemas de imagem [47], combinando as vantagens da tecnologia SOI para os circuitos de imagem [34] [48]. Entretanto, as vantagens da baixa corrente de escuro e alta velocidade de resposta são perdidas. Na verdade, estes fotodetectores são muito parecidos com os detectores CMOS convencionais, mas têm a vantagem que o substrato não precisa ser otimizado para melhorar o desempenho dos transistores. Na tecnologia CMOS convencional (BULK), o escalamento dos transistores faz com que seja necessária uma maior concentração de dopantes no substrato o que gera uma região de depleção mais fina e menores comprimentos de difusão, resultando em fotodetectores menos eficientes [49].

5.2.3 Dispositivos verticalmente integrados

Outra forma de integrar os fotodetectores seria fabricá-los por cima dos circuitos por um pós-processo chamado TFA (thin-film-on-ASIC) onde ASIC significa Application Specific Integrated Circuit. O fotodetector TFA é feito através da deposição de camadas de silício amorfo sobre o circuito e foram desenvolvidos para melhorar a responsividade. Pelo fato de estarem localizados separadamente dos transistores, os detectores podem ser otimizados também separadamente e todo o chip pode ser considerado fotoativo [50]. O silício amorfo tem características de absorção da radiação luminosa melhores que o silício cristalino, já que a sua profundidade de penetração é 20 vezes menor [50].

Entretanto, a velocidade de operação destes dispositivos é mais baixa quando comparada aos dispositivos que utilizam silício policristalino, devido a sua menor mobilidade. A corrente de escuro também é mais alta [51].

6 EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

A variação da temperatura provoca uma série de efeitos nas propriedades elétricas dos semicondutores e nos parâmetros elétricos dos dispositivos. Alguns desses efeitos, diretamente relacionados com este trabalho, serão apresentados neste capítulo.

6.1 O efeito na concentração intrínseca e na ionização incompleta de portadores

A concentração intrínseca de portadores (n_i) no semicondutor, que indica a quantidade de portadores livres gerados por excitação térmica, depende apenas do material e da temperatura. Assim, na temperatura de 0 K não há portadores livres. Ao aumentar a temperatura, os elétrons ganham energia suficiente para se tornarem elétrons livres, gerando pares elétron-lacuna. A concentração intrínseca é dada pela equação (51) [52].

$$n_i = \sqrt{N_C \cdot N_V} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (51)$$

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 e é dada pela equação (52) segundo [53]:

$$\begin{aligned} E_g &= 1,17 + 1,059 \cdot 10^{-5} \cdot T - 6,05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2, \text{ para } T \leq 170K \text{ ou} \\ E_g &= 1,1785 - 9,025 \cdot 10^{-5} \cdot T - 3,05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2, \text{ para } T > 170K \end{aligned} \quad (52)$$

A Figura 33 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. No cálculo de n_i , as densidades de estados N_C e N_V foram calculadas de acordo com a ref. [52]. Pode-se notar que há um pequeno aumento de E_g com a redução da temperatura, enquanto que n_i diminui muitas ordens de grandeza na mesma faixa.

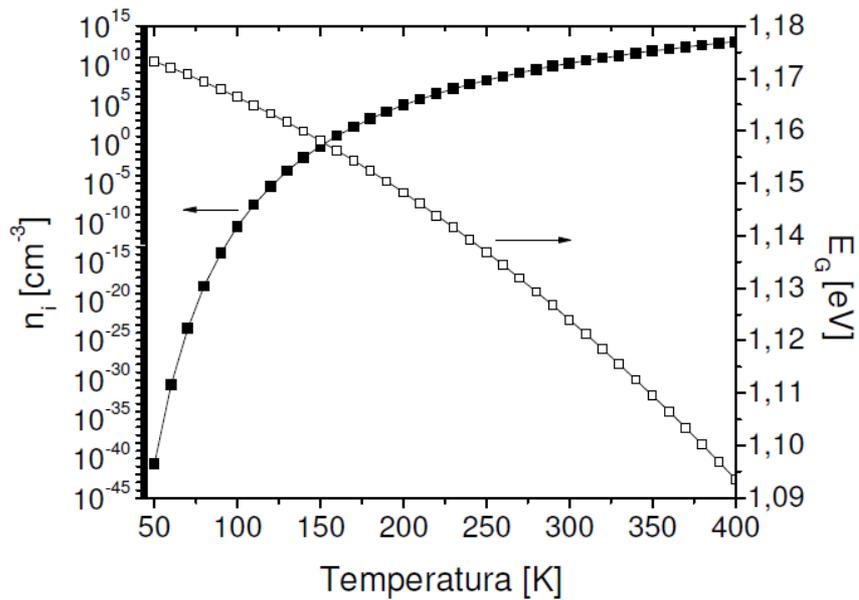


Figura 33 – Variação da concentração intrínseca de portadores e da largura de banda proibida do silício em função da temperatura. Fonte: [46]

Em um semiconductor dopado, em temperaturas criogênicas, a energia térmica disponível não é suficiente para ionizar todas as impurezas [53]. Dessa forma, a quantidade de portadores ionizados (N_A^-) será menor que a concentração de impurezas aceitadoras N_A presentes no material e pode ser expressa pela equação (53):

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + 4 \exp\left(\frac{E_A - E_{Fp}}{kT}\right)} \quad (53)$$

Ou, no caso de impurezas doadoras:

$$N_D^- = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_D}{kT}\right)} \quad (54)$$

Onde N_D é a concentração de impurezas doadoras, E_A e E_D são os níveis de energia das impurezas, E_{Fn} e E_{Fp} são os níveis de Fermi para os elétrons e para as lacunas. [54]

O potencial de Fermi (Φ_F), descrito nas equações (8) e (9), também depende da temperatura.

Nesse caso, a concentração N_A deve ser substituída por N_A^- . A Figura 34 mostra a variação do potencial de Fermi e da porcentagem de impurezas ionizadas com a temperatura

para silício com diversas concentrações de dopantes. Para obter N_A^- , E_{Fp} foi calculado de acordo com a ref. [54].

Pode-se perceber que ao reduzir a temperatura, o potencial Φ_F aumenta, devido à enorme redução da concentração intrínseca n_i . O aumento de Φ_F é menor para a concentração de dopantes mais alta. Em temperaturas muito baixas, inferiores a 50 K, uma parcela ínfima das impurezas é ionizada.

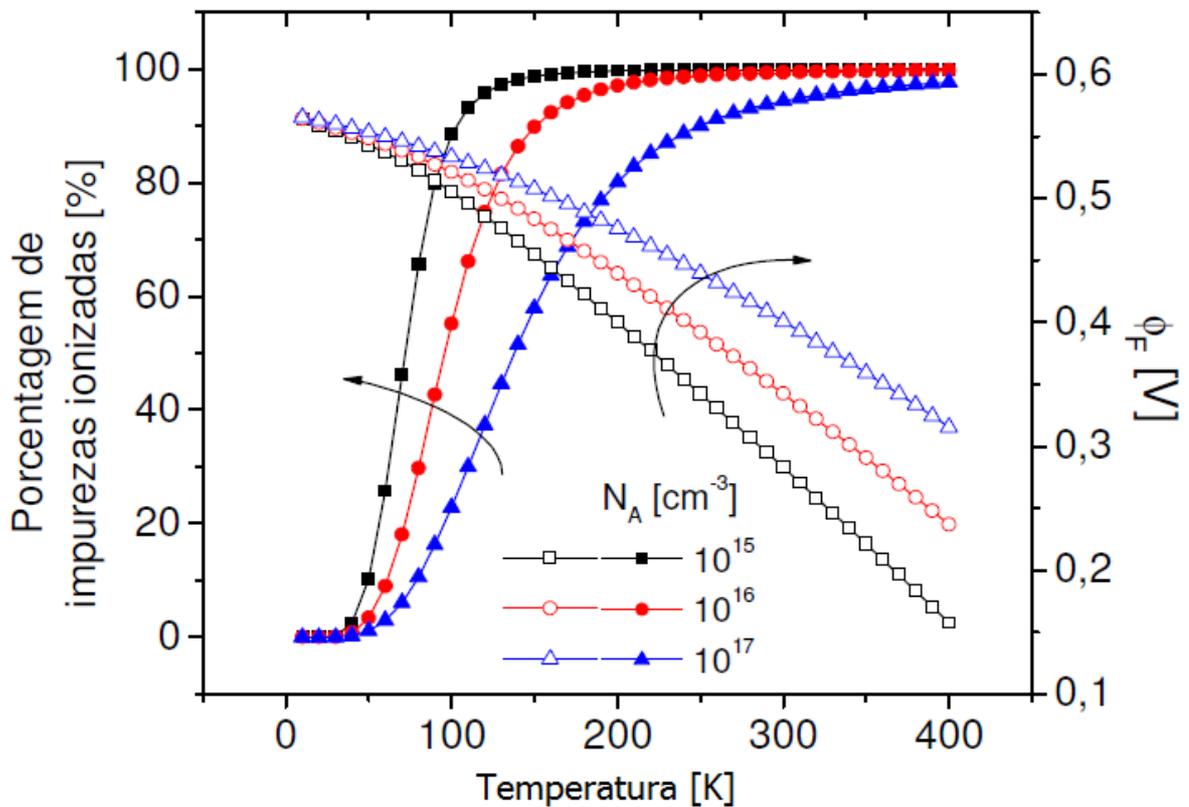


Figura 34 – Variação do potencial de Fermi e da porcentagem de impurezas ionizadas com a temperatura para diversas concentrações de dopantes. Fonte: [46]

6.2 O efeito na corrente de escuro

Conforme visto no capítulo 3, a corrente total reversa em um diodo PIN totalmente depletado pode ser aproximada pela equação (55) [17]:

$$I_{DARK} = qAn_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_N}{\tau_N}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_P}{\tau_P}} \right) + \frac{qn_iW}{\tau_e} \quad (55)$$

Onde W é a largura da região de depleção e τ_c é o tempo de vida efetivo da geração térmica na região de depleção.

Na equação (55), o primeiro termo representa a componente de difusão da região neutra e é proporcional a n_i^2 e o segundo termo representa a corrente de geração térmica na RDD e é proporcional a n_i . Nota-se que ambos os termos são dependentes de n_i e consequentemente, da temperatura.

Em temperatura de zero Kelvin, não há portadores de carga, uma vez que todos os níveis energéticos da faixa de valência estão ocupados por elétrons e todos os níveis energéticos da faixa de condução estão desocupados. Nessa temperatura, o material se comporta como um isolante. Quando há um aumento da temperatura, pares elétrons-lacunas são gerados, pois alguns elétrons da faixa de valência são excitados termicamente, adquirindo energia suficiente para passar para a faixa de condução, deixando um número igual de estados desocupados, chamados de lacunas, na faixa de valência. Quanto maior a temperatura, mais níveis da faixa de condução tornam-se ocupados e mais níveis da faixa de valência desocupados e maior é a corrente de geração térmica.

Para semicondutores com valores de concentração intrínseca (n_i) pequenos, como o silício, a corrente de geração é a dominante na corrente de escuro. Entretanto, para temperaturas altas [17], a corrente de difusão será dominante, já que n_i passa a ser muito maior em altas temperaturas.

6.3 O efeito na mobilidade

A mobilidade dos portadores é definida como a facilidade com que os elétrons e lacunas atravessam a rede cristalina de um material. Este parâmetro está relacionado diretamente com a capacidade de fornecimento de energia do dispositivo. Quanto menor for a resistência do material, menor será a perda de energia, e assim, maior mobilidade dos portadores.

No interior do material, o movimento dos elétrons não é livre, ocorrendo colisões entre portadores e átomos da rede cristalina. Essas colisões ocorrem devido aos mecanismos de espalhamento, que podem ser classificados como: espalhamento de rede, espalhamento por impurezas ionizadas, espalhamento portador-portador e espalhamento por impurezas neutras [52].

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 [52];

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 [52];

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 [53], 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} [55].

A mobilidade dos portadores pode ser descrita pela equação (55), através do modelo unificado para baixos campos elétricos, proposto por Klaassen [56] [57], onde são considerados os mecanismos de espalhamento, por temperatura e concentração de dopantes, podendo ser combinados através da regra de Mathiessen [52].

$$\mu_0 = \frac{1}{\frac{1}{\mu_{i,L}} + \frac{1}{\mu_{i,DAeh}}} \quad (56)$$

Onde μ_0 é a mobilidade dos portadores independentes do campo elétrico e os termos $\mu_{i,L}$ e $\mu_{i,DAeh}$ são extremamente dependentes da temperatura e podem ser verificados na referências [56] e [57].

A equação (56) não considera a dependência da mobilidade com o campo elétrico transversal, nem com o lateral. Por isso, para se obter a mobilidade total dos portadores, é necessário considerar o campo elétrico transversal, que é aquele que atrai os portadores para a primeira ou segunda interfaces (no caso da tecnologia SOI). Entretanto, os fotodiodos PIN,

ou mesmo, os dispositivos fotodetectores em geral, não apresentam o terminal de porta, por isso essa atração poderá ocorrer somente através da segunda interface (no caso de SOI), com o terminal de substrato.

O campo elétrico lateral afeta a mobilidade devido a saturação da velocidade do portador. A velocidade de saturação dos portadores é dependente da temperatura e pode ser expressa através do modelo proposto por Canali [58]. As equações (57) e (58) apresentam a velocidade de saturação para elétrons e lacunas, respectivamente:

$$v_{sat,e} = 10^7 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{-0,87} \quad (57)$$

$$v_{sat,h} = 8,37 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{-0,52} \quad (58)$$

7 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Neste capítulo será apresentada a ferramenta de simulação utilizada neste trabalho e as estruturas descritas no simulador para realização do estudo.

7.1 O simulador Atlas

As simulações realizadas para este trabalho foram feitas utilizando o simulador de dispositivos Atlas [59], da empresa Silvaco.

O simulador Atlas é baseado em um conjunto de equações físicas que permitem obter características elétricas associadas às estruturas descritas e às condições de polarização. O dispositivo a ser simulado é descrito através de uma grade de pontos (*grid*) bi ou tridimensional. Para cada cruzamento das linhas de grade, chamado de nó (*node*), o simulador resolve numericamente um conjunto de equações.

Com o Atlas é possível obter, além de curvas das características elétricas dos dispositivos simulados, variáveis internas da estrutura como potencial elétrico, densidade de corrente, campo elétrico, entre outros.

Para criar o arquivo de simulação, primeiro deve ser descrita uma grade de pontos compatível com a estrutura a ser simulada. Para isso, devem-se concentrar mais pontos de grade nas regiões onde há mudança de materiais ou de concentração de dopantes. Depois, devem ser definidas as regiões e os eletrodos do dispositivo.

Em seguida, é necessário definir os modelos físicos que melhor se aplicam ao que será estudado no dispositivo, polarizá-lo e solicitar que sejam salvas as curvas e estruturas desejadas para visualização dos resultados.

7.2 Modelos

Os modelos utilizados no Atlas a fim de reproduzir os fenômenos físicos existentes são:

- a) FERMI: modelo que utiliza a estatística de portadores de Fermi-Dirac para solução das equações;
- b) BGN (*Band Gap Narrowing*): considera o estreitamento da largura da faixa proibida, sendo importante em regiões com altas concentrações de dopantes;

- c) KLAASSEN: modelo de mobilidade inicial que considera temperatura, concentração de dopantes e interações entre os portadores;
- d) FLDMOB (*Parallel Electric Field Dependence*): modelo de degradação da mobilidade que considera o efeito do campo elétrico lateral;
- e) KLASRH: modelo de geração e recombinação que contabiliza o tempo de vida dos portadores dependente da concentração de dopantes e da temperatura;
- f) OPTR: modelo para simulação de dispositivos ópticos, que considera a densidade de estados permitidos para múltiplas transições ópticas;
- g) KLAAUG (*Klaassen's concentration dependent Auger recombination model*): modelo de recombinação que considera a transição direta dos portadores;
- h) INCOMPLETE: considera a ionização incompleta das impurezas com a redução da temperatura;
- i) IONIZ: usado como complemento do modelo INCOMPLETE, considerando ionização completa em silício com alta concentração de dopantes;
- j) SHI (*shirahata*): modelo de degradação da mobilidade pelo campo elétrico transversal e concentração de portadores.

O módulo chamado Luminous do Simulador Atlas, o qual, é o simulador optoeletrônico, foi utilizado a fim de calcular o perfil de intensidade óptica absorvida pelos dispositivos e convertê-lo em taxas de fotogeração. Através da determinação de vários raios com intensidade luminosa pré-determinados, foi possível a discriminação dos comprimentos de onda incidentes variando desde 350 a 1000nm.

No apêndice A pode-se verificar um exemplo de arquivo de simulação utilizando o módulo luminous.

8 DISPOSITIVOS SIMULADOS E RESULTADOS

Para a realização deste trabalho foram efetuados dois grupos de simulações, um deles com a estrutura de apenas um dedo ou “finger” e; no outro grupo, foram simuladas estruturas multidedos ou “multi-finger”, com variação do comprimento intrínseco. Neste capítulo serão apresentadas as estruturas simuladas, bem como os resultados obtidos.

8.1 Simulações de dispositivos com um único dedo

Nesta seção serão demonstrados os resultados para dispositivos com um único dedo.

8.1.1 Estruturas simuladas

A fim de comparar as diferentes tecnologias (CMOS Convencional e SOI) foram simuladas três estruturas, conforme pode ser visto nas Figuras 35, 36 e 37.

Na Figura 35 é apresentado o esquema simplificado de um fotodiodo convencional em tecnologia CMOS formado através da junção de uma cavidade N e o substrato P da lâmina. As dimensões utilizadas e os parâmetros deste dispositivo respeitam a tecnologia CX 0,6 μ m (CX06) da XFAB conforme descrito em [60].

Na Figura 36 é apresentado o esquema simplificado de um fotodiodo PIN em tecnologia CMOS, que também respeita as dimensões e parâmetros utilizados na tecnologia CX06 da XFAB [60].

O fotodiodo PIN SOI CMOS é apresentado na Figura 37. Este dispositivo segue os parâmetros e dimensões da tecnologia de 2 μ m da UCLovain, conforme descrito em [61].

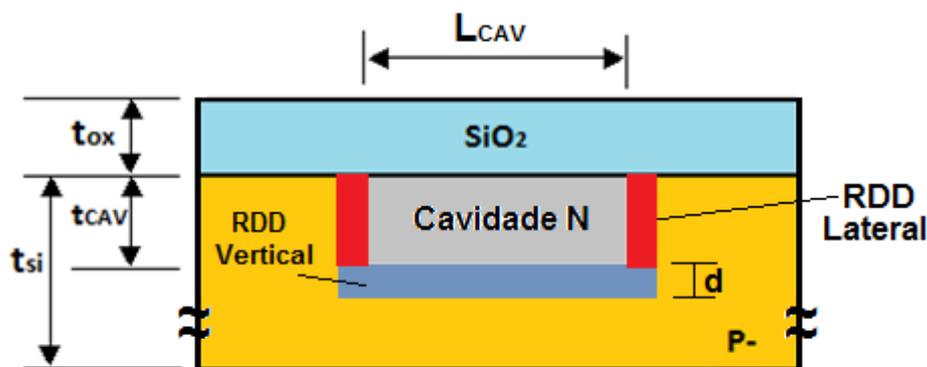


Figura 35 – Esquema simplificado do fotodiodo CMOS convencional. Fonte: Autor

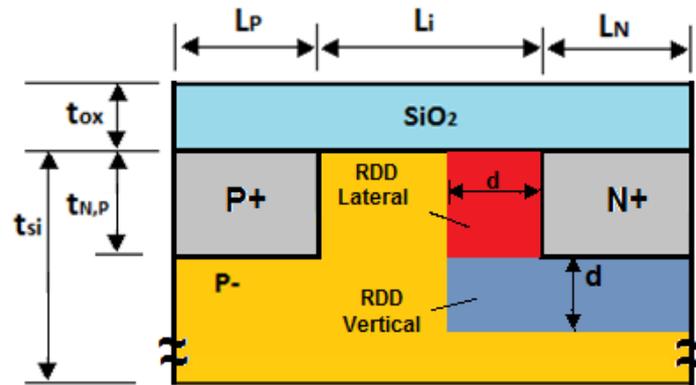


Figura 36 – Esquema simplificado do fotodiodo PIN CMOS. Fonte: Autor

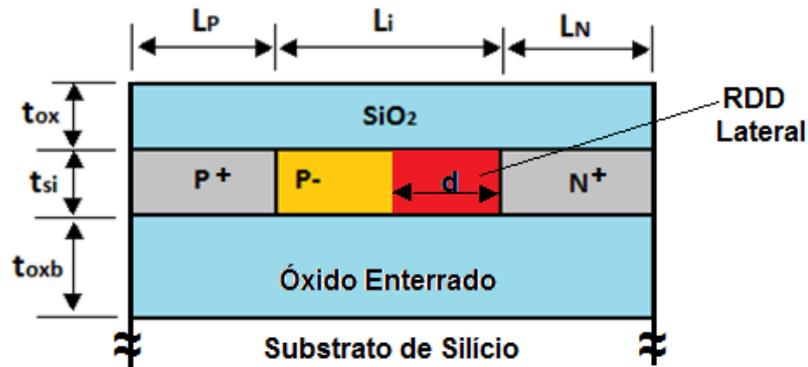


Figura 37 – Esquema simplificado do fotodiodo PIN CMOS SOI. Fonte: Autor

As dimensões dos dispositivos e os principais parâmetros estão resumidos na Tabela 1

Tabela 1 – Principais dimensões e parâmetros dos dispositivos simulados.

<i>Parâmetro</i>	<i>Convencional</i>	<i>PIN BULK</i>	<i>PIN SOI</i>
Espessura de Silício (t_{si})	500 μ m	500 μ m	80nm
Espessura do óxido enterrado (t_{oxb})	X	X	390nm
Espessura do Óxido de Passivação (t_{ox})	280nm	280nm	280nm
Concentração de dopantes intrínseca (N_i)	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Concentração de dopantes P+ (N_A)	$1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
Concentração de dopantes N+ (N_D)	$4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
Comprimento das regiões P+, N+ ($L_{P,N}$)	X	4,5 μ m	4,5 μ m
Comprimento da cavidade (L_{CAV})	9 μ m	X	X
Comprimento da região intrínseca (L_i)	X	9 μ m	9 μ m
Espessura da Cavidade (t_{CAV})	300nm	X	X
Espessura das regiões P+ e N+ ($t_{p,N}$)	X	300nm	X

Fonte: Autor

8.1.2 Comparação entre corrente fotogerada e corrente de escuro

A Figura 38 apresenta o módulo da corrente fotogerada obtida ao iluminar um fotodiodo convencional ($L_{CAV}= 9\mu\text{m}$, $t_{CAV}= 300\text{nm}$) com sete comprimentos de onda diferentes variando de 350 a 1000nm, sendo a potência luminosa fixa de $1\text{mW}/\text{cm}^2$. Estes valores foram obtidos em função da tensão aplicada ao anodo (V_D) (lado P da junção). Como se pode verificar, a tensão de polarização é aplicada de forma que a junção esteja reversamente polarizada, a fim de aumentar a região de depleção. Isso significa que quanto mais negativa for a tensão V_D , maior será a região de depleção e maior será a corrente fotogerada; fato que pode ser observado principalmente para $\lambda=1000\text{nm}$.

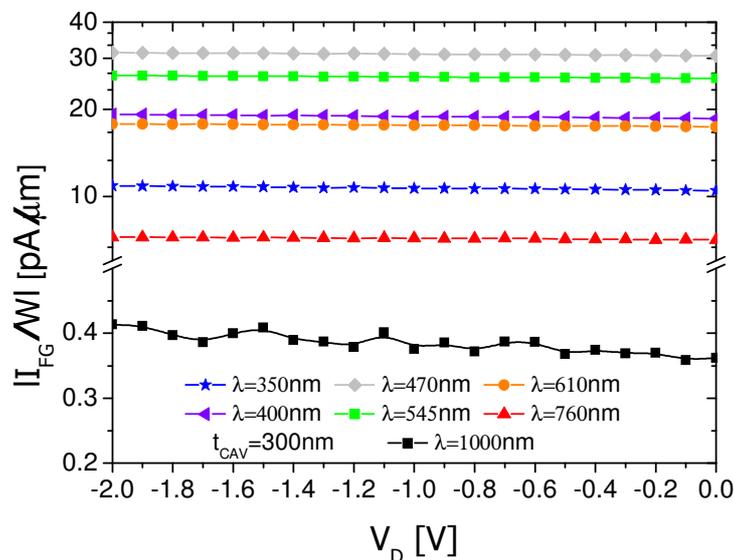


Figura 38 – Módulo da fotocorrente normalizada em função de V_D para o fotodiodo convencional CMOS com $L_{CAV}= 9\mu\text{m}$, $t_{CAV}= 300\text{nm}$. Fonte: Autor

A menor fotocorrente é obtida para o maior comprimento de onda ($\lambda=1000\text{nm}$), já que segundo a equação (10), a energia dos fótons luminosos é inversamente proporcional ao comprimento de onda. Esta é a razão pela qual a fotocorrente obtida para $\lambda=1000\text{nm}$ é a menor, pois sua energia é a menor dentre as simuladas neste caso.

Conforme o comprimento de onda da radiação luminosa é diminuído, a energia dos fótons aumenta e, conseqüentemente, a fotocorrente também aumenta. Entretanto, este comportamento não é observado para os dois menores comprimentos de onda (350 e 400nm). Este fato ocorre, pois a região de depleção deste dispositivo é quase que totalmente formada abaixo da cavidade N (Figura 35) e a radiação incidente não consegue alcançá-la, visto que a profundidade de penetração (L_{abs}) varia de acordo com o comprimento de onda (conforme

pode ser visto na Figura 15). Para $\lambda=350\text{nm}$ e 400nm , a profundidade de penetração é de apenas 10nm e 80nm respectivamente (Figura 15), entretanto, a região de depleção é formada abaixo de 300nm , que é a espessura da cavidade N. Portanto, os fotoportadores são gerados antes da região de depleção, onde o campo elétrico é baixo, permitindo alta taxa de recombinação, além de ter alta influência da recombinação de superfície, que é a região onde a periodicidade das ligações é interrompida, e onde o contato com outros materiais é feito.

Portanto, somente os fotoportadores que foram gerados a no máximo um comprimento de difusão (L_{dif}) de distância da RDD podem contribuir para a corrente fotogerada antes de se recombinar [16].

Para melhor visualização deste comportamento, o mesmo dispositivo convencional BULK foi simulado para duas outras tecnologias, cuja espessura da cavidade é diferente, mantendo os demais parâmetros e seguindo as dimensões da tecnologia XO035 [62] ($t_{\text{CAV}}=170\text{nm}$) e FC025 [63] ($t_{\text{CAV}}=80\text{nm}$), ambas da XFAB.

Pode-se verificar na Figura 39, que a corrente gerada pela radiação luminosa de 400nm de comprimento de onda aumenta conforme se diminui a espessura da cavidade, pois a região de depleção se forma mais próxima à superfície, fazendo com que uma maior porcentagem da corrente absorvida contribua para a corrente fotogerada antes de sofrer o fenômeno de recombinação.

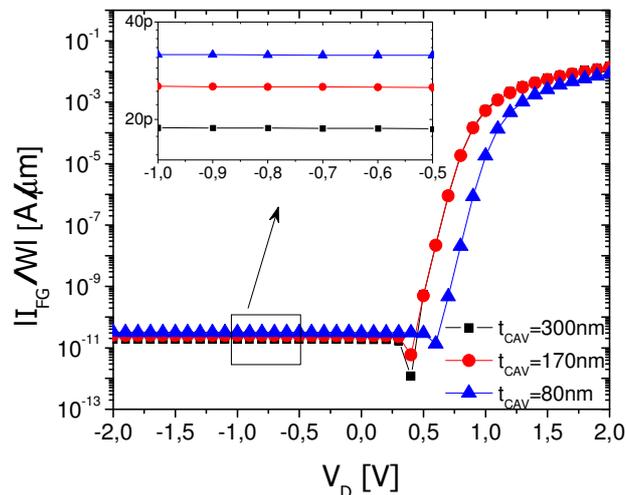


Figura 39 – Módulo da fotocorrente normalizada em função de V_D para o fotodiodo convencional CMOS com $L_{\text{CAV}}=9\mu\text{m}$, para três diferentes tecnologias e $\lambda=400\text{nm}$. Fonte: Autor

Uma maneira eficiente de contornar o problema da pequena profundidade de penetração do silício é implementar os dispositivos fotodetectores na topologia PIN conforme Figura 36. Desta forma, a região de depleção fica muito próxima à superfície, melhorando

expressivamente a absorção da radiação luminosa de baixos comprimentos de onda. Este fato pode ser observado na Figura 40, onde é mostrada a corrente fotogerada para dispositivos PIN CMOS em função da tensão V_D , para diferentes comprimentos de onda.

Pode-se observar que quanto maior o comprimento de onda, menor é a corrente fotogerada, devido à baixa energia dos fótons (equação 10). Entretanto, neste dispositivo há a formação de uma parte da RDD abaixo da região N+ (RDD vertical) e os comprimentos de onda de 390nm e 400nm não conseguem alcançar esta região de depleção vertical, visto que a sua profundidade de penetração é menor que 100nm [20] e a espessura da região N+ é de 300nm para a tecnologia simulada [60], portanto, a RDD lateral é a única a contribuir para a separação dos fotoportadores através do alto campo elétrico, fazendo com que o valor da corrente fotogerada seja mais baixo do que o esperado para $\lambda=390\text{nm}$ e 400nm .

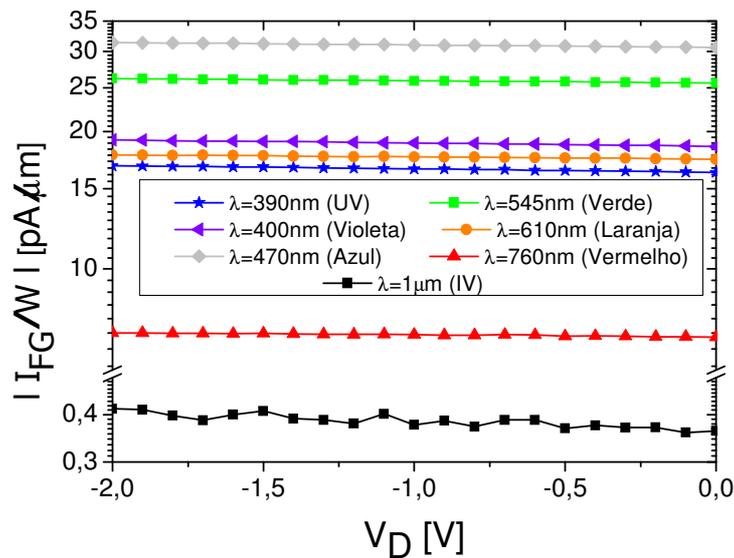


Figura 40 – Módulo da fotocorrente normalizada em função de V_D para o fotodiodo PIN CMOS. Fonte: Autor

Na Figura 41, pode-se verificar a corrente fotogerada por um diodo PIN CMOS SOI iluminado com vários comprimentos de onda. A região de depleção é formada entre a região intrínseca e a região N+, resultando numa camada de depleção também bem próxima a superfície, assim como o fotodiodo PIN CMOS BULK.

Entretanto, a principal diferença entre os fotodiodos PIN BULK e SOI é a presença da região de depleção vertical, que é formada abaixo da região N+ somente no diodo BULK, pois a presença do BOX (óxido enterrado) na tecnologia SOI, não permite a criação desta camada de região de depleção vertical.

Por isso, quanto maior o comprimento de onda, menor é a corrente fotogerada na Figura 41. Esta relação é válida também para comprimentos de onda de 390 e 400nm que apresentam a maior fotocorrente, pois são aqueles que têm a maior energia [17].

A alta seletividade apresentada pelo fotodiodo PIN SOI é muito importante em aplicações que utilizam comprimentos de onda baixos, inclusive na faixa do ultravioleta.

Já para comprimentos de onda muito altos, como $\lambda=1000\text{nm}$, a corrente fotogerada apresenta níveis de corrente muito baixos (aproximadamente $10\text{fA}/\mu\text{m}$), pois o coeficiente de absorção (α) é muito baixo (equação 6), fazendo com que parte da radiação luminosa atinja o substrato (ultrapassando o BOX), de tal forma que os fotoportadores gerados no substrato não podem se difundir para a camada de depleção e então contribuir para a fotocorrente.

Embora este seja um fator limitante da eficiência quântica, pois quanto menor a corrente fotogerada, menor será a eficiência quântica (equação 42); a ausência de difusão dos portadores gerados no substrato melhora bastante a velocidade de resposta do dispositivo, visto que o mecanismo de difusão é lento [16].

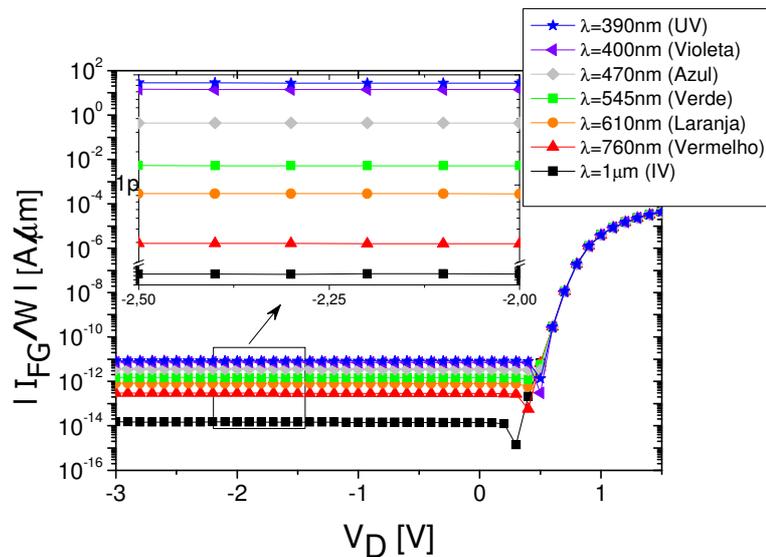


Figura 41 – Módulo da corrente fotogerada normalizada em função de V_D para o fotodiodo PIN CMOS SOI.
Fonte: Autor

Além de alta eficiência quântica, um baixo nível de ruído também é desejável nos dispositivos fotodetectores, uma vez que irá determinar o mínimo sinal detectável. Existem muitos fatores que contribuem para o ruído, um deles é a corrente de escuro, que é a corrente de fuga quando o fotodetector está em funcionamento, mas não exposto à luz, e é devido à geração térmica de pares elétron-lacuna dentro da região de depleção.

A Figura 42 mostra a corrente de escuro para fotodiodos convencionais em tecnologia CMOS em função de V_D para três diferentes comprimentos de cavidade. Embora seja pequena, existe uma redução na corrente de escuro em fotodiodos com menores L_{CAV} , devido à diminuição da região de depleção. A RDD nestes dispositivos é formada na junção entre a cavidade N e o substrato P, por isso, quanto maior o comprimento da cavidade, maior será a RDD. Como o dispositivo não está iluminado, dá-se o nome de corrente de escuro (I_{DARK}). Alguns elétrons da faixa de valência são excitados termicamente, adquirindo energia suficiente para passar para a faixa de condução, deixando um número igual de estados desocupados, as lacunas, na faixa de valência.

Além disso, quanto mais negativa é a tensão V_D , maior será a corrente de escuro, pois maior será a região de depleção.

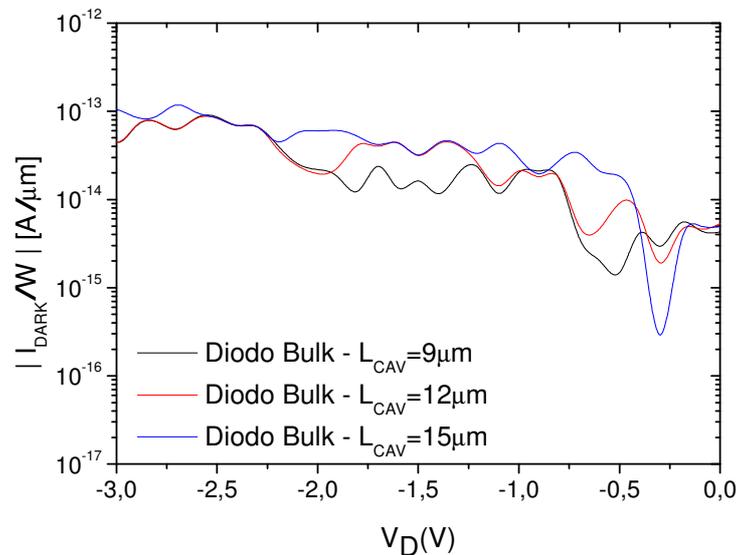


Figura 42 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para o diodo convencional CMOS com diferentes L_{CAV} . Fonte: Autor

A Figura 43 mostra a corrente de escuro em função de V_D para o fotodiodo PIN com tecnologia CMOS SOI descrita em [61] e também para o fotodiodo PIN CMOS BULK considerando os mesmos parâmetros de processo descritos em [60], apenas alterando a espessura das regiões P e N para 80nm, a fim de igualá-la a espessura do filme de silício da tecnologia SOI. Desta forma, a região de depleção lateral dos dois dispositivos tem o mesmo tamanho, conforme pode ser visto nas Figuras 36 e 37, já que, segundo as equações 34 e 35, a espessura da região de depleção depende da concentração de dopantes, da tensão reversa de polarização e do potencial interno, os quais são idênticos em ambos os dispositivos. Desta forma, é claramente notado o efeito do substrato de silício no dispositivo BULK, já que ele

apresenta maior corrente de escuro do que o fotodiodo SOI, devido à presença da região de depleção vertical, na qual, há o aumento da geração térmica de portadores, o que aumenta a corrente de escuro. Já no dispositivo SOI, não há formação da região de depleção vertical, devido à presença do óxido enterrado.

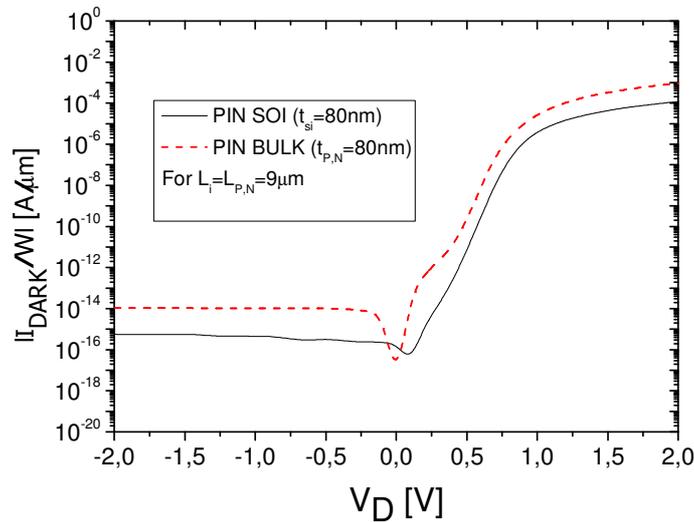


Figura 43 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para o diodo PIN em tecnologia SOI e BULK.
Fonte: Autor

A Figura 44 mostra a corrente fotogerada normalizada pelo seu valor com $L_{P,N}=4,5\mu\text{m}$ para os fotodiodos PIN CMOS BULK e SOI para diferentes comprimentos das regiões P+ e N+, mantendo-se o comprimento da região intrínseca fixo. Pode-se notar que em polarização reversa, no dispositivo BULK, há um aumento da fotocorrente, já que a região de depleção vertical é maior nos dispositivos com maior valor de $L_{P,N}$. Em contrapartida, nos dispositivos SOI, o aumento da fotocorrente é praticamente desprezível, pois não há região de depleção vertical e o tamanho da RDD lateral é igual para todos os valores de $L_{P,N}$.

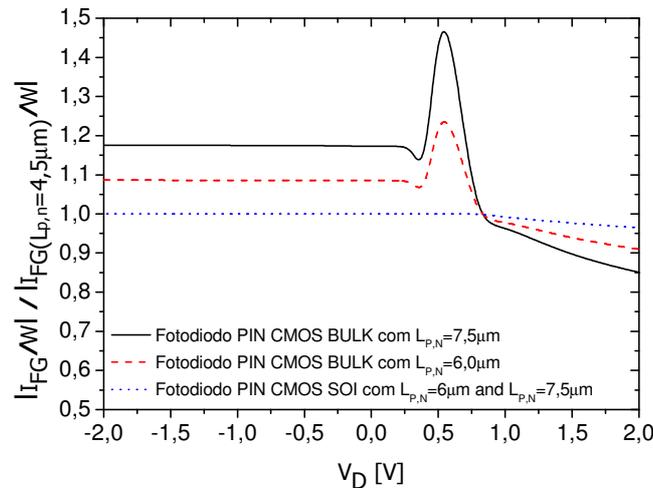


Figura 44 – Corrente Fotogerada normalizada pelo seu valor com $L_{P,N}$ de $4,5\mu\text{m}$ em função de V_D para $\lambda=470\text{nm}$ para o fotodiodo PIN em tecnologia SOI e BULK com $L_i=9\mu\text{m}$. Fonte: Autor

A utilização dos dispositivos PIN laterais permite a integração dos fotodetectores com o circuito CMOS, portanto é importante conhecer o comportamento destes dispositivos em tecnologias mais avançadas, que possuem a espessura das regiões P+, N+ menores (no caso BULK) ou a espessura do filme de silício menor (no caso SOI). Desta forma, foram feitas simulações para a tecnologia BULK com os valores de $L_{P,N}$ de 170nm (seguindo a tecnologia XO035 da XFAB descrita em [62]) e para $L_{P,N}=80\text{nm}$ (seguindo a tecnologia FC025 da XFAB descrita em [63]). Para os dispositivos SOI, foram feitas simulações para $t_{\text{SI}}=40\text{nm}$ (seguindo a tecnologia de 150nm da OKI Semicondutores descrita em [64]) e para $t_{\text{SI}}=15\text{nm}$ (seguindo a tecnologia de 65nm do IMEC descrita em [65]). Os comprimentos, a concentração de dopantes, e as espessuras dos óxidos foram mantidas iguais as da simulação inicial.

A Figura 45 apresenta a corrente fotogerada em função de V_D para diferentes tecnologias com radiação luminosa de 400nm de comprimento de onda. Os resultados simulados mostram que ao diminuir a espessura do filme de silício para a tecnologia CMOS SOI, a corrente fotogerada diminui, em consequência da redução da quantidade de fótons absorvidos, já que há diminuição da espessura da RDD lateral. Para os dispositivos da tecnologia CMOS BULK, ao diminuir a espessura das regiões P,N, diminui-se também a espessura da região de depleção lateral, tal como nos dispositivos SOI. Em contrapartida, a corrente fotogerada aumenta, pois a proximidade da RDD vertical em relação à superfície aumenta, portanto acrescentando consideravelmente a absorção de fótons que se contrapõe a diminuição da espessura da RDD vertical.

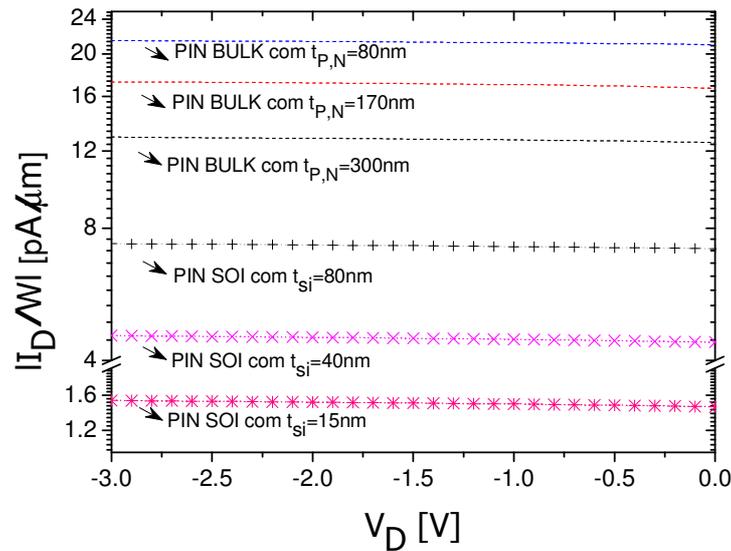


Figura 45 – Corrente fotogerada em função da tensão aplicada para fotodiodo PIN CMOS SOI e BULK com diferentes $t_{P,N}$ e t_{Si} para iluminação de $\lambda=400\text{nm}$. Fonte: Autor

8.1.3 Comparação entre responsividade dos fotodiodos

A responsividade de um fotodetector é definida como sendo a relação da corrente fotogerada (I_{FG}) e a potência óptica incidente (P_{IN}) [16], dada pela equação (47) já vista no item 4.2.

A Figura 46 mostra a responsividade dos fotodiodos em função do comprimento de onda da radiação incidente para a mesma potência óptica. Os resultados mostram que o fotodiodo PIN CMOS SOI teve a maior responsividade alcançada de $0,05 \text{ A/W}$ em $\lambda=400\text{nm}$, ou seja, na faixa do espectro eletromagnético na faixa do azul, tornando a sua seletividade muito boa para aplicações que utilizem este comprimento de onda. Mas, para comprimentos de onda maiores, como a profundidade de penetração da radiação é maior, a sua responsividade se torna mais distante dos demais dispositivos, exatamente pela presença do óxido enterrado, que não permite a difusão dos portadores gerados no substrato.

Entretanto, para o fotodiodo PIN CMOS BULK, os pares elétron-lacuna gerados no substrato podem se difundir para a região de depleção e então contribuir para a fotocorrente, aumentando a responsividade. Contudo, o mecanismo de difusão é lento [17], fazendo com que a velocidade de resposta deste dispositivo seja menor.

Para comprimentos de onda abaixo de 400nm , a responsividade dos três tipos de fotodetectores é muito próxima, porém ela se distancia bastante entre os dispositivos CMOS BULK e SOI à medida que o comprimento de onda aumenta.

Os fotodiodos convencional BULK e PIN BULK tiveram a maior responsividade em aproximadamente 470nm de comprimento de onda, chegando a 0,2A/W, pois este comprimento de onda tem a profundidade de penetração de aproximadamente 300nm [20], chegando até a região de depleção vertical, apresentando menor recombinação.

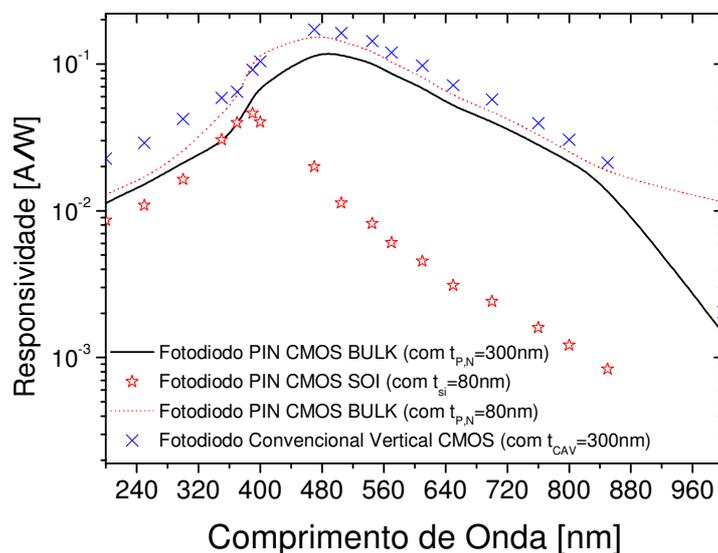


Figura 46 – Responsividade dos três dispositivos simulados em função do comprimento de onda para tensão de anodo de -0,5V. Fonte: Autor

8.1.4 Potência óptica variável

Como já foi mencionado no item 2.2, uma onda eletromagnética é composta pelo campo elétrico e magnético e a sua amplitude está ligada a magnitude do campo elétrico, que define a potência que está sendo transportada pela onda.

Conforme apresentado em [15], a comunicação óptica de dados é feita através de modulação de amplitude (que está relacionado à potência) utilizando um único comprimento de onda, por isso, foram feitas simulações variando a potência óptica incidente por unidade de área a fim de compreender o comportamento dos fotodiodos em função deste parâmetro. A potência óptica foi variada de $100\text{nW}/\text{cm}^2$, o que corresponde a intensidade luminosa de um céu de noite clara; a até $0,01\text{W}/\text{cm}^2$, o que corresponde a intensidade luminosa de um dia ensolarado de verão em local aberto. [66]

Como pode ser observado na Figura 47, a corrente total depende fortemente da potência óptica incidente variando de alguns fento amperes a 0,1nA. Ao aumentar a potência óptica incidente, a corrente também aumenta. Entretanto, os fotodiodos em tecnologia CMOS BULK apresentam maior corrente devido à presença da região de depleção vertical, onde os

portadores são acelerados pelo campo elétrico e então podem contribuir para a fotocorrente antes de se recombinar.

Os resultados apresentados também mostram que I_T não é tão dependente da potência óptica para P_{IN} abaixo de $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$, porque a corrente é praticamente toda fornecida pela corrente de escuro. Além disso, abaixo desta potência incidente, com a tensão de polarização reversa de -3V , a RDD é maior, aumentando a geração térmica de pares elétron-lacuna, o que faz a corrente de escuro aumentar também.

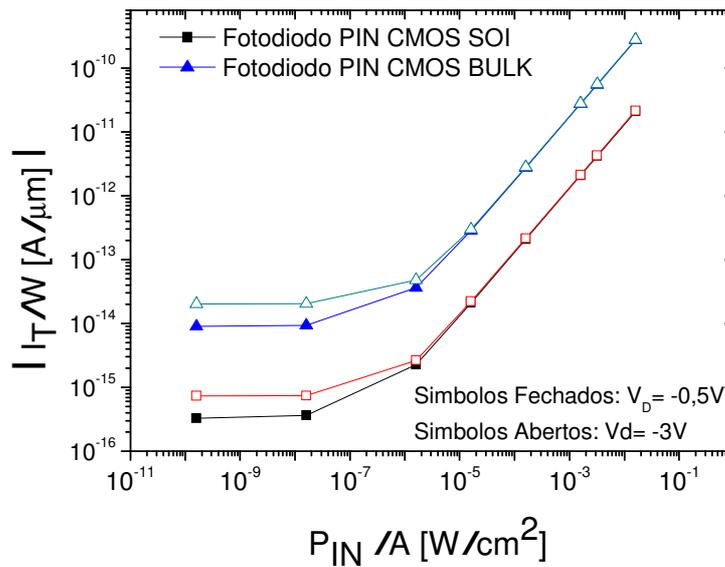


Figura 47 – Módulo da corrente total normalizada por W em função da intensidade óptica incidente por unidade de área para fotodiodos PIN CMOS SOI e BULK para $\lambda=400\text{nm}$, $t_{si}=t_{p,N}=80\text{nm}$. Fonte: Autor

Embora tenham uma corrente total menor que os fotodiodos PIN CMOS BULK, os fotodiodos PIN em tecnologia SOI, apresentam melhor resultado ao comparar-se a razão entre corrente total e a corrente de escuro.

Esta razão pode ser vista na Figura 48 em função da potência óptica incidente, além de demonstrar que para valores maiores de V_D , a razão I_T/I_{DARK} diminui.

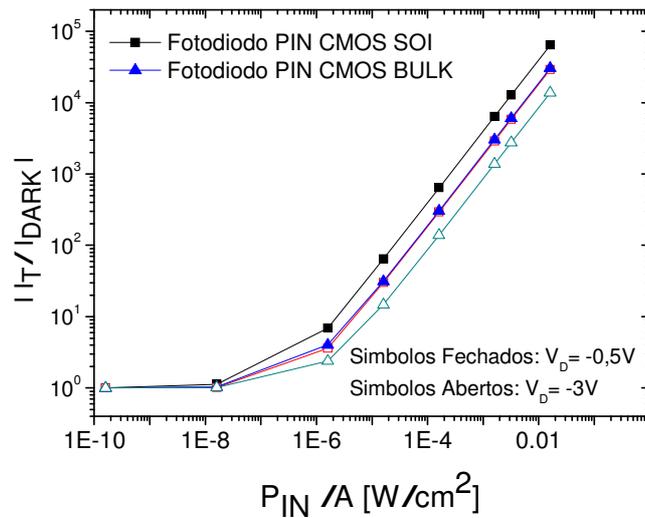


Figura 48 – Razão entre a corrente total e corrente de escuro em função da intensidade óptica incidente por unidade de área para fotodiodos PIN CMOS SOI e BULK para $\lambda=400\text{nm}$. Fonte: Autor

8.1.5 Variação da concentração de dopantes da região intrínseca (N_I)

Impurezas doadoras e aceitadoras são comumente introduzidas ao semiconductor para aumentar a concentração de elétrons ou de lacunas, os quais modificam as propriedades físicas dos semicondutores. Nos fotodiodos PIN, alterar a concentração de impurezas da camada intrínseca, que na verdade, é uma região P fracamente dopada, significa alterar a largura da região de depleção. Através da equação 59, obtida de [22], a largura da região de depleção total (d) é igual à largura da região de depleção do lado menos dopado, que no caso dos dispositivos simulados é o lado P (região intrínseca), dado por d_p .

$$d = d_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si}(V_{BI} - V_D)}{qN_I}} \quad (59)$$

Tabela 2 – Comprimentos da região de depleção em função de N_I

N_I (cm^{-3})	d (nm)
1×10^{15}	1350
1×10^{16}	440
1×10^{17}	140

Fonte: Autor

Na tabela 2 são mostrados os comprimentos da região de depleção lateral de acordo com a concentração de dopantes da região intrínseca (para o dispositivo cujas dopagens são: $N_A=1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ e $N_D=4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). É observável que, quanto maior a concentração N_I , menor será o comprimento da região de depleção lateral, portanto, a fotocorrente irá diminuir (conforme mostra a Figura 49). Obviamente, o fotodiodo BULK possui ainda a região de depleção vertical, por isso, sua fotocorrente apresenta valores maiores que o SOI.

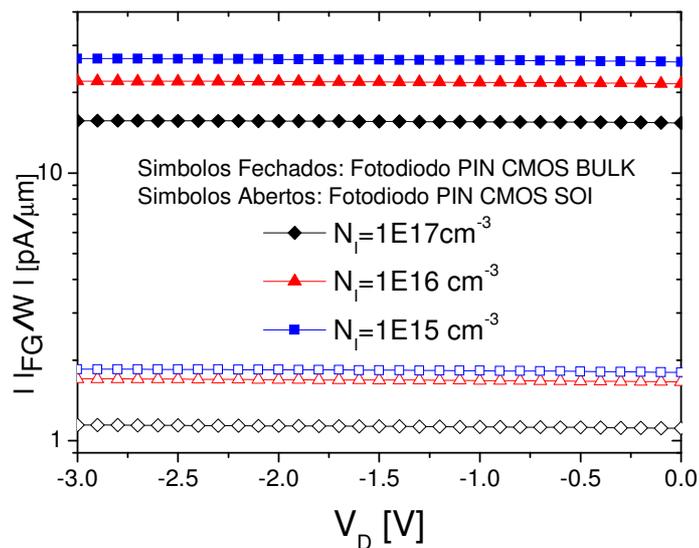


Figura 49 –Corrente fotocorrida em função de V_D para fotodiodos PIN CMOS SOI e BULK com $\lambda=400\text{nm}$ e diferentes valores de N_I . Fonte: Autor

8.1.6 Estruturas multi-camadas

Conforme foi visto no item 2.4, nos meios homogêneos a propagação da luz é retilínea e quando um raio atinge a interface que separa dois meios distintos, uma fração da potência do raio incidente (P_I) é refletida (P_R) como se pode verificar na Figura 6, há também uma parte da potência que é transmitida (P_T) e uma terceira fração que é absorvida (P_A).

A razão entre a potência refletida e a potência incidente é chamada de refletividade (R) e é dependente do comprimento de onda incidente, das espessuras dos meios e dos seus índices de refração [11].

A refletividade total do dispositivo é mostrada na Figura 50 para o fotodiodo PIN CMOS BULK em duas situações, considerando reflexão frontal e desconsiderando qualquer tipo de reflexão na área fotossensível. É importante salientar que nas áreas cobertas por metal (eletrodos), a reflexão pode ser considerada de 100%, pois o metal é um material opaco (não

permite a refração da luz) [1], portanto, a refletividade mostrada na Figura 50 é a total do dispositivo, considerando a área fotossensível e a área não-fotossensível (metal).

Pode-se notar que a refletividade aumenta nos casos onde a reflexão na primeira interface é considerada, por diminuir a fração da luz que é aproveitada no dispositivo.

Para comprimentos de onda abaixo de 500nm, a refletividade é bastante afetada pela reflexão interna, chegando a atingir praticamente 60%. Já para comprimentos de onda acima de 550nm, a refletividade praticamente se mantém constante e é basicamente afetada pela reflexão da área não fotossensível (metal).

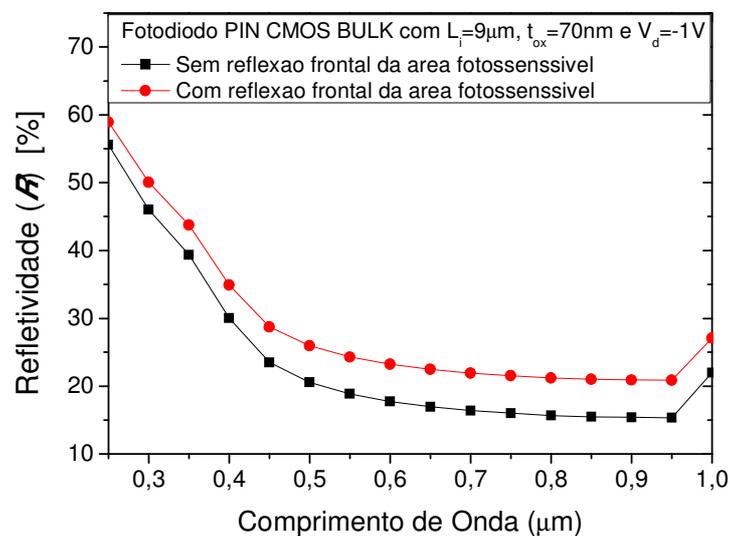


Figura 50 – Refletividade do fotodiodo PIN CMOS BULK em função de λ para diferentes reflexões. Fonte: Autor

Entretanto, o fenômeno da reflexão não ocorre somente na interface frontal, mas em cada interface que divide dois meios distintos, devido à diferença dos índices de refração, sendo uma parte transmitida e outra refletida. Este fenômeno conhecido como efeito de cavidade ressonante [15], permite que uma parte do raio luminoso incidente cruze várias vezes a mesma camada de material, permitindo maior absorção, conforme mostra a Figura esquemática 51 para uma estrutura SOI.

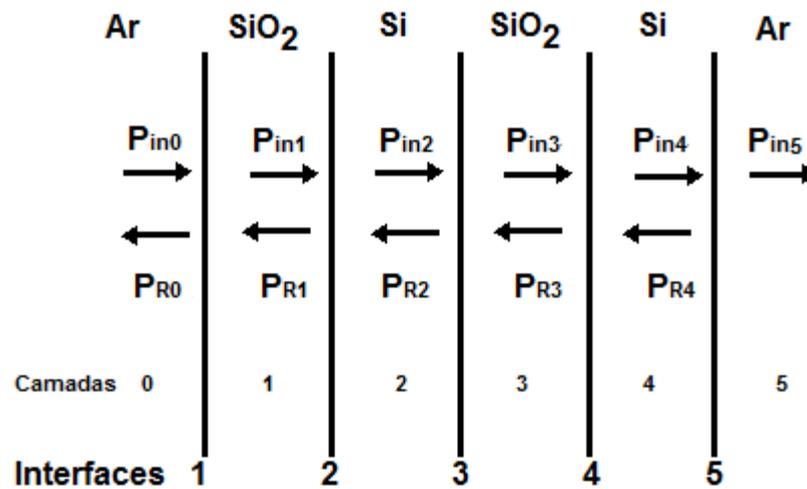


Figura 51 – Estrutura multi-camada de uma estrutura SOI. Fonte: Autor “adaptado de” [15]

A radiação luminosa refletida em uma interface pode ser absorvida no meio que já havia trafegado, por exemplo, a radiação luminosa que foi refletida pela interface 3 (P_{R2}) pode ser absorvida na camada de silício, diminuindo assim a refletividade total da estrutura, podendo aumentar portanto, a fração absorvida do dispositivo.

A potência absorvida em uma interface i pode ser calculada pela equação 60 segundo a ref. [15].

$$P_{Ai} = P_{Ti} - P_{T(i+1)} \quad (60)$$

A equação 60, portanto, indica que a potência absorvida por um meio é a diferença entre as potências transmitidas por este meio e o seguinte.

Tendo em vista o efeito de cavidade ressonante, pode-se observar que a menor refletividade e, portanto a maior absorção, é dada para o caso onde é considerado apenas as reflexões internas conforme mostra a Figura 52. Nesta Figura, foi simulado um fotodiodo CMOS SOI com diferentes considerações de reflexões.

Para comprimentos de onda menores que aproximadamente 390nm, apenas a reflexão frontal causa diferença na refletividade, visto que a radiação luminosa com até este comprimento de onda não alcança as demais interfaces e portanto, não sofre reflexões dentro do dispositivo. Obviamente, quando é considerada a reflexão frontal, o percentual de refletividade aumenta já que uma menor parte da potência óptica incidente é transmitida para as demais interfaces.

Já para λ maior que 390nm, a reflexão interna entre as interfaces produz diferenças na refletividade, sendo a maior refletividade obtida quando apenas há reflexão frontal, podendo chegar a mais de 50% para $\lambda=470\text{nm}$. E a menor refletividade é obtida quando apenas a reflexão interna é considerada, chegando a 35% para comprimentos de onda de 400nm.

Pode-se resumir que a reflexão frontal é prejudicial ao funcionamento do dispositivo, pois diminui a fração da potência incidente que pode ser aproveitada para a geração de portadores, entretanto, a reflexão entre as interfaces internas do fotodiodo é favorável ao aumento da fotocorrente, já que pode aumentar a fração da potência absorvida.

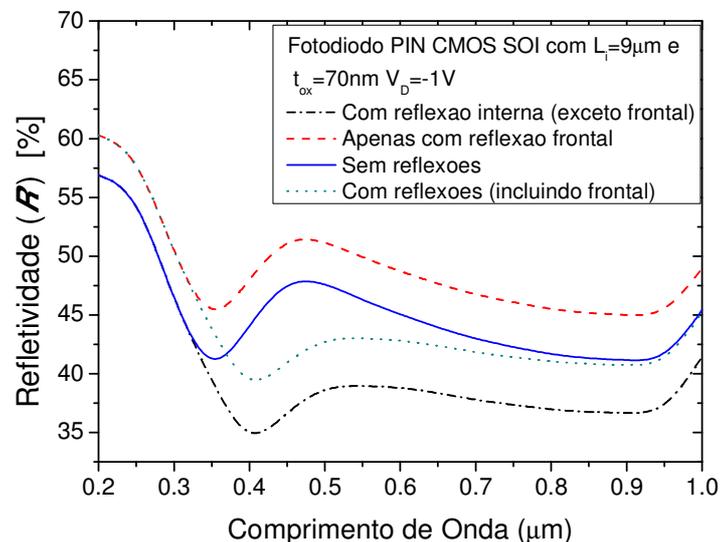


Figura 52 – Refletividade do fotodiodo PIN CMOS SOI em função de λ para diferentes reflexões. Fonte: Autor

8.1.7 Resposta em frequência

Até agora as simulações realizadas consideraram isolamento perfeita através do óxido enterrado nos dispositivos PIN CMOS SOI, ou seja, foi desconsiderada a influência das cargas geradas no substrato.

Entretanto, do ponto de vista AC, o BOX, age como um capacitor, portanto, para altas frequências de modulação da intensidade luminosa, as cargas geradas no substrato, podem ser espelhadas (através do óxido enterrado) para os eletrodos frontais [15] [67].

A fim de investigar este fenômeno, foram realizadas simulações considerando a estrutura completa dos dispositivos, inclusive um espesso substrato de 500μm de espessura. Também foram considerados duas concentrações de dopantes de substrato, as quais são usuais nos processos atuais de semicondutores, sendo o primeiro conhecido como altamente resistivo

(HR) com concentração de dopantes do substrato (N_{SUB}) de $2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ e; o segundo, conhecido como resistividade padrão (SR) com $N_{SUB} = 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$.

Foram consideradas três topologias de dispositivos, o fotodiodo PIN CMOS BULK, o fotodiodo PIN CMOS SOI com substrato e o fotodiodo PIN CMOS SOI ideal, ou seja, sem o substrato de silício. As simulações foram feitas considerando um onda senoidal com intensidade luminosa AC (P_{INAC}) de $0,1 \text{mW/cm}^2$, e a intensidade DC (P_{INDC}) de 1mW/cm^2 .

A Figura 53 mostra a amplitude da corrente de anodo em função da frequência de modulação da intensidade luminosa, para os três dispositivos já mencionados, ao serem iluminados por radiação luminosa de 800nm de comprimento de onda.

No caso do dispositivo CMOS BULK, para frequências acima de 100MHz, os fotoportadores gerados no substrato não conseguem seguir o sinal AC, fazendo com que haja uma diminuição da amplitude da corrente, pois os pares elétron-lacuna não tem tempo para responder a variação de P_{IN} . No caso dos dispositivos SOI, a amplitude da corrente começa a decair a partir 10GHz, ressaltando o que já havia sido mencionado sobre a maior velocidade de resposta dos dispositivos SOI, tendo em vista, a ausência do fenômeno de difusão dos portadores gerados no substrato.

Entretanto, quando o substrato de silício é considerado nos dispositivos SOI, é possível observar um aumento de corrente a partir de 10MHz, sendo que este efeito é causado pelo espelhamento das cargas fotogeradas no substrato através do BOX. Embora este aumento de corrente possa parecer positivo, é um mecanismo lento de corrente de difusão, o qual pode degradar o desempenho da velocidade de resposta do dispositivo [68].

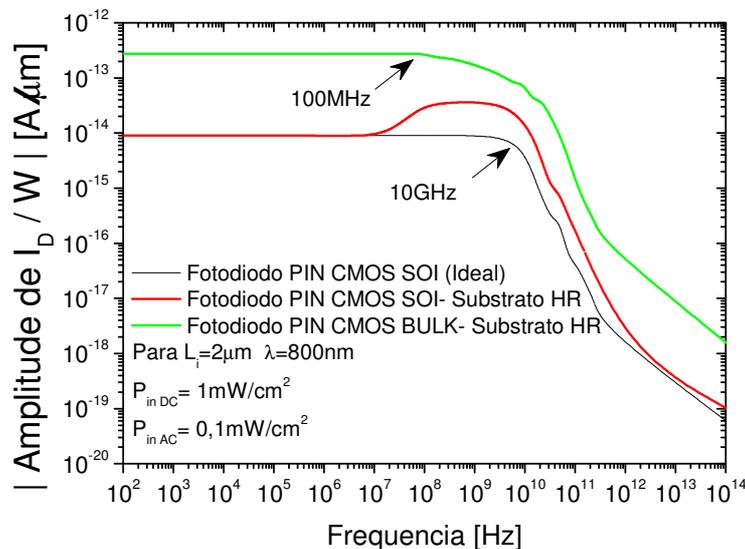


Figura 53 – Amplitude de I_D em função da frequência de modulação da intensidade luminosa para três diferentes dispositivos com $\lambda = 800 \text{nm}$. Fonte: Autor

A quantidade de fotoportadores gerados no substrato de um dispositivo SOI depende do comprimento de onda da radiação luminosa incidente. Para comprimentos de onda menores que 400nm, a maior parte da intensidade luminosa incidente é absorvida na camada de silício superior, portanto, a influência dos fotoportadores gerados no substrato pode ser desprezada, como mostra a Figura 54, onde a corrente para o fotodiodo PIN CMOS SOI com ou sem substrato são praticamente iguais.

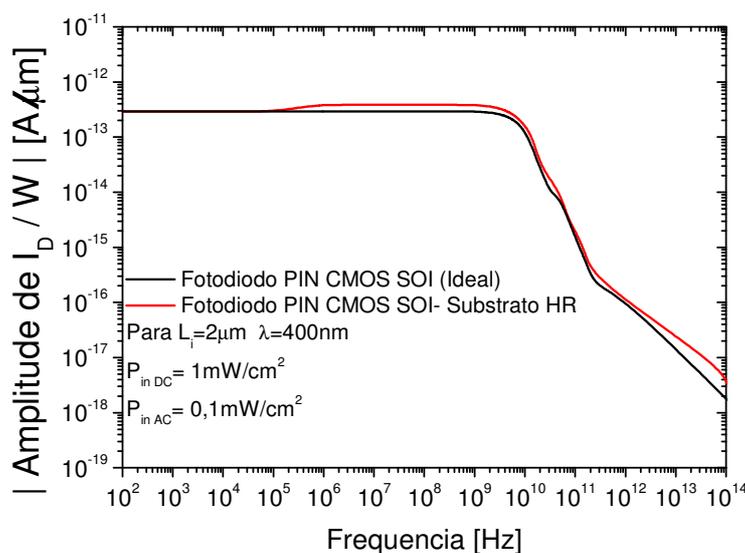


Figura 54 – Amplitude de I_D em função da frequência de modulação da intensidade luminosa para três diferentes dispositivos com $\lambda=400\text{nm}$. Fonte: Autor

A frequência na qual ocorre o aumento da corrente I_D pelo espelhamento das cargas geradas no substrato é influenciada pela concentração de dopantes do substrato, o que pode ser observado na Figura 55. Para o substrato HR, o pico de corrente é maior e acontece para frequência mais baixa de aproximadamente de 1MHz, enquanto que, para o substrato SR, este pico ocorre a uma frequência mais alta de aproximadamente 1GHz. Este fenômeno foi explicado por [15], como se as cargas geradas no substrato “vissem” dois caminhos para ir para a Terra: um através do eletrodo substrato e outro através do BOX. Se a impedância resistiva através do substrato é menor (caso SR), a frequência com que as cargas cruzarão o BOX será maior, pois até chegar nesta frequência, elas estarão sendo aniquiladas pelo eletrodo de substrato.

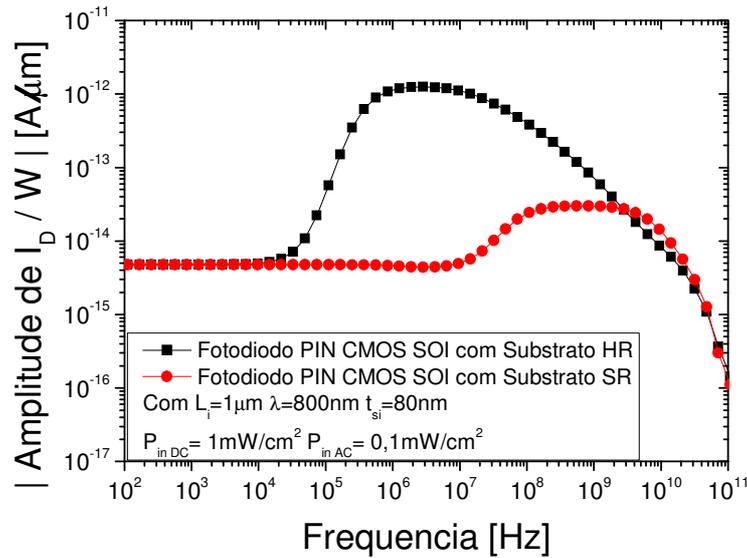


Figura 55 – Amplitude de I_D em função da frequência de modulação da intensidade luminosa para o fotodiodo PIN CMOS SOI com substrato HR e SR com $\lambda=800nm$. Fonte: Autor

8.1.8 Resposta transiente

A fim de investigar a resposta temporal dos fotodiodos, foram feitas simulações com uma fonte luminosa dependente do tempo, ou seja, a sua intensidade foi modulada de acordo com uma onda quadrada para simular uma sucessão de bits de dados ópticos (palavra digital). Esta palavra digital foi simulada da seguinte forma: 0101001100, onde no bit 0, a intensidade da fonte luminosa foi considerada $P_{IN0}=0mW/cm^2$ e no bit 1, a intensidade foi de $P_{IN1}=10mW/cm^2$ conforme pode ser visualizado na Figura 56.

A Figura 57 mostra a resposta temporal dos fotodiodos PIN CMOS BULK e SOI quando iluminados com radiação luminosa de 400nm de comprimento de onda. A corrente disponível mostrada nestes gráficos é a corrente máxima que pode ser fornecida pelo dispositivo considerando máxima eficiência quântica, ou seja, sem perdas por reflexão ou recombinação de portadores.

Pode-se observar que o dispositivo BULK leva mais tempo para atingir a sua corrente máxima (subida), e para atingir a sua corrente mínima (descida). Já o dispositivo SOI é mais rápido em termos de subida e descida, em face de ausência da difusão dos portadores fotogerados no substrato. Os tempos de subida e descida do fotodiodo PIN CMOS BULK foram de 47,4ps e 48,97ps respectivamente, enquanto que para o fotodiodo PIN CMOS SOI, os tempos foram de 42,5ps e 42,8ps.

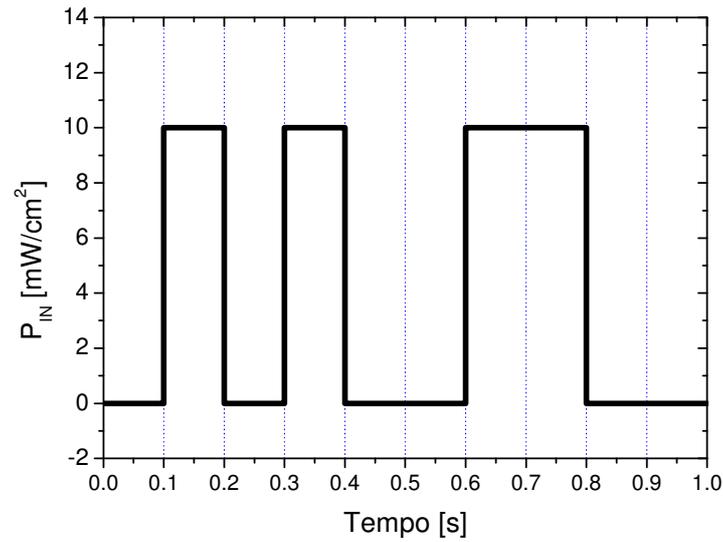


Figura 56 – Palavra digital simulada na resposta dos fotodiodos no domínio do tempo. Fonte: Autor

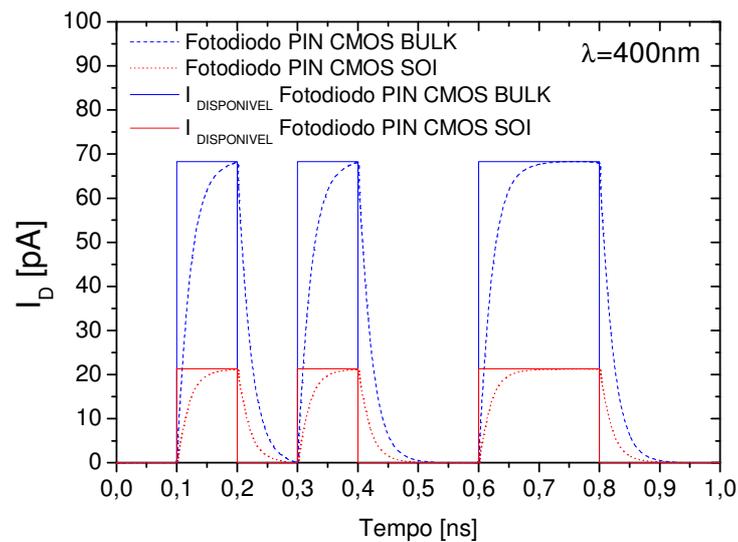


Figura 57 – Resposta temporal dos fotodiodos PIN CMOS BULK e CMOS SOI com $\lambda=400\text{nm}$. Fonte: Autor

Entretanto, quando o fotodiodo PIN CMOS SOI tem uma concentração de dopantes muito baixa no substrato (caso HR), o efeito capacitivo do BOX torna-se evidente, como pode ser visto na Figura 58, tornando o tempo de subida e descida muito mais altos, degradando o desempenho do dispositivo em termos de velocidade de resposta.

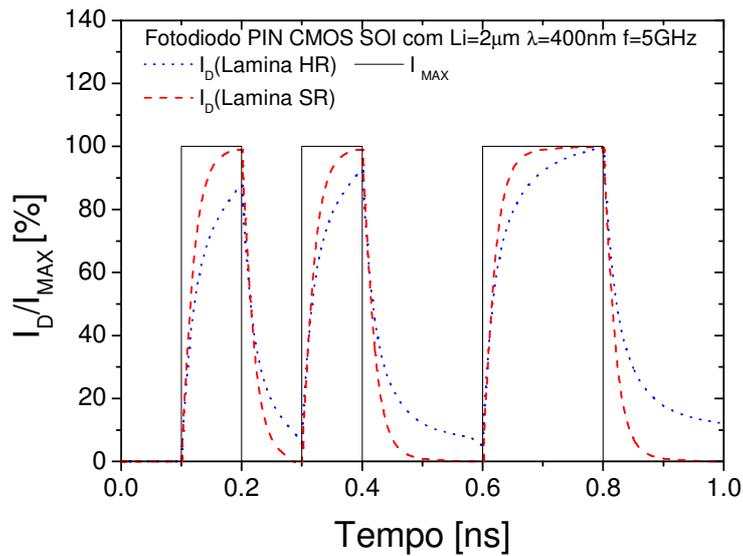


Figura 58 – Resposta temporal do fotodiodo PIN CMOS SOI com $\lambda=400\text{nm}$ para dois tipos de substrato. Fonte: Autor

Ao considerar o mesmo caso anterior, porém com o fotodiodo iluminado com $\lambda=800\text{nm}$, o efeito capacitivo do BOX se torna tão expressivo (Figura 59), que a lenta corrente de difusão do substrato é predominante em relação a corrente gerada na camada fina de silício, por isso, a distinção entre os bits 0 e 1 se torna impossível.

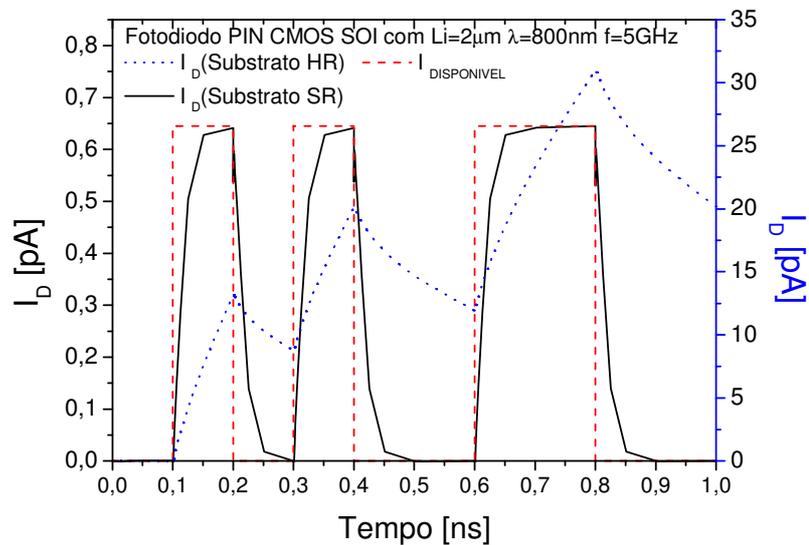


Figura 59 – Resposta temporal do fotodiodo PIN CMOS SOI com $\lambda=800\text{nm}$ para dois tipos de substrato. Fonte: Autor

8.2 Simulações de dispositivos multi-finger

Os dispositivos fotodetectores geralmente ocupam uma área na lâmina de silício bastante grande, por volta de $500\mu\text{m}^2$ ou até 1mm^2 , a fim de aumentar a área fotossensível e consequentemente, a absorção da luz incidente. Desta forma, os fotodiodos PIN são formatados com vários dedos, conforme a Figura 60, que mostra um fotodiodo PIN CMOS BULK cujo leiaute foi desenvolvido através do software da Mentor Graphics, IC Station [69], e que foi enviado através do projeto MOSIS [70] para fabricação na tecnologia IBM $0,25\mu\text{m}$ [71].

Este fotodiodo é composto de quatro dedos de material P+ e quatro dedos de material N+ intercalados entre si. Os níveis de metais se encarregam de fazer a ligação entre os dedos, sendo que a região intrínseca que se forma entre eles tem a concentração de dopantes da própria lâmina P (substrato).

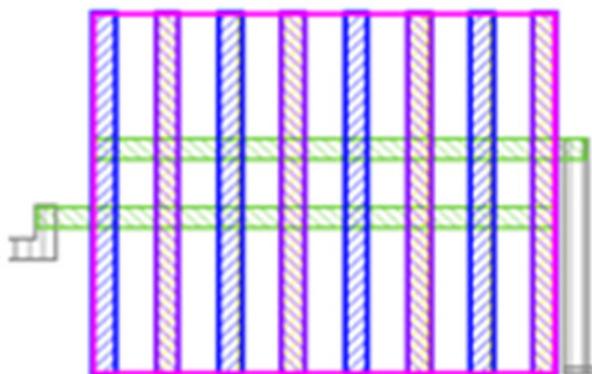


Figura 60 – Leiaute de um fotodiodo PIN CMOS com vários dedos. Fonte: Autor

A fim de prever o comportamento de tais dispositivos, foram simuladas estruturas multi-finger com diferentes configurações seguindo a tecnologia FC025 da XFAB para os fotodiodos CMOS BULK [63] e a tecnologia ST013 da ST Microeletrônica [72] para os fotodiodos SOI.

As Figuras 61 e 62 mostram, respectivamente, a estrutura multi-finger CMOS BULK e CMOS SOI utilizadas.

A Tabela 3 mostra as principais dimensões dos dispositivos simulados com a quantidade de dedos (m), a qual é proporcional à quantidade de regiões intrínsecas. O

comprimento total dos dispositivos (L_{TOTAL}) foi mantido praticamente constante, por isso, ao aumentar o comprimento da região intrínseca (L_I), a quantidade de dedos diminui.

Tabela 3 – Principais dimensões dos dispositivos Multi-Finger

m	L_I (μm)	$L_{P,N}$ (μm)	L_{TOTAL} (μm)	L_{FOTO}/L_{TOTAL} (%)
1	72,3	1,36	75,02	96,4
2	35,5	1,36	75,08	94,6
3	23,2	1,36	75,04	92,8
5	13,4	1,36	75,16	89,1
10	6	1,36	74,96	80,0
15	3,5	1,36	74,26	70,7
20	2,3	1,36	74,56	61,7
25	1,6	1,36	75,36	53,1
30	1,1	1,36	75,16	43,9
40	0,48	1,36	74,96	25,6

Fonte: Autor

A concentração de dopantes das regiões N^+ e P^+ foram consideradas $N_{N^+}=4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ e $N_{P^+}=1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$. Foram utilizadas duas concentrações de substrato (P^-), sendo a primeira (N_I) de $2 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ (a qual será chamada de HR) e; a segunda, $N_I=6 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ (a qual será chamada de SR).

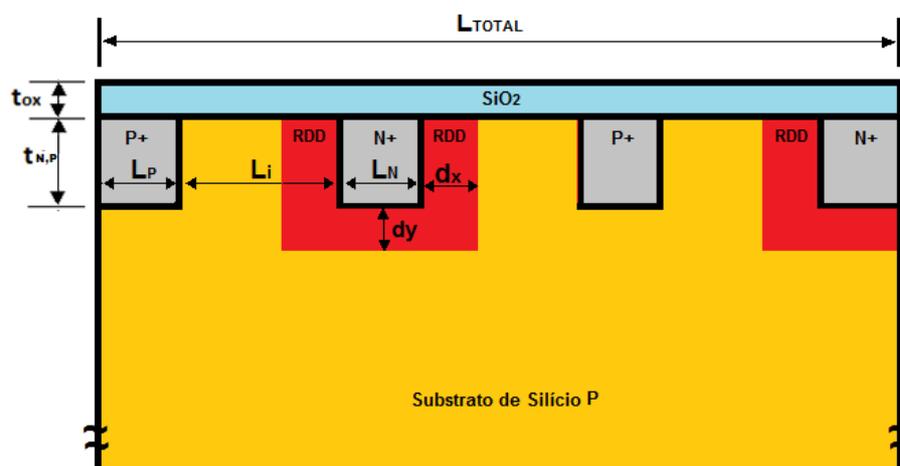


Figura 61 – Figura esquemática de um fotodiodo PIN CMOS BULK com 3 dedos. Fonte: Autor

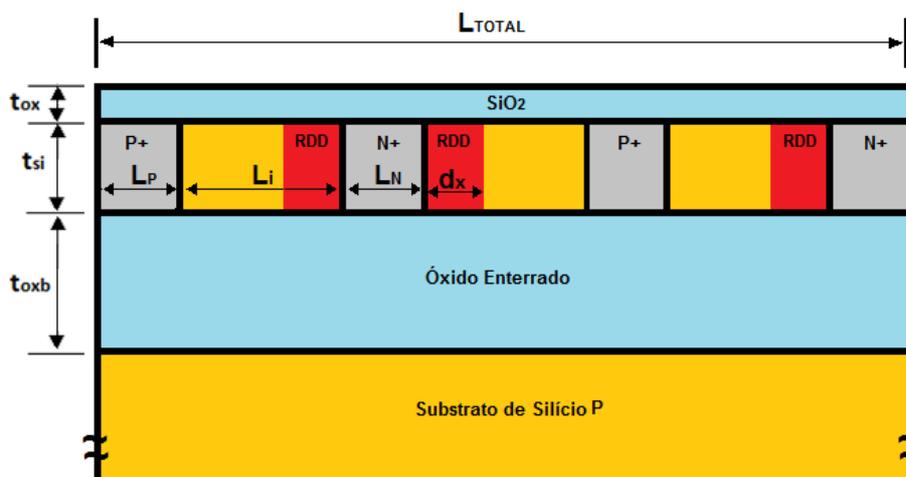


Figura 62 – Figura esquemática de um fotodiodo PIN CMOS SOI com 3 dedos. Fonte: Autor

8.2.1 Efeito da variação do comprimento da região intrínseca

A região de depleção de um dispositivo Multi-Finger 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 4 estão calculados os valores de dx para as duas concentrações de dopantes dos dispositivos utilizando as equações (34) e (35), considerando $V_D = -1.5V$.

Tabela 4 –Valores da RDD dos dispositivos Multi-Finger

$dx_{(HR)}$	38,3 μm
$dx_{(SR)}$	2,29 μm

Fonte: Autor

Com os valores de dx , pode-se verificar que, dependendo da quantidade de dedos do dispositivo e conseqüentemente, do comprimento L_I , a região intrínseca pode estar totalmente depletada ou não.

Este fato pode ser visualizado através da Figura 63, a qual mostra a eficiência quântica total para o fotodiodo CMOS SOI em função de L_I .

Conforme já foi comentado, a eficiência quântica total (EQ_T) é definida como sendo a razão entre a corrente de anodo realmente fotogerada (I_{FG}) e a máxima corrente que poderia ter sido gerada se todos os fótons tivessem sido convertidos em fotoportadores [17]. Por isso, quanto maior a corrente fotogerada, maior será a eficiência quântica total.

A maior eficiência quântica total foi obtida para o menor comprimento de onda devido à profundidade de penetração da radiação luminosa ser menor. Enquanto para $\lambda=800\text{nm}$, a eficiência quântica total não chega a 1%, tendo em vista que a maior parte dos fotoportadores gerados no substrato não tem chance de difundir para a RDD.

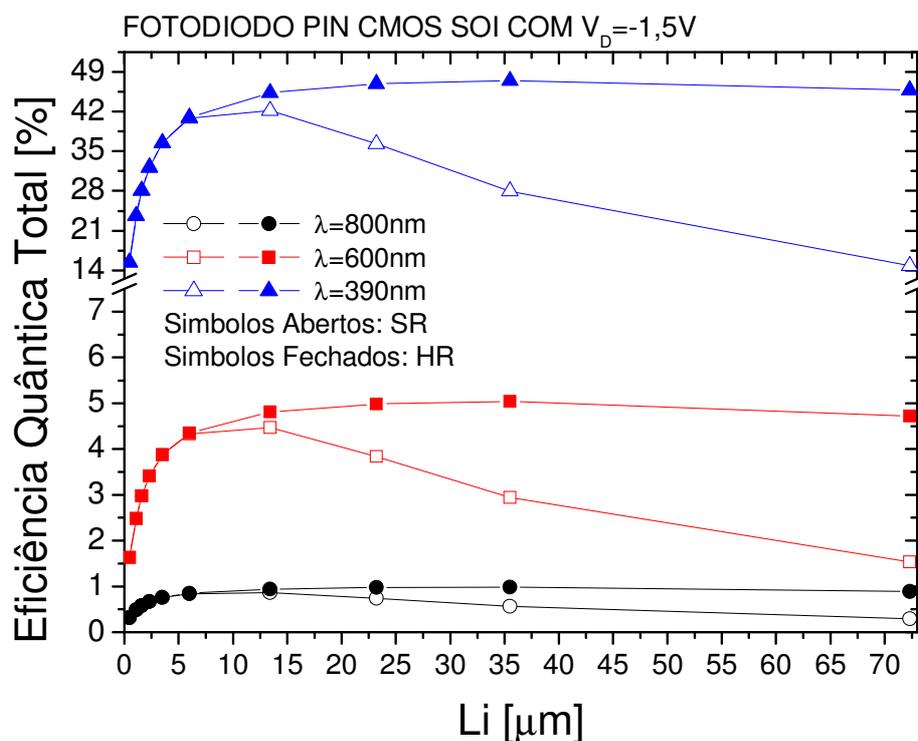


Figura 63 – Eficiência quântica total de um fotodiodo PIN CMOS SOI em função de L_I para três comprimentos de onda. Fonte: Autor

No caso dos fotodiodos HR, o único dispositivo cuja região intrínseca não é totalmente depletada é o dispositivo que apresenta um único dedo ($m=1$ ou $L_I=72,3\mu\text{m}$). Já no caso dos demais dispositivos (de $m=2$ a $m=40$), a região intrínseca está totalmente depletada.

Este fato pode ser observado através da Figura 63 para os dispositivos HR, pois a eficiência quântica total aumenta conforme o L_I aumenta. Isso se deve a dois fatores: o primeiro é que a região fotossensível ($L_{\text{FOTO}}/L_{\text{TOTAL}}$) aumenta conforme aumenta o L_I , o que pode ser visto na Tabela 3, por isso a quantidade absorvida de radiação é maior, conseqüentemente aumentando a fotocorrente. O segundo fator é relativo ao aumento do tamanho da região de depleção de todo o dispositivo, o qual pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 5 –Valores da RDD total dos dispositivos Multi-Finger

m	L_I (μm)	$dx_{\text{total(HR)}}$ (μm)	$dx_{\text{total(SR)}}$ (μm)
1	72,3	38,3	2,29
2	35,5	71	4,58
3	23,2	69,6	6,87
5	13,4	67	11,45
10	6	60	22,9
15	3,5	52,5	34,35
20	2,3	46	45,8
25	1,6	40	40
30	1,1	33	33
40	0,48	19,2	19,2

Fonte: Autor

Os símbolos $dx_{\text{total(HR)}}$ e $dx_{\text{total(SR)}}$ determinam o comprimento total da região de depleção. Por exemplo, para o fotodiodo HR com cinco dedos ($m=5$), há cinco regiões intrínsecas de comprimento $L_I=13,4\mu\text{m}$, sendo o valor obtido de região de depleção $dx_{\text{(HR)}}=38,3\mu\text{m}$. Como o valor de $dx_{\text{(HR)}}$ 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 cinco dedos, o comprimento total da região de depleção deste dispositivo será de cinco vezes o valor de L_I , portanto, $dx_{\text{total(HR)}}=67\mu\text{m}$.

Por isso, ao observar a Figura 63, pode-se notar que a eficiência quântica do dispositivo HR aumenta com o aumento de L_I , pois o valor de $dx_{\text{total(HR)}}$ aumenta, fazendo que uma maior quantidade de fotoportadores contribuam para a fotocorrente. Este fenômeno não é observado no dispositivo com um único dedo, onde a eficiência quântica é menor, pois há uma diminuição de $dx_{\text{total(HR)}}$, já que a região intrínseca não está totalmente depletada, fazendo com que este dispositivo sofra do fenômeno de recombinação e os pares elétron-lacuna gerados fora da região depletada e que se originaram a uma distância maior do que um comprimento de difusão (L_{dif}) não possam alcançar a RDD antes da recombinação.

Já para os fotodiodos SR, a região intrínseca estará totalmente depletada desde que L_I seja no máximo $2,29\mu\text{m}$ (que é o valor de $dx_{\text{(SR)}}$); ou seja, para fotodiodos com L_I de $0,48$ a $2,3\mu\text{m}$. Desta forma, como estão totalmente depletados, o valor de dx_{total} é igual tanto para os fotodiodos SR quanto para HR, e por isso, eles apresentam a mesma eficiência quântica total.

Porém os fotodiodos SR com L_I de $3,5$ e $6\mu\text{m}$ apresentam a mesma eficiência quântica total que os fotodiodos HR, mesmo tendo regiões de depleção total diferentes ($dx_{\text{total(HR)}} \neq dx_{\text{total(SR)}}$). Isso se deve ao fato de a região não depletada ($L_I-dx_{\text{(SR)}}$) destes dispositivos ser

pequena o bastante para que a recombinação seja desprezível, ou seja, toda a região intrínseca pode ser considerada depletada e portanto, estes dois dispositivos apresentam eficiência quântica idêntica aos HR's. Outra conclusão obtida é de que o comprimento da região não depletada seja menor que o comprimento de difusão dos portadores, por isso, eles não sofrem recombinação.

Quando o comprimento da região intrínseca dos fotodiodos SR se torna igual ou maior a $13,4\mu\text{m}$; a eficiência quântica cai devido ao fenômeno de recombinação que acontece fortemente na região não depletada. Portanto, através da Figura 63, o comprimento de difusão dos portadores minoritários para esta tecnologia (no caso elétrons) pode ser estimado, pois entre o intervalo de $L_I = 6$ a $13,4\mu\text{m}$, o fenômeno da recombinação começa a ser observado, por isso L_{dif} deve estar entre $3,71\mu\text{m}$ ($6-2,29$) e $11,11\mu\text{m}$ ($13,4-2,29$).

O comprimento de difusão dos elétrons também pode ser estimado através da Figura 64, a qual mostra a eficiência quântica interna dos fotodiodos PIN CMOS SOI para as duas concentrações de dopantes (HR e SR).

Conforme já foi visto no capítulo 4, a eficiência quântica interna é aquela que leva em consideração apenas as perdas por recombinação [26]. Fato este que é claramente notado na Figura 64 visto que a partir de $L_I = 6\mu\text{m}$, a EQ_I dos dois dispositivos passa a ser diferente, caindo para o SR, fazendo com que sua eficiência quântica interna se reduza a praticamente 50% do seu valor inicial (de 80 para 47%). Devido a este fato, é possível chegar à mesma conclusão sobre o comprimento de difusão dos elétrons.

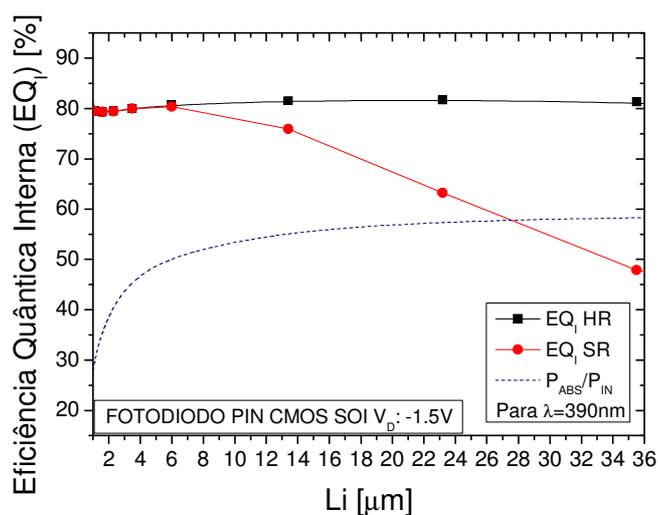


Figura 64 – Eficiência quântica interna e $P_{\text{ABS}}/P_{\text{IN}}$ de um fotodiodo PIN CMOS SOI em função de L_I . Fonte: Autor

Ainda na Figura 64 é possível observar a relação entre a potência luminosa absorvida pelo dispositivo em relação a incidente, que é igual para ambos os dispositivos. Esta relação segue a proporção da relação $L_{\text{FOTO}}/L_{\text{TOTAL}}$ contida na Tabela 3, ou seja, é maior para dispositivos com maiores comprimentos intrínsecos.

Nos dispositivos CMOS BULK, há a presença da RDD vertical, além da lateral, o que faz com que a quantidade de fotocorrente seja maior para comprimentos de onda maiores, como pode visto na Figura 65.

A radiação luminosa de ondas curtas (até 440nm) não atinge a RDD vertical e a maior parte dos portadores gerados por este comprimento de onda é absorvida pela RDD lateral, por isso, a quantidade de corrente gerada segue a proporção do tamanho da RDD lateral total ($dx_{\text{total (HR)}}$), que pode ser vista na Tabela 5. Além disso, como a profundidade de penetração para esta faixa de λ é muito curta, há uma alta influência da recombinação de superfície, o que faz com que os níveis de corrente sejam baixos.

A radiação luminosa na faixa de comprimento de onda de 440 a 920nm atinge a RDD vertical, cuja espessura, a qual foi chamado de dy tem o mesmo valor de dx , por isso $dy_{\text{(HR)}}=dx_{\text{(HR)}}$. Pode-se observar um aumento significativo da corrente fotogerada, devido ao maior aproveitamento dos fotoportadores presentes na RDD vertical. O pico máximo de corrente de 0,375nA é obtido para $\lambda=780\text{nm}$, para todos os dispositivos (independente de L_I), que é o ponto onde a radiação luminosa é absorvida próximo ao meio da RDD vertical.

Para comprimentos de onda maiores que 920nm há uma diminuição acentuada da corrente, pois a radiação luminosa ultrapassa a RDD vertical sem ser absorvida, devido ao seu alto índice de profundidade de penetração.

O comportamento da corrente total dos dispositivos CMOS BULK HR em relação a L_I é difícil de ser previsto, visto que há uma série de fatores que contribuem para sua geração e aproveitamento, por exemplo, o comprimento da RDD lateral, o comprimento e a espessura da RDD vertical, a recombinação lateral, a recombinação no substrato, a recombinação de superfície, além da profundidade de penetração da radiação luminosa. Mas pode-se verificar que o dispositivo com um dedo (M01), cuja região intrínseca tem 72,3 μm de comprimento, é o que apresenta a menor corrente, devido ao fato de sofrer a maior taxa de recombinação.

O mesmo comportamento do dispositivo com um único dedo pode ser observado na Figura 66, onde o fotodiodo CMOS BULK SR com $m=1$ também apresenta a menor corrente em todo o espectro luminoso.

Até 440nm de comprimento de onda, a radiação é absorvida pela RDD lateral, por isso, a corrente segue a proporção de $dx_{\text{total(SR)}}$. A profundidade da RDD vertical é igual a

$dx_{(SR)}$, portanto é menor que a profundidade obtida nos dispositivos HR, fazendo com que o nível de corrente seja mais baixo. Por exemplo, o nível máximo de corrente é de 325pA para $\lambda=740\text{nm}$. Isto se deve ao fato da menor profundidade da RDD vertical.

Outro fato importante de ser mencionado é que os dispositivos SR com L_I maiores, ou seja, de $m=1$ a $m=5$ sofrem alta taxa de recombinação por apresentarem RDD pequenas e por isso tem um nível de corrente muito baixo (o que pode ser visto na Figura 66).

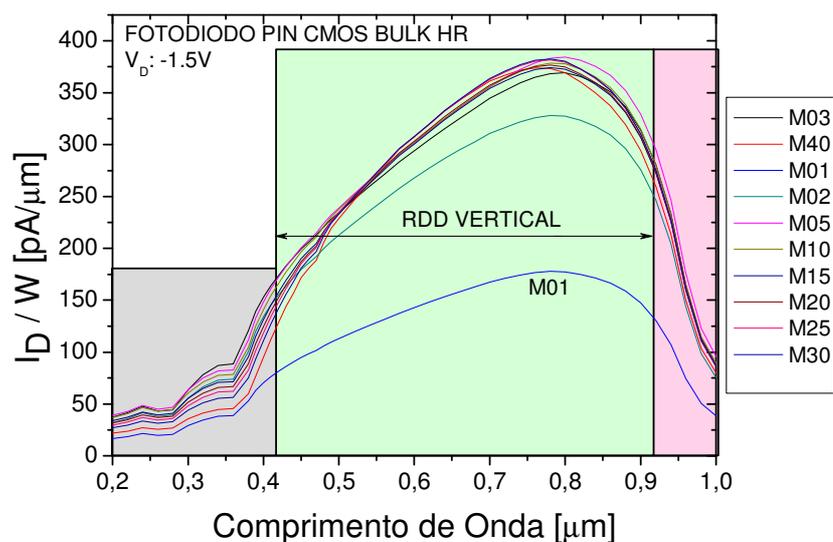


Figura 65 – Corrente total de um fotodiodo PIN CMOS BULK HR em função de λ . Fonte: Autor

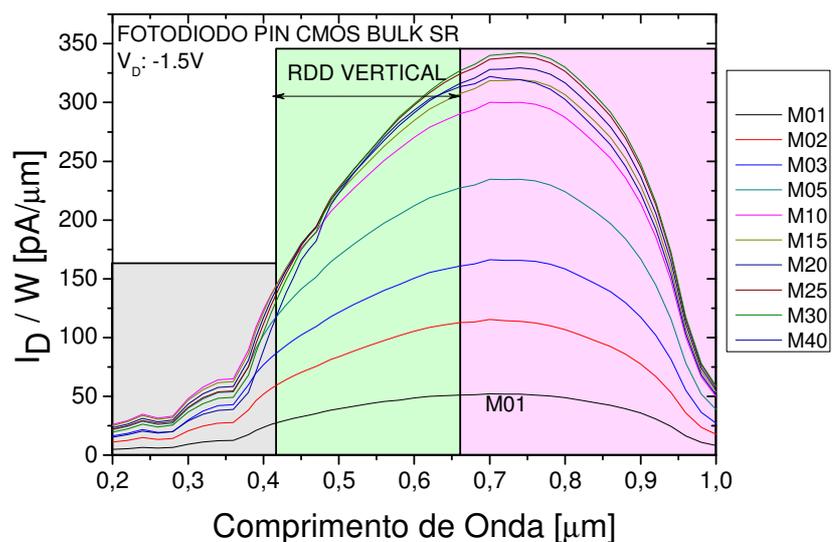


Figura 66 – Corrente total de um fotodiodo PIN CMOS BULK SR em função de λ . Fonte: Autor

Em qualquer estrutura com incidência de luz, há perdas por reflexão e transmissão, conforme foi visto no item 2.4. Nem toda a potência luminosa incidente (P_{IN}) é absorvida pelo dispositivo (P_{ABS}). Esta relação entre P_{ABS} e P_{IN} é dependente do comprimento de onda e da profundidade da RDD e é chamada de máxima eficiência alcançável, η .

Na Figura 67 pode-se observar que a relação entre a área fotossensível e a área total do dispositivo é diretamente proporcional ao comprimento da região intrínseca. Além disso, a máxima eficiência quântica segue a proporção da área fotossensível, ou seja, quanto maior é o percentual da área fotossensível do dispositivo, maior será a fração da potência absorvida.

Entretanto, a quantidade de radiação absorvida depende do comprimento de onda e da topologia do fotodiodo (BULK ou SOI). Para $\lambda=390\text{nm}$, a fração da potência absorvida pelo dispositivo SOI é muito próxima a do BULK, pois a radiação é absorvida muito próxima a superfície, o que diminui acentuadamente a influência do substrato do dispositivo BULK. Já para comprimentos de onda maiores (600 e 800nm), a influência do substrato e consequentemente da RDD vertical pode ser claramente observada, já que η se torna muito diferente ao comparar SOI com BULK.

Nos fotodiodos CMOS BULK, a maior fração da potência absorvida é apresentada ao iluminar-se o dispositivo com 800nm de comprimento de onda, chegando a atingir quase 80% de η para $L_I=72,3\mu\text{m}$. Já nos fotodiodos SOI, a maior eficiência é apresentada para $\lambda=390\text{nm}$, chegando a quase 60% para L_I de $72,3\mu\text{m}$; pois os portadores gerados no substrato para maiores comprimentos de onda são isolados pelo BOX.

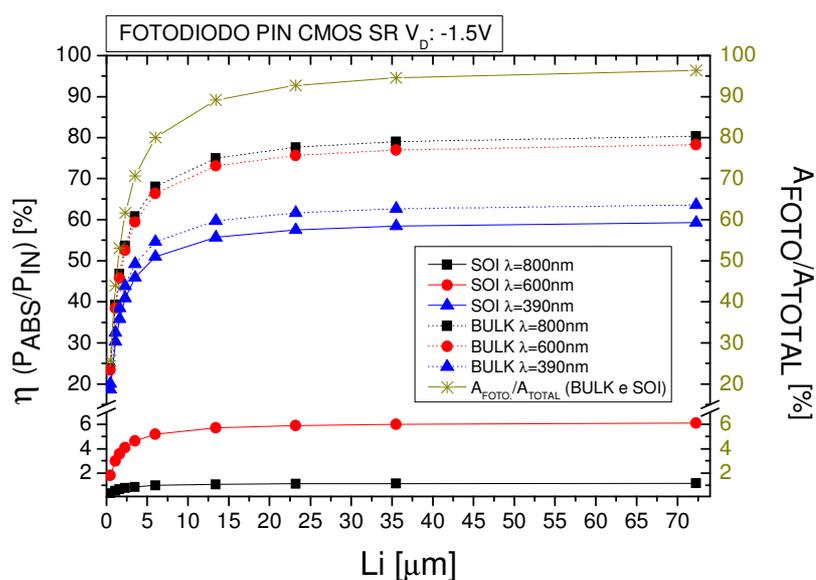


Figura 67 – Eficiência máxima (η) e A_{FOTO}/A_{TOTAL} para os fotodiodos PIN CMOS BULK e SOI SR. Fonte: Autor

A razão entre a potência absorvida e a potência incidente pode ser aumentada utilizando uma cobertura anti-reflexiva com materiais como por exemplo o nitreto que tem um índice de refração superior ao do dióxido de silício [15], fazendo com que a fração da potência óptica refletida seja diminuída.

A fim de verificar a influência das regiões altamente dopadas P+ e N+, foram simulados fotodiodos tanto em BULK quanto em SOI com o comprimento da região intrínseca de $2,3\mu\text{m}$, porém alterando o comprimento das regiões altamente dopadas de $L_{P,N}=1,36\mu\text{m}$ para $0,34\mu\text{m}$. Como o comprimento total dos dispositivos foi mantido constante, o número de dedos passou de 20 para 28.

A Figura 68 mostra que a eficiência quântica total do fotodiodo com 28 dedos é maior que a eficiência para o dispositivo com 20 dedos. Isso se deve ao fato de eles terem diferentes valores de dx_{total} , sendo que, como tem maior número de dedos, o dispositivo com $m=28$ terá maior dx_{total} , por isso apresentará maior fotocorrente e, portanto, maior eficiência quântica (sendo $dx_{\text{total}}(m=28)=64,4\mu\text{m}$ e $dx_{\text{total}}(m=20)=46\mu\text{m}$).

Além disso, a mudança da concentração de dopantes da região intrínseca não causa efeito na eficiência quântica pelo fato de tanto os dispositivos HR, quanto os SR apresentarem a região intrínseca totalmente depletada.

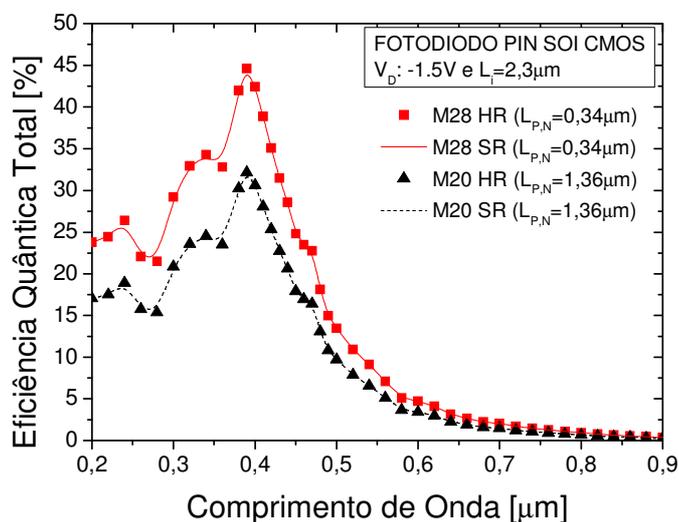


Figura 68 – EQ_T em função de λ para o fotodiodo PIN CMOS SOI com diferentes $L_{P,N}$. Fonte: Autor

Ao efetuarmos a mesma comparação anterior, mas agora para os fotodiodos CMOS BULK, obtém-se a Figura 69.

Pode-se observar que o comportamento dos dispositivos é alterado para comprimentos de onda maiores que 470nm , pois é o ponto onde a radiação luminosa atinge RDD vertical.

Para λ menor que 470nm, o fotodiodo BULK com 28 dedos apresenta maior eficiência quântica, assim como foi apresentado pelo fotodiodo SOI (pois tem maior dx_{total}).

Já para λ maior que 470nm, a RDD vertical é atingida e a maior eficiência quântica é apresentada pelos fotodiodos com 20 dedos, pois eles têm maior comprimento de região N+, fazendo com que o comprimento da RDD vertical (dy) seja maior.

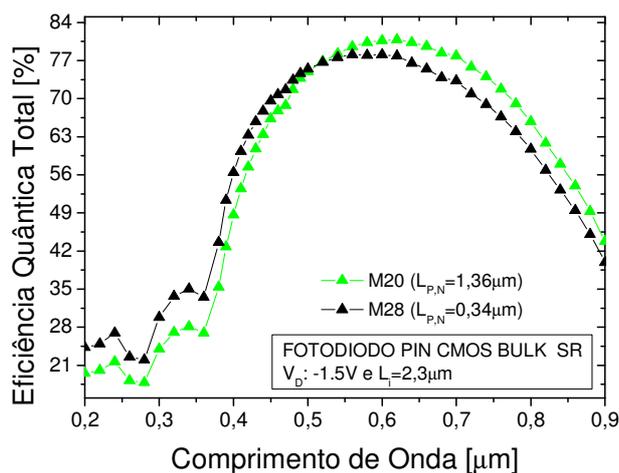


Figura 69 – EQ_T em função de λ para o fotodiodo PIN CMOS BULK SR com diferentes $L_{P,N}$. Fonte: Autor

A Figura 70 mostra a corrente de escuro dos dispositivos CMOS SOI, que é a corrente de fuga quando o dispositivo está reversamente polarizado, mas não está exposto à luz. Conforme já foi dito, a corrente de escuro é devido à geração térmica de pares elétron-lacuna dentro da região de depleção, pois acima de $T=0K$, os elétrons podem adquirir energia suficiente para “saltar” para a banda de condução devido as vibrações da rede cristalina.

Como a corrente de escuro é proporcional a região de depleção, pois a contribuição das regiões fora da RDD é de fato várias ordens de magnitude menor [15], portanto I_{DARK} será proporcional ao comprimento total da região de depleção (dx_{total}). Os valores de dx_{total} foram apresentados na Tabela 5. Para os fotodiodos HR, o maior dx_{total} é apresentado quando o L_I é de $35,5\mu\text{m}$, sendo a maior sua corrente de escuro da Figura 70 (para $V_D=-1,5V$). No caso SR, o maior dx_{total} é apresentado quando o L_I é de $2,3\mu\text{m}$, portanto a maior corrente de escuro é obtida com este valor de L_I .

Pode-se observar também que a corrente de escuro aumenta conforme a tensão de polarização se torna mais reversa, fazendo com que a RDD seja maior.

Os fotodiodos SR e HR com comprimentos de região intrínseca menores ou iguais a $2,3\mu\text{m}$ apresentam a mesma corrente de escuro, já que estão totalmente depletados e, portanto, o comprimento das suas regiões de depleção são iguais.

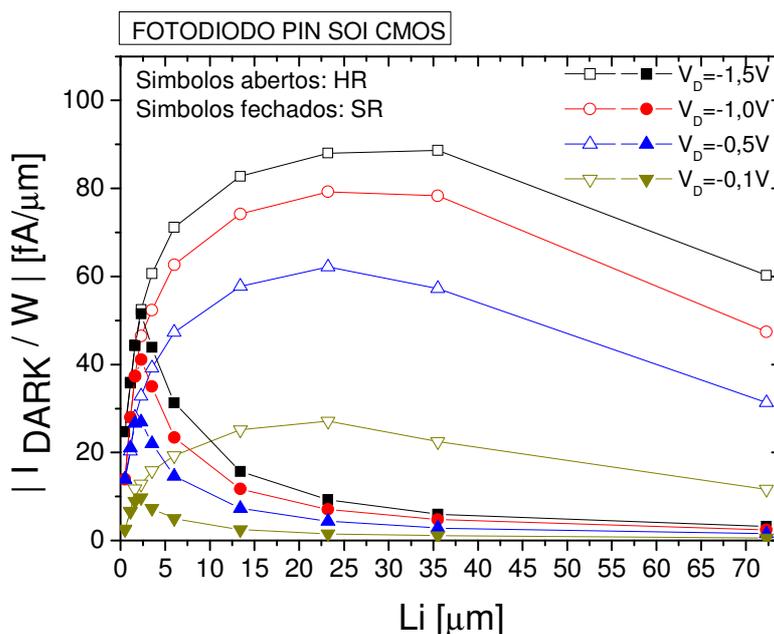


Figura 70 – Corrente de escuro em função de L_i para os fotodiodos PIN CMOS SOI. Fonte: Autor

A Figura 71 mostra a corrente de escuro para os fotodiodos PIN CMOS BULK em função de L_i .

Pode-se observar que a corrente de escuro dos dispositivos SR é menor que aquela apresentada pelos HR, já que a sua região de depleção é menor.

Uma importante observação é que, enquanto a corrente de escuro dos dispositivos CMOS SOI tem em média algumas dezenas de fento amperes por μm , os fotodiodos BULK apresentam alguns pico amperes por μm .

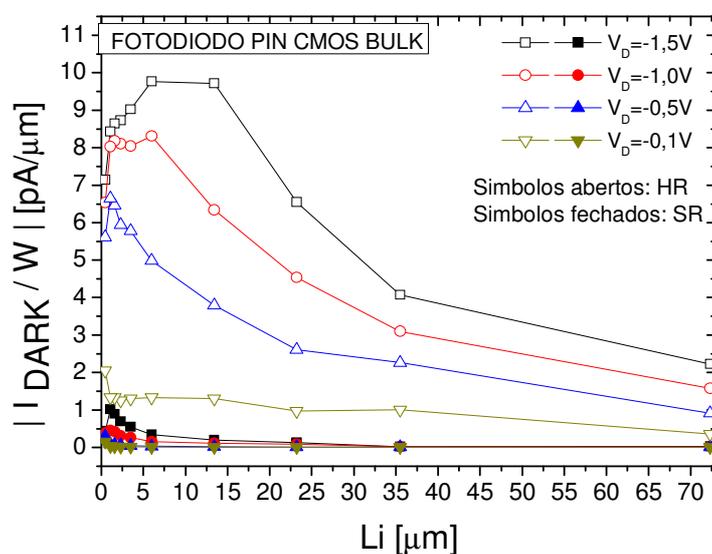


Figura 71 – Corrente de escuro em função de L_i para os fotodiodos PIN CMOS BULK. Fonte: Autor

Como a corrente de escuro é diretamente proporcional ao tamanho da região de depleção, é difícil prever o seu comportamento nos dispositivos BULK em função de L_D , já que podem ser consideradas duas parcelas de RDD: a lateral e a vertical, sendo que esta última é muito influenciada pela quantidade de dedos do dispositivo, como pode ser observado nas Figuras 72 e 73.

A Figura 72 mostra a taxa de recombinação do fotodiodo PIN CMOS BULK com 5 dedos e o contorno da sua região de depleção. Pode-se observar que a região com menor taxa de recombinação fica dentro da RDD (região azul); e que o tamanho da RDD é altamente influenciado pela quantidade de dedos e principalmente pela região P+. Esta mesma observação pode ser feita na Figura 73, que mostra a taxa de recombinação do fotodiodo PIN CMOS BULK com 20 dedos, mostrando uma região de depleção com menor influência da região P+.

Desta forma, a predição do tamanho da RDD se torna inviável, visto que não é uma região uniforme, e sim, uma região sem formato definido.

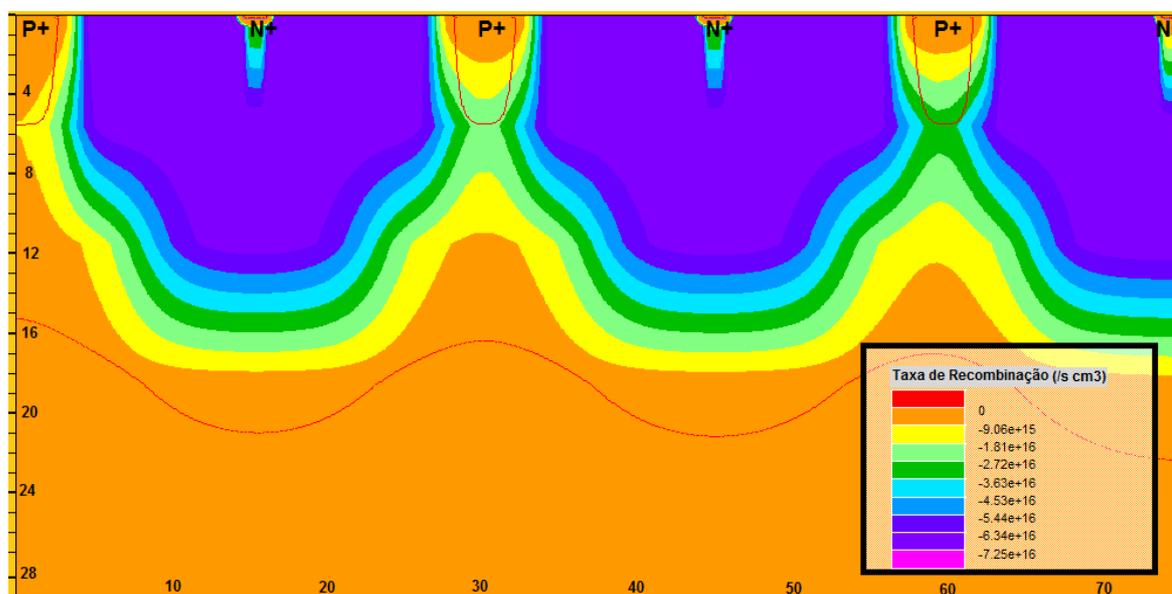


Figura 72 – Corte Lateral do Fotodiodo PIN CMOS BULK com 5 dedos. Fonte: Autor

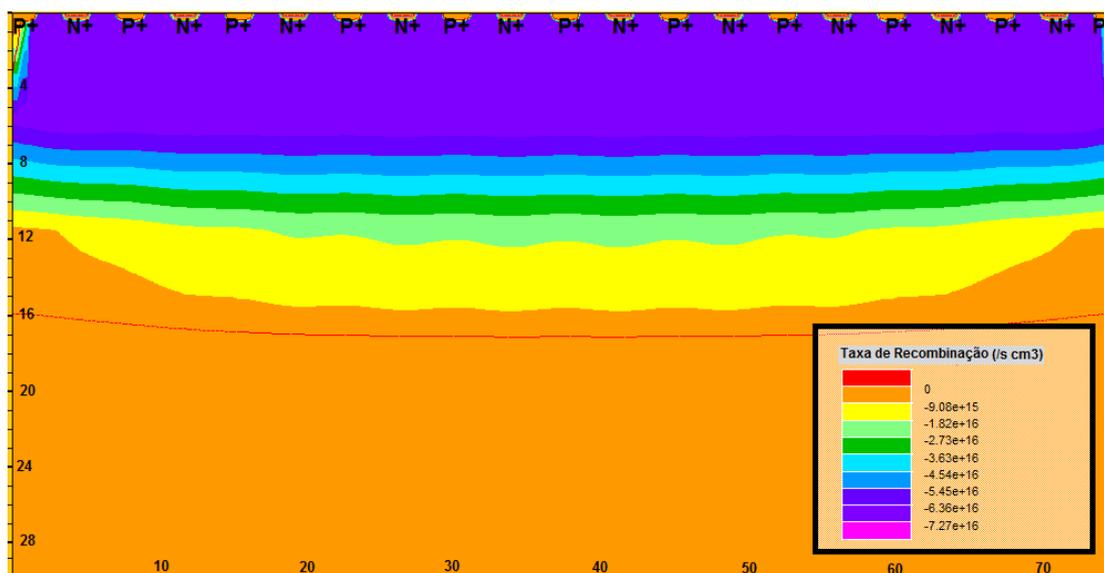


Figura 73 – Corte Lateral do Fotodiodo PIN CMOS BULK com 20 dedos. Fonte: Autor

A relação sinal ruído (SNR) foi definida no item 4.3 como sendo a relação entre a corrente fotogerada e a corrente de escuro. A Figura 74 mostra a SNR em função de L_I para os fotodiodos PIN CMOS BULK e SOI com iluminação de diferentes comprimentos de onda.

Embora a eficiência máxima alcançável (η) seja menor nos dispositivos SOI, a relação sinal ruído apresentada por esta tecnologia para comprimento de onda de 390nm é a mais alta, chegando a atingir uma relação de mais de 11000 vezes para L_I de 35,5 μ m, o que significa que a corrente fotogerada é 11000 vezes maior que a corrente de escuro, fazendo com que este dispositivo seja altamente sensível a este comprimento de onda.

A relação sinal ruído é maior para L_I maiores independentemente da tecnologia (SOI ou BULK). Isto deve ao fato de que dispositivos com L_I maiores geram maiores fotocorrentes, conforme já foi visto nas figuras anteriores.

No caso dos dispositivos BULK, a maior SNR é obtida para comprimentos de onda de 600 ou 800nm (são muito parecidas).

O dispositivo com L_I de 72,3 μ m tem sua SNR menor, pois os seus portadores sofrem uma alta recombinação, já que grande parte do dispositivo não está depletado.

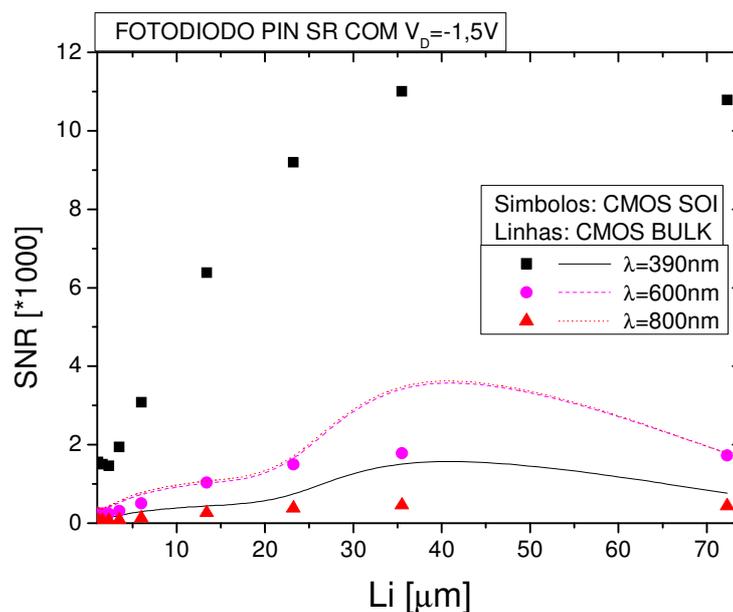


Figura 74 – SNR em função de L_1 para os fotodiodos PIN CMOS BULK e SOI SR. Fonte: Autor

8.2.2 Efeitos da variação da polarização do substrato

A fim de investigar a influência da polarização da porta traseira (Back-gate), V_{BG} , no funcionamento dos fotodiodos, foram feitas simulações com um eletrodo de porta traseira.

No caso da estrutura SOI, a estrutura formada pelo filme de silício/BOX/Substrato de silício forma uma estrutura MOS ao contrário, sendo que ao alterar a tensão na porta traseira, o modo de operação do dispositivo irá ser alterado (acumulação, inversão ou depleção).

A Figura 75 mostra a corrente do fotodiodo PIN CMOS SOI ao variar a tensão de polarização da porta traseira. Para V_{BG} menor ou igual à aproximadamente $-2V$, o filme de silício estará em regime de acumulação, conforme pode ser visto no corte no sentido da profundidade do silício mostrado na Figura 76, onde a concentração de lacunas para $V_{BG}=-5V$ é superior à concentração inicial ($N_1=6 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$) em todo o filme de silício, deixando claro o processo de acumulação.

Desta forma, a junção entre a região N^+ e a região intrínseca estará reversamente polarizada e os elétrons serão os portadores minoritários responsáveis pela corrente de deriva do dispositivo.

Ao aumentar a tensão de porta traseira (de $-2V$ a $1,5V$), o filme de silício será verticalmente depletado, fazendo com que o aproveitamento dos fotoportadores seja máximo, aumentando abruptamente a corrente total do dispositivo, que chega a $40 \text{pA}/\mu\text{m}$.

Para $V_{BG} > 1,5V$, o filme é polarizado no modo inversão e a concentração de elétrons supera a concentração de lacunas (conforme pode ser visto na Figura 76 para $V_{BG} = 5V$). Desta forma, o filme de silício passa a se comportar efetivamente como se tivesse um perfil de dopantes de P+N-N+ [15]. Portanto, a junção reversamente polarizada é formada pela região P+ e pela região intrínseca, sendo que o portador minoritário passa a ser a lacuna.

Por isso, a corrente fotogerada em inversão é menor que em acumulação (Figura 75), pois os portadores minoritários (responsáveis pela deriva) em inversão são as lacunas, que tem menor mobilidade [17].

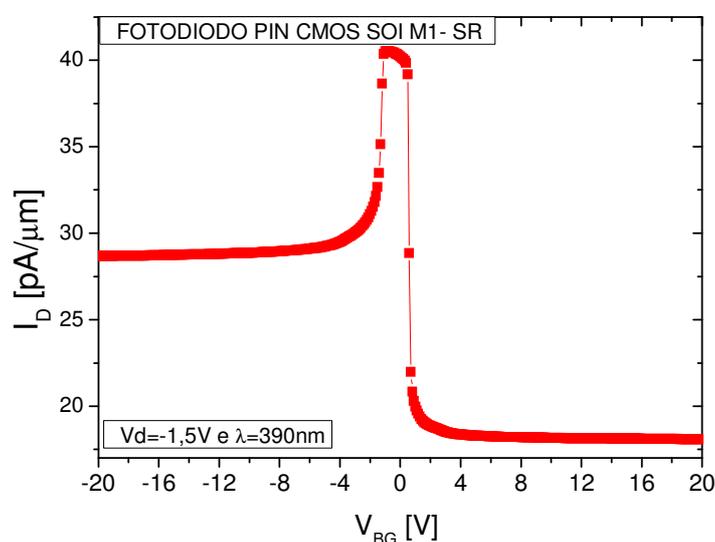


Figura 75 – I_D em função de V_{BG} para o fotodiodo PIN CMOS SOI SR. Fonte: Autor

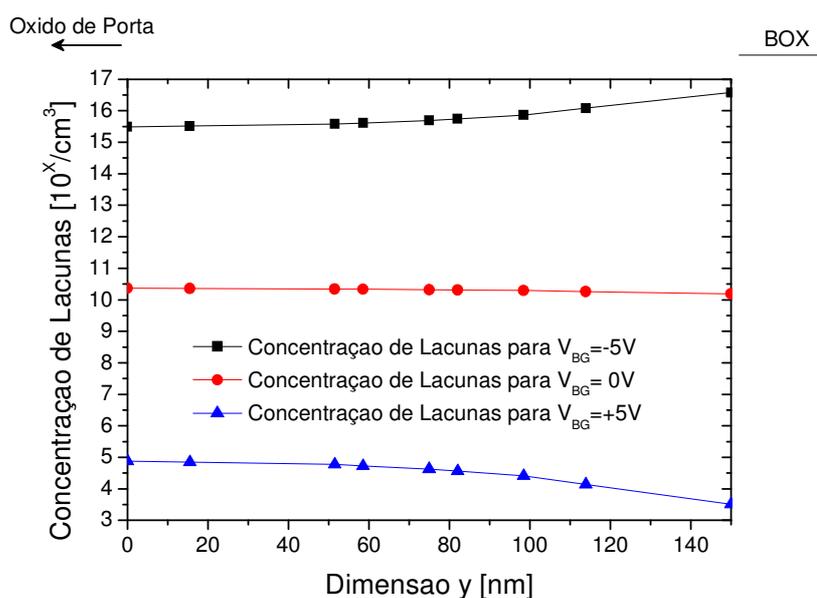


Figura 76 – Concentração de lacunas em função da profundidade do filme de silício para o fotodiodo PIN CMOS SOI SR. Fonte: Autor

No caso dos fotodiodos PIN CMOS BULK, a polarização do eletrodo de porta faz com que haja uma variação de potencial no substrato de silício. A variação deste potencial pode fazer com que a junção P- / N+ se torne diretamente polarizada, subitamente aumentando a corrente, como pode ser visto na Figura 77.

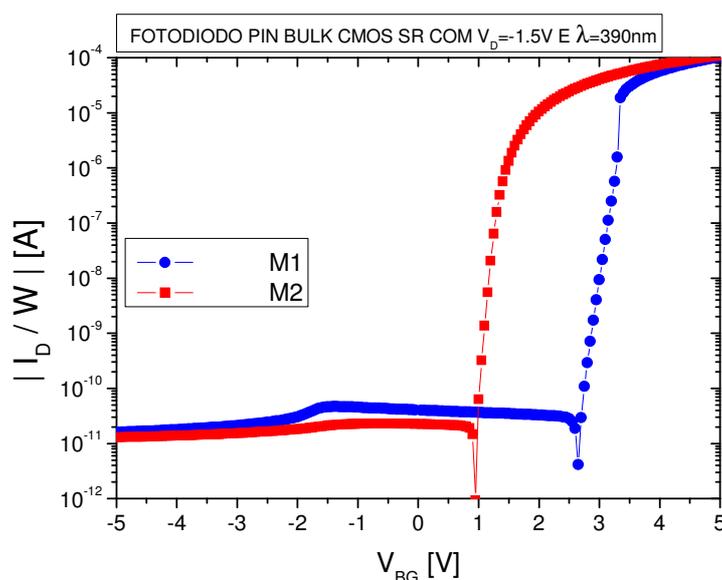


Figura 77 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS BULK em função de V_{BG} . Fonte: Autor

Para tensões de porta traseira negativas, a junção P-/N+ estará reversamente polarizada, fazendo com que haja baixos níveis de corrente, porém, quando a polarização de porta traseira atingir valores positivos, a junção mencionada é “disparada”, fazendo com que o catodo seja diretamente polarizado, o que produz um aumento do nível de corrente.

A tensão necessária para “disparar” a polarização direta do catodo depende da quantidade de dedos do dispositivo. Pode-se observar através da Figura 77 que para o fotodiodo PIN CMOS BULK com um único dedo (M1), a tensão necessária é de aproximadamente 0,9V, a qual é exatamente o potencial de junção (V_{BI}), dado pela equação (33).

Entretanto, para dispositivos com mais de um dedo, há um aumento da tensão necessária para disparar a polarização direta do catodo (N+), isso porque a polarização negativa aplicada ao anodo influencia mais fortemente conforme aumentam a quantidade de dedos, visto que a distância entre anodo e catodo (L_I) diminui. Este fato pode ser visto também na Figura 77, onde é necessária uma tensão de porta traseira de aproximadamente 2,7V para disparar a polarização direta do catodo.

A influência mencionada pode ser verificada claramente nas Figuras 78 e 79, onde é mostrado o corte transversal da estrutura dos fotodiodos sendo a Figura 78 um fotodiodo com um único dedo e a Figura 79 um fotodiodo com 10 dedos.

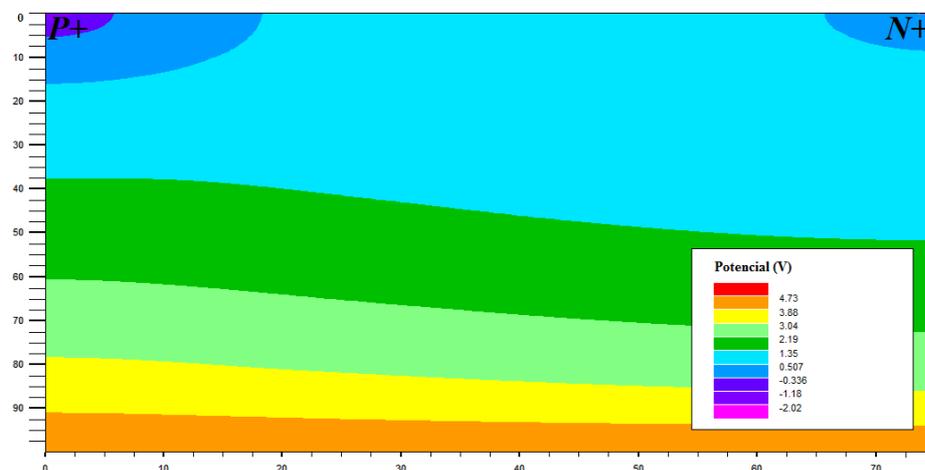


Figura 78 – Potencial do fotodiodo PIN CMOS BULK com um dedo em corte lateral com $V_{BG}=5V$. Fonte: Autor

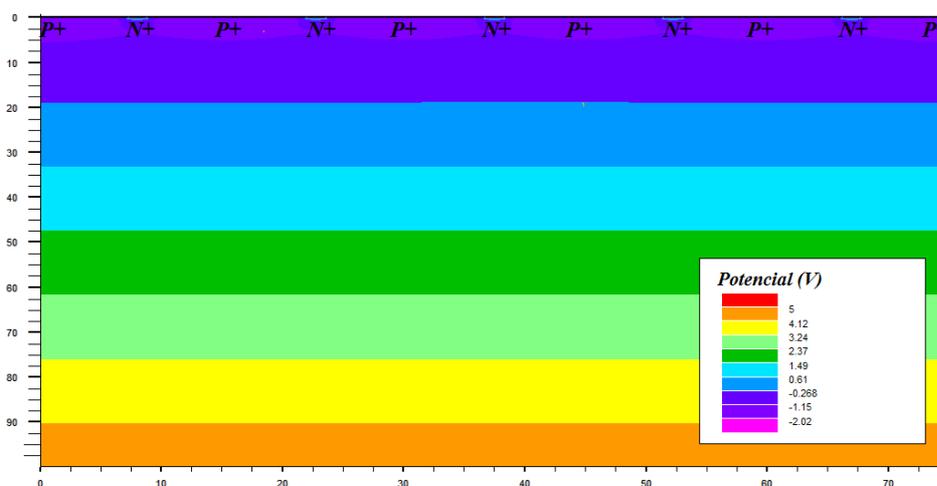


Figura 79 – Potencial do fotodiodo PIN CMOS BULK com dez dedos em corte lateral com $V_{BG}=5V$. Fonte: Autor

Para um fotodiodo com um dedo, o potencial aplicado à porta traseira é facilmente transmitido através da estrutura, aumentando o potencial próximo ao catodo, fazendo com ele dispare. No entanto, para o fotodiodo com dez dedos, o potencial aplicado à porta traseira não é transmitido com facilidade pelo substrato, pois o potencial negativo aplicado ao anodo não permite o aumento tão pronunciado do potencial de substrato próximo ao catodo, o que exige maiores tensões de porta traseira para produzir uma polarização direta do fotodiodo.

Desta forma foi obtido o gráfico mostrado na Figura 80 para diferentes valores de L_I . Pode-se observar que, para tensões de porta traseira de +4V, os fotodiodos com maiores

comprimentos de região intrínseca apresentam o maior nível de corrente, pois a junção P-/N+ já foi diretamente polarizada, enquanto que para L_I menores, o nível de corrente é menor, pois a polarização direta necessita de maior V_{BG} para disparar.

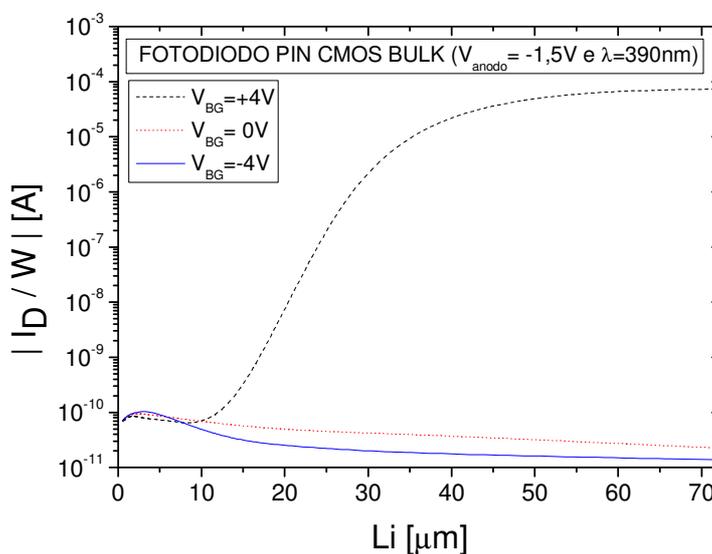


Figura 80 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS BULK em função de L_I para diferentes V_{BG} . Fonte: Autor

8.2.3 Efeito da variação da temperatura

Com o propósito de avaliar o desempenho dos fotodiodos em operação em uma grande faixa de temperatura, foram feitas simulações variando a temperatura de operação dos dispositivos de 100K a 400K.

A corrente de escuro em função da tensão aplicada (V_D) pode ser vista na Figura 81 para dispositivos BULK e na Figura 82 para dispositivos SOI.

Através de ambas as figuras pode ser observado que o aumento da temperatura, aumenta a corrente de escuro em várias ordens de magnitude, devido ao aumento da geração térmica de elétrons [73]. Além disso, a tensão reversa aplicada praticamente não altera a corrente de escuro.

Outra importante observação é que a corrente de escuro apresentada pelo dispositivo BULK é maior do que no SOI devido a sua maior área de depleção [17].

O potencial de junção dos fotodiodos (V_{BI}) é afetado pela temperatura, já que a concentração intrínseca é alterada; portanto, a tensão necessária para sua polarização direta aumenta com a diminuição da temperatura.

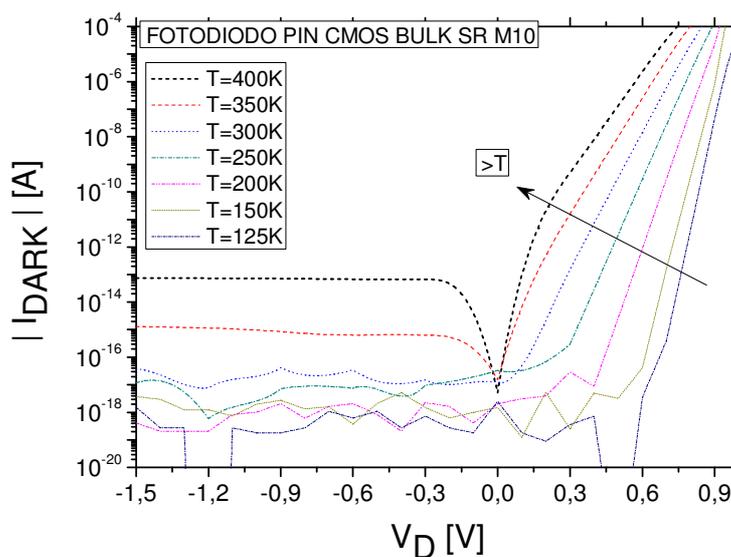


Figura 81 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para um fotodiodo PIN CMOS BULK com $m=10$ para várias temperaturas de operação. Fonte: Autor

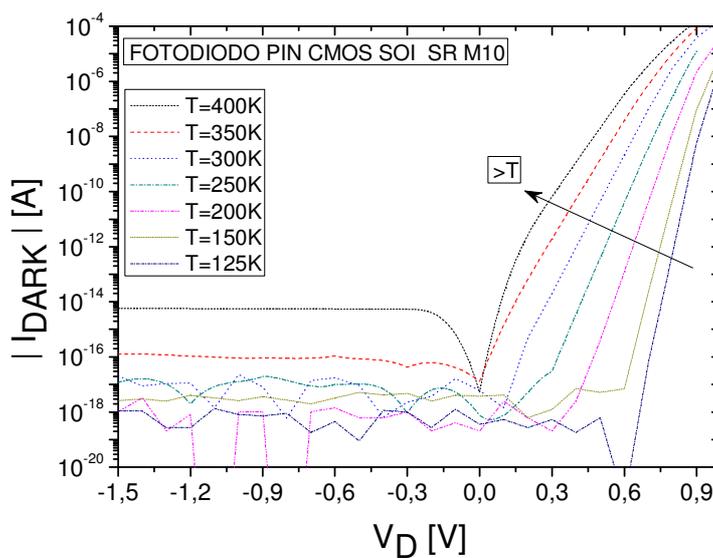


Figura 82 – Módulo da corrente de escuro em função de V_D para um fotodiodo PIN CMOS SOI com $m=10$ para várias temperaturas de operação. Fonte: Autor

A corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI é mostrada na Figura 83 em função da temperatura de operação para três comprimentos de onda diferentes. É importante mencionar que, mesmo tendo a mesma potência óptica, os três comprimentos de onda geraram fotocorrentes diferentes. Isso se deve ao fato da diferença de energia entre elas, como pode ser visto através da equação 28, onde a energia da radiação luminosa é maior para menores comprimentos de onda. Desta maneira, a fotocorrente gerada por $\lambda=390\text{nm}$ foi a maior, pois apresenta a maior energia, e por $\lambda=700\text{nm}$ foi a menor, pois apresenta a menor energia.

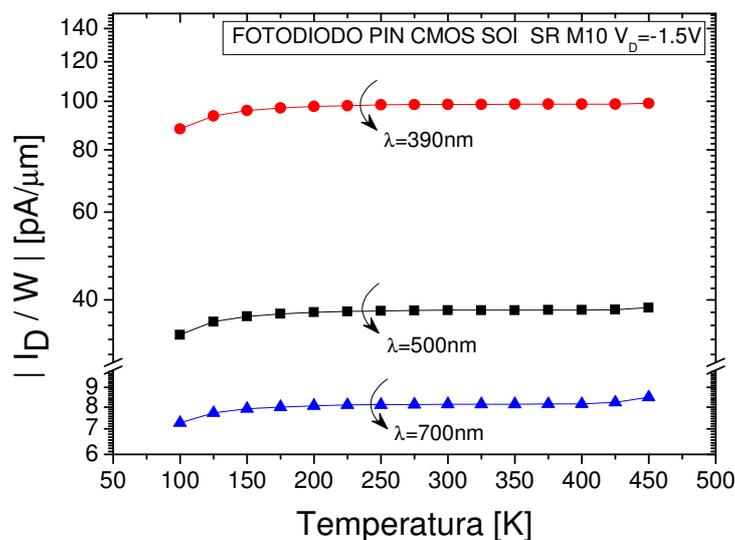


Figura 83 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI em função da temperatura para diferentes comprimentos de onda. Fonte: Autor

Além disso, a espessura do filme de silício também influencia na absorção da luz incidente, fazendo com haja diferentes quantidades de fotoportadores contribuintes para a fotocorrente. Na curva apresentada esta diferença é de aproximadamente 14 vezes entre o comprimento de onda de 390nm e 700nm.

Pode-se observar também que há uma redução da corrente dos dispositivos para temperaturas muito baixas, pois o fenômeno BGN (Band Gap Narrowing) se torna mais pronunciado com a redução da temperatura [74]. Este fenômeno se dá através do aumento da largura da faixa proibida (E_g) em baixas temperaturas, fazendo com que seja necessária maior energia para geração do par elétron- lacuna, portanto, diminuindo a fotocorrente.

Para temperaturas altas, pode ser observado um aumento na corrente total do dispositivo principalmente devido ao aumento da geração térmica de elétrons (corrente de escuro).

A Figura 84 mostra a corrente do fotodiodo PIN CMOS SOI normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função do comprimento de onda. Pode-se observar que para temperaturas maiores do que 400 Kelvin, o dispositivo torna-se mais sensível ao comprimento de onda da radiação incidente, ou seja, há um aumento mais evidenciado em relação a sua corrente em temperatura ambiente, para comprimentos de onda maiores.

Este fato está relacionado ao aumento da fração absorvida da luz para altos comprimentos de onda em altas temperaturas [15].

Já para baixas temperaturas, a redução da corrente do dispositivo devido ao BGN é praticamente constante em toda a faixa de λ simulada.

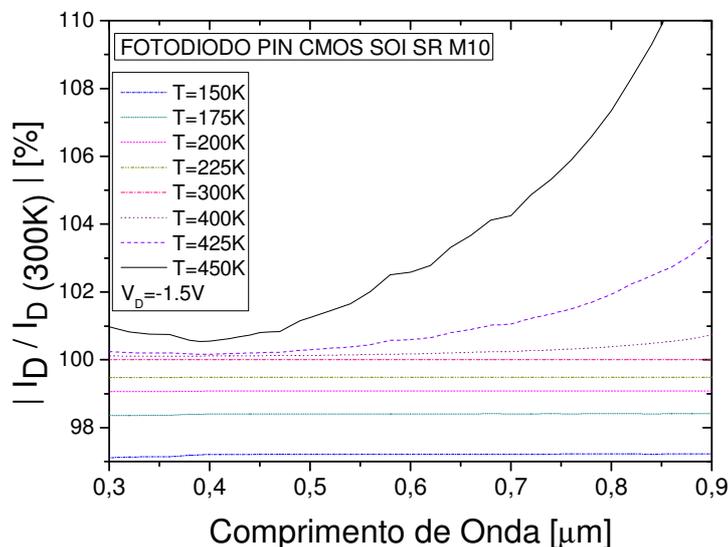


Figura 84 – Corrente total do fotodiodo normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função de λ , para o fotodiodo PIN CMOS SOI em diferentes temperaturas. Fonte: Autor

A Figura 85 também mostra a corrente normalizada do fotodiodo PIN CMOS SOI em função de λ para duas configurações, a primeira com $m=10$ e a segunda com $m=30$.

Em baixas temperaturas ($T=125K$), a redução da corrente é mais pronunciada para o dispositivo com 30 dedos, pois o efeito do aumento da largura da faixa proibida (BGN) é mais pronunciado nas regiões de alta concentração de dopantes, ou seja, nas regiões P+ e N+ (anodo e catodo). O dispositivo com 30 dedos possui uma quantidade de regiões N+ e P+ maior que o dispositivo com dez dedos, fazendo com que o BGN seja mais pronunciado, o que causa uma redução mais acentuada da corrente em relação à temperatura ambiente.

A fim de demonstrar a alteração de E_g , a largura da faixa proibida em função da dimensão x do dispositivo foi plotada na Figura 86. Para temperatura de 100K, a largura da faixa proibida é maior nas três regiões do fotodiodo (N+/P-/P+) em relação à 300K. Além disso, a maior diferença em E_g é obtida para a maior concentração, que no caso, é a região N+ (diferença de 4,1% de 100 para 300K).

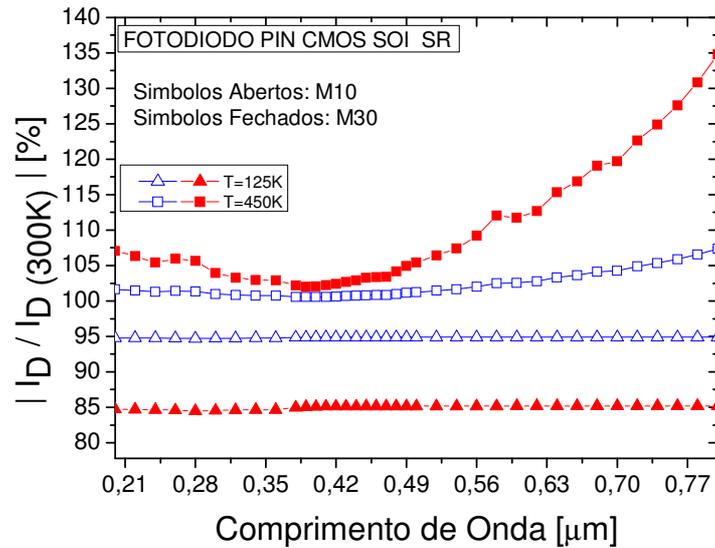


Figura 85 – Corrente total do fotodiodo normalizada pelo seu valor em temperatura ambiente em função de λ , para o fotodiodo PIN CMOS SOI com $m=10$ e $m=30$. Fonte: Autor

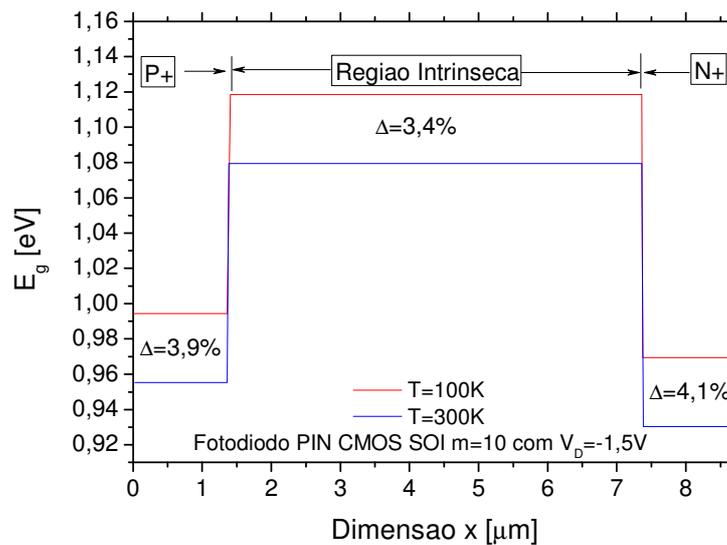


Figura 86 – Largura da faixa proibida em função de x para duas temperaturas no dispositivo PIN CMOS SOI SR m10. Fonte: Autor

Para temperatura de 450K, o maior aumento de corrente em relação à 300K foi obtido para o dispositivo com 30 dedos, conforme pode ser observado na Figura 85. Este fato é devido ao maior comprimento da região de depleção total (dx_{total}) obtido neste dispositivo, fazendo com que haja maior geração térmica, o que aumenta a corrente de escuro, consequentemente aumentando a corrente total do dispositivo.

9 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será analisada a detecção de comprimentos de onda curtos, na faixa de 400nm, utilizada na área biomédica e na área do meio ambiente. Algumas destas aplicações requerem operação dos fotodiodos em altas temperaturas, tais como a detecção e classificação de gás [75] que utiliza o fotodiodo em temperaturas de operação que podem chegar a até 400K.

Desta forma, medidas experimentais do fotodiodo PIN CMOS SOI fabricado na tecnologia de 2 μ m da UCLouvain [61] foram feitas utilizando o Analisador de Parâmetros Agilent 4156C e a temperatura foi controlada através do Sistema de Variação de Temperatura da MMR Tecnologia [76].

As dimensões e principais parâmetros deste dispositivo foram descritos na Tabela 1, sendo a sua largura total (W) de 14,5mm e a área total de 0,25mm².

A variação da polarização da porta traseira modifica a disponibilidade de portadores no filme de silício [15]. Esta afirmação pode ser comprovada através da Figura 87 que apresenta a corrente do fotodiodo em função de V_{BG} para diferentes temperaturas. Pode-se observar que a maior corrente é obtida para temperaturas mais elevadas, devido à geração térmica de portadores.

Quando o filme de silício é direcionado para o regime de acumulação ($V_{BG} < -5V$), há uma diminuição da corrente relacionada à diminuição da mobilidade dos elétrons e ao aumento do fenômeno da recombinação, devido à maior concentração de lacunas. Este comportamento é notado para todas as temperaturas de operação.

Uma vez que o filme de silício assume depleção lateral (aumentando V_{BG} entre -5V a 0V), a corrente aumenta abruptamente, atingindo 0,6 μ A, o que significa que a recombinação dos fotoportadores é significativamente menor.

Além disso, para $V_{BG} > 0V$, polarizando o filme de silício em inversão, o comportamento da camada intrínseca muda, passando a agir como N-, sendo assim, há um perfil da camada de silício igual a P+/N-/N+ e os portadores responsáveis pela deriva são os minoritários, no caso, as lacunas, e não mais os elétrons [77]. Por isso a corrente em inversão é mais baixa que a de acumulação, pois a mobilidade dos elétrons é maior que a das lacunas [17].

Entretanto, para temperaturas muito altas ($T > 460K$), este comportamento é diferente, uma vez que a corrente em inversão se torna maior que a de acumulação. Este fato pode ser explicado da seguinte maneira: como já foi visto no capítulo 3, a corrente total do dispositivo

é a soma da corrente de difusão (a qual é proporcional a n_i^2) e da corrente de deriva (a qual é proporcional a n_i). Em temperaturas suficientemente altas (no caso deste trabalho, maior que 460K), a corrente de difusão irá dominar, pois há um aumento muito significativo da concentração intrínseca devido à alta temperatura. Desta forma, a corrente em inversão é maior que a de acumulação, pois a corrente de difusão é composta por portadores majoritários, os quais, em inversão, são os elétrons, que apresentam maior mobilidade.

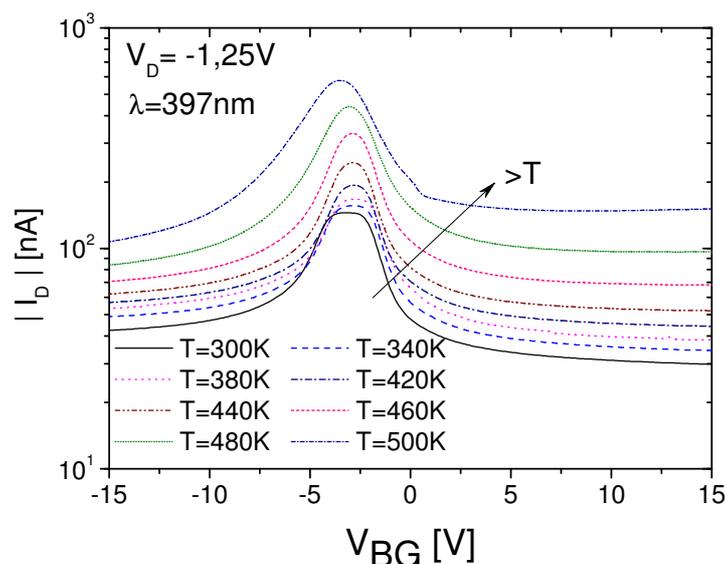


Figura 87 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI iluminado com $\lambda=397\text{nm}$ para diferentes temperaturas.
Fonte: Autor

A Figura 88 mostra a corrente do fotodiodo PIN CMOS SOI para várias tensões de anodo. A queda de V_D altera o ponto de início da acumulação, sendo necessária uma tensão V_{BG} mais negativa. Além disso, quanto menor V_D , maior é a fotocorrente, devido ao aumento do tamanho da região de depleção. Entretanto, para $T=480\text{K}$, em inversão, a corrente obtida para $V_D=-1,5\text{V}$ é a menor, pois, como a corrente de difusão é predominante, a tensão reversa do anodo produz uma grande região de depleção, fazendo com que a difusão de portadores seja menor.

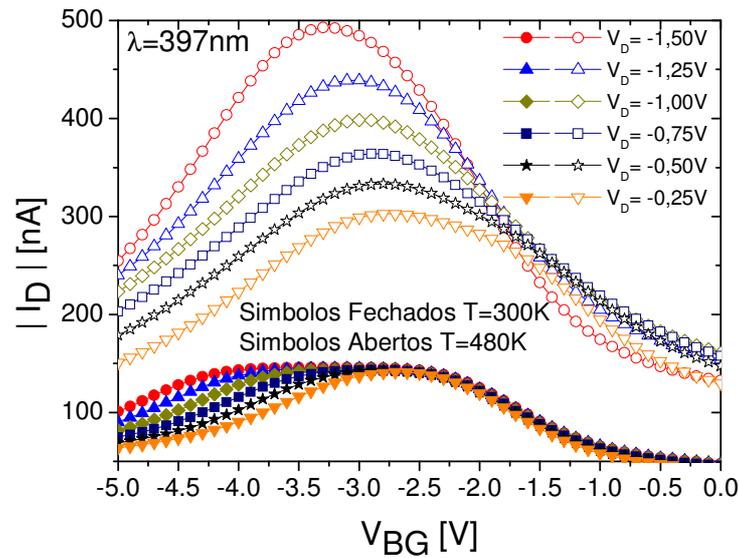


Figura 88 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI iluminado com $\lambda = 397\text{nm}$ para diferentes valores de V_D em função de V_{BG} . Fonte: Autor

A Figura 89 mostra a corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI em função de V_D para diferentes tensões de porta traseira. Conforme a temperatura é aumentada, a corrente é maior, devido principalmente ao já mencionado fato do aumento da geração térmica. Entretanto, a principal característica deste gráfico é que a temperatura é responsável pela variação do potencial de junção, pois o valor de n_i é alterado. Desta forma, quanto maior a temperatura, maior é o valor de n_i , resultando em V_{BI} menores.

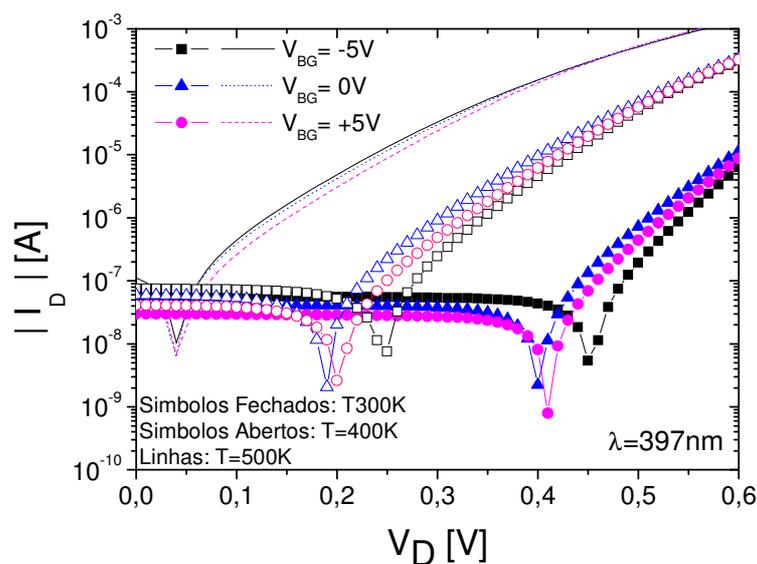


Figura 89 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI iluminado com $\lambda = 397\text{nm}$ em função de V_D . Fonte: Autor

Além da temperatura, a tensão de polarização de porta traseira modifica o potencial de junção também, como pode ser observado na mesma Figura 89. Tomando a situação com $V_{BG}=0V$ como referência, há um V_{BI} maior para $V_{BG}=-5V$, devido ao aumento da concentração de lacunas (já que V_{BI} é dependente de N_A). Similarmente para $V_{BG}=+5V$, a concentração de elétrons é maior, por isso também há um aumento em V_{BI} , já que N_D é maior.

De acordo com os resultados observados na Figura 90, conforme a temperatura é diminuída, a corrente de escuro se torna menos sensível a esta redução, principalmente abaixo de 400K, devido à menor geração térmica de portadores. Adicionalmente, a geração térmica é mais pronunciada dentro da região de depleção onde há uma menor taxa de recombinação de portadores graças à presença de cargas fixas [17]. Como resultado, a corrente de escuro tem seu valor máximo, para $V_{BG}=-3V$, quando o filme de silício está em depleção lateral. Para a temperatura de 500K, a corrente de difusão predomina sobre a corrente de deriva, conforme já foi mencionado. Já a corrente total tem uma variação máxima de até 5 vezes para $T=500K$, enquanto a corrente de escuro varia quase 16000 em relação ao seu valor em temperatura ambiente.

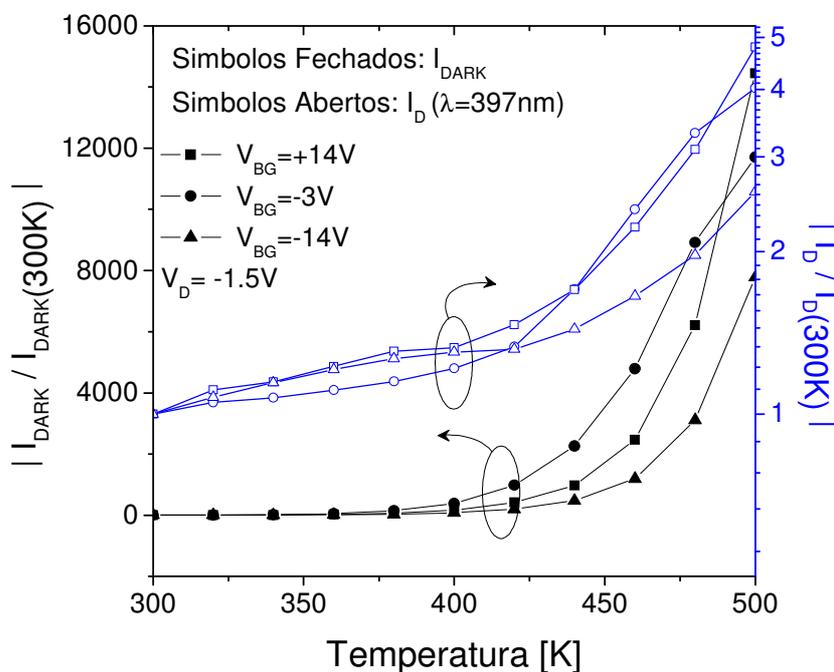


Figura 90 – Corrente de escuro e corrente total normalizada pelo seu valor em 300K; em função da temperatura.
Fonte: Autor

De acordo com a equação 49, a relação sinal-ruído (SNR) é obtida dividindo a corrente fotogerada pela corrente de escuro, como pode ser observada pela Figura 91 e Figura 92, onde o seu valor é normalizada por $V_{BG}=0V$.

Em ambas as figuras, pode ser observado que a maior SNR é obtida com valores de polarização de porta traseira mais negativas ($V_{BG}=-20V$), de tal forma que o filme de silício estará em acumulação. Entretanto, para baixas temperaturas, a SNR normalizada tende a 1, o que significa que sua variação é menor para temperaturas baixas.

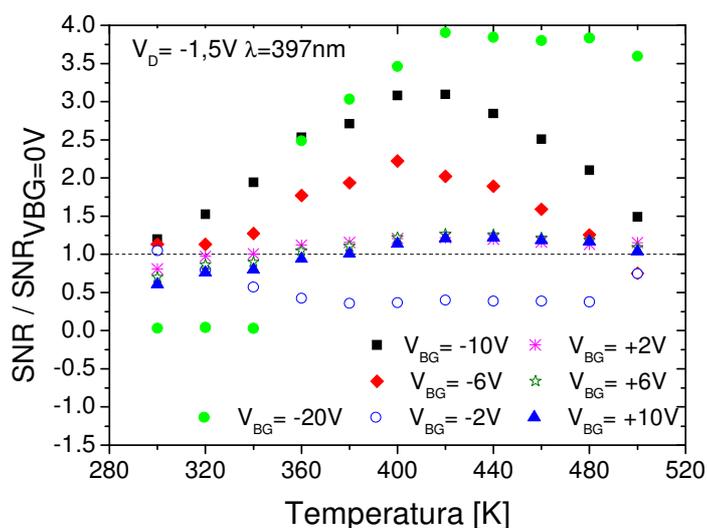


Figura 91 – Relação Sinal-Ruído normalizada pelo seu valor com $V_{BG}=0V$, em função da temperatura para $V_D=-1,5V$. Fonte: Autor

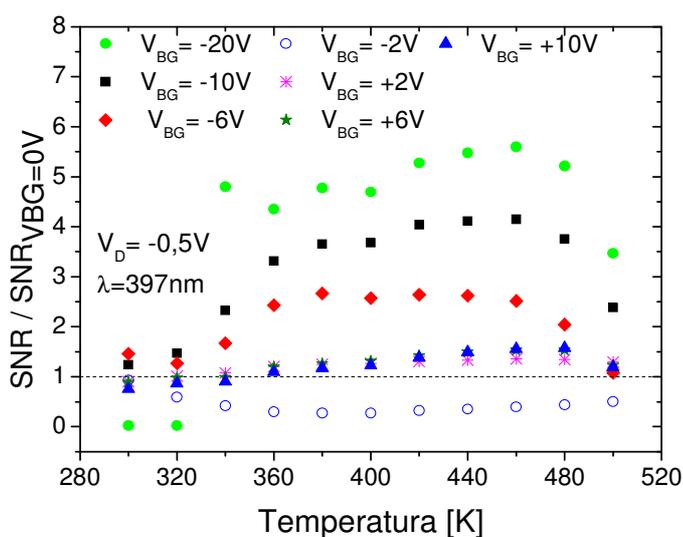


Figura 92 – Relação Sinal-Ruído normalizada pelo seu valor com $V_{BG}=0V$, em função da temperatura para $V_D=-0,5V$. Fonte: Autor

A Figura 93 mostra a corrente total do dispositivo em função de V_{BG} para três comprimentos de onda diferentes. Mais uma vez, pode ser observado que a maior corrente foi obtida para o menor comprimento de onda, tendo em vista, a maior energia dos fótons.

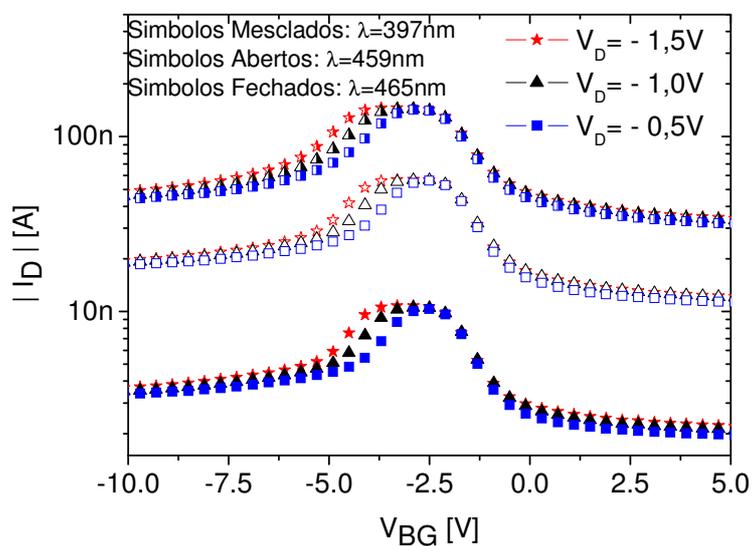


Figura 93 – Corrente total do fotodiodo PIN CMOS SOI em função de V_{BG} para diferentes comprimentos de onda. Fonte: Autor

10 CONCLUSÕES

Através de simulações numéricas foi possível constatar que o fotodiodo PIN CMOS SOI tem um comportamento favorável na faixa de comprimento de onda de 400nm, resultando em uma responsividade de 0,05A/W. Entretanto, o mesmo óxido enterrado que melhora o desempenho dos transistores e o seu escalamento, limita a profundidade de absorção dos fótons nos fotodiodos. A principal consequência disto é que a associação da tecnologia SOI com a topologia PIN apresenta o melhor resultado para comprimentos de onda menores que 400nm, sendo que esta faixa, dentro do espectro eletromagnético, depende também da espessura da camada de silício.

Para λ maior que 400nm, o efeito da difusão de portadores está presente nos fotodiodos PIN CMOS BULK, fazendo com que sua responsividade atinja 0,2A/W para 470nm de comprimento de onda. Entretanto, este é um mecanismo lento, que degrada a resposta em velocidade dos fotodiodos. Os tempos de subida e descida do fotodiodo PIN CMOS BULK foram de 47,4ps e 48,97ps respectivamente, enquanto que para o fotodiodo PIN CMOS SOI, os tempos foram de 42,5ps e 42,8ps; fazendo com que o dispositivo BULK seja, em média, 14% mais lento que o SOI.

Também foram apresentadas simulações numéricas com dispositivos multifingers, nos quais um dos principais parâmetros analisados foi o comprimento da sua região intrínseca (L_I). Dependendo do comprimento desta região e também da sua concentração de dopantes, ela pode estar totalmente ou parcialmente depletada, alterando o funcionamento dos fotodiodos. Para os fotodiodos PIN CMOS SOI totalmente depletados, a maior eficiência quântica total (aproximadamente de 50% com $\lambda=390$ nm), foi obtida para L_I de 35,5 μ m, pois a região fotossensível é maior que nos demais. Já nos dispositivos parcialmente depletados, a maior eficiência foi obtida com L_I de 13,4 μ m, onde foi constatada menor influência do fenômeno de recombinação de portadores. Desta forma, o comprimento de difusão dos portadores minoritários (elétrons) foi estimado entre 3,71 e 11,11 μ m.

Já nos dispositivos BULK, a eficiência é influenciada também pela presença da RDD vertical (formada abaixo das junções), na qual, os portadores coletados, podem contribuir para a fotocorrente.

Além do comprimento da região intrínseca, o comprimento das regiões altamente dopadas influencia na eficiência quântica total dos fotodiodos, alterando de 45%

($L_{P,N}=0,34\mu\text{m}$) para 33% ($L_{P,N}=1,36\mu\text{m}$) no caso SOI; já para BULK, alterando de 77% para 81% respectivamente.

Foi demonstrado também que a corrente de escuro se torna maior com o aumento da tensão reversa (V_D) e também com o aumento da temperatura, pois há maior geração térmica de portadores. Adicionalmente, os fotodiodos SOI apresentam em média algumas dezenas de femto amperes de corrente de escuro, enquanto os fotodiodos BULK apresentam alguns nano amperes.

Foi comprovado que a tensão de polarização de porta traseira altera o modo de funcionamento do dispositivo, podendo fazê-lo operar em acumulação, depleção ou inversão. Conseqüentemente, a eficiência total dos fotodiodos é modificada, pois a intensidade do fenômeno de recombinação depende principalmente da mobilidade dos portadores minoritários, fazendo com que a fotocorrente passe de 28pA em acumulação, para mais de 40pA em depleção, enquanto que, em inversão, a fotocorrente apresentada pelos fotodiodos SOI foi de apenas 18pA, pois a recombinação é maior, já que a mobilidade das lacunas é menor que a mobilidade dos elétrons.

Nos dispositivos BULK, a tensão V_{BG} pode disparar a polarização direta do catodo e o valor de V_{BG} necessário para este disparo é influenciado pela quantidade de dedos do fotodiodo; pois a tensão negativa aplicada ao anodo (V_D) influencia mais fortemente conforme aumentam a quantidade de dedos.

Além da corrente de escuro, a temperatura também influencia a fotocorrente. Em temperaturas muito baixas (próximo a 100 Kelvin), foi demonstrada uma redução na fotocorrente, pois o fenômeno do BGN é mais pronunciado.

Em altas temperaturas, acima de 400 Kelvin, a fotocorrente torna-se mais sensível ao comprimento de onda, ou seja, há um aumento da corrente mais evidenciado em relação a temperatura ambiente para maiores comprimentos de onda; fato que está relacionado ao aumento da fração absorvida da luz para altos valores de λ em altas temperaturas.

Os resultados experimentais demonstraram que a maior relação sinal-ruído foi obtida em acumulação do filme de silício (V_{BG} negativa), sendo aproximadamente quatro vezes maior que aquela apresentada com $V_{BG}=0V$; especialmente em altas temperaturas (maior que 360 Kelvin).

Portanto, os fotodiodos PIN SOI são indicados para aplicações que utilizam comprimentos de onda na faixa de 400nm, pois o seu desempenho em geral é melhor quando comparado ao BULK. Além disso, as suas características podem ser aperfeiçoadas quando a tensão de polarização de porta traseira for escolhida de tal forma que o dispositivo esteja em

acumulação. Contudo, os dispositivos BULK são melhor empregados em sistemas de imagem em geral.

11 PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE O PERÍODO DE MESTRADO

1. NOVO, C.; et al. **Signal to noise ratio improvement in lateral SOI PIN photodiodes at high temperatures**, Semiconductor Science and Technology, IOP Science (submetido).
2. NOVO, C.; et al. **Back-gate bias influence on the operation of lateral SOI PIN photodiodes at high temperatures**. In: EURO SOI – 9th Workshop of the Thematic Network on SOI Technology, Paris: France, 2013.
3. NOVO, C.; et al. **Operation of lateral SOI PIN photodiodes with back-gate bias and intrinsic length variation**. In: SOI SIMPOSIUM- 223rd ECS Meeting, Toronto: Canada, 2013.
4. NOVO, C.; et al. **Circuit technology and diode geometry evaluations for active pixel sensors**. In: WCAS- 2nd Workshop on Circuits and System Design, Brasilia: Brazil, 2012.
5. NOVO, C.; GIACOMINI, R. **Analysis of photocurrent and quantum efficiency of PIN CMOS and PIN SOI photodiodes**. In: STUDENT FORUM- 12nd Microelectronics Student Forum, Brasilia: Brazil, 2012.

REFERÊNCIAS

1. ZÍLIO, S. C. **Conceitos Básicos para Comunicações Óticas**. 2. ed. São Paulo: Renovarum Ltda, v. 1, 2001.
2. YAHOO. Disponivel em: <http://br.answers.yahoo.com/question/index?qid=20100412155148AA7CU7f>>.
3. INFO Escola. Disponivel em: <http://www.infoescola.com/fotografia/fotografia-digital/>>.
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. Disponivel em: <http://www.bluraydisc.com/Section-13470/Sesction-13628/Index.html>>.
8. ISHAK, W. **An Overview of Agilent Technologies and Agilent Laboratories**. IEEE KITCHENER-WATERLOO. Waterloo: [s.n.]. 2003. p. 1-2.
9. 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.
10. MOORE, G. E. **Progress in Digital Integrated Electronics**. Internation Electron Devices Metting. [S.l.]: [s.n.]. 1975. p. 11-13.
11. ZÍLIO, S. C. **Óptica Moderna Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Renovarum Ltda, 2000.
12. GOOGLE. Disponivel em: <http://www.google.com.br/imgres?imgurl>>.
13. JÚNIOR, C. S.; SASSON, S.; SANCHES, P. S. B. **Ciências Entendendo a Natureza**. São Paulo: Saraiva S A, 2009.
14. WALKER, H. R. **Ótica e Física Moderna**. Sexta Edição. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 2003.
15. AFZALIAN, A. **Optical Detectors in SOI CMOS Technologies for Blue DVD and**

- Short Distance Optical Communication.** Universidade Catholique de Louvain. Belgium. 2006.
16. COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. **Physics of Semiconductor Devices.** Massachusetts: Kluwer Academic, 2002.
 17. SZE, S. M. **Physics of Semiconductor Devices.** New York: John Wiley & Sons, 1981.
 18. KITTEL, C. **Introduction to Solid State Physics.** 6th Edition. ed. [S.l.]: J. Wiley and Sons, 1986. 81-85 p.
 19. ZIMAN, J. M. **Principles of the Theory of Solids.** 2nd Edition. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 1972.
 20. FOROUHI, A. R.; BLOOMER, I. Optical Properties of Crystalline Semiconductor and Dielectrics. **Physical Review B**, v. 38, n. 3rd. Edition, p. 1865-1874, July 1988.
 21. FOROUHI, A. R.; BLOOMER, I. Optical Dispersion Relations for Amorphous Semiconductor and Amorphous Dielectrics. **Physical Review**, v. 34, n. 10th Edition, p. 7018-7926, Nov. 1986.
 22. MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. B. **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS.** São Paulo: Thomson, 2003.
 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. AMBROZIAK, A. **Semiconductor Photoelectric Devices.** London: Iliffe, 1968.
 26. KNITTL, Z. **Optics of Thin Films.** Prague: Wiley & Sons, 1976.
 27. WIKIPEDIA. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Largura_de_banda>.
 28. CAMPOS, F. D. S. **Sistemas de Imagem CMOS com Alta Responsividade.** Unicamp. Campinas. 2008.
 29. ZIMMERMANN, H. **Integrated Silicon Opto-electronics.** Berlin: Springer, 2000.
 30. GARETT, L. D. et al. A Silicon-Based Integrated NMOS p-i-n Photoreceiver. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 43, n. 3rd. Edition, p. 411-416, Feb. 1996.
 31. COLINGE, J. P. **Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI.** 3. ed. Boston: Kluwer Academic, 2004.

32. 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.
33. COLINGE, J. P. **FinFETs and Other Multi-Gate Transistors**. New York: Springer, 2008.
34. 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.
35. AFZALIAN, A.; FLANDRE, D. Physical Modeling and Design of Thin-Film SOI Lateral PIN Photodiodes for Blue DVD-Applications. **Proc. of 2004 IEEE SOI Conf.**, Charleston, 4-7 October 2004. 21-23.
36. SADIKU, M. N. O. **Optical and Wireless Communications**. 9th. Edition. ed. Los Angeles: CRC Press, v. 39, 2002.
37. GHIONI, M. A VLSI-Compatible High-Speed Silicon Photodetector for Optical Data Link Applications. **IEEE Trans. On Electron Decices**, v. 43, n. 7, p. 1054-1060, July 1996.
38. HO, J. Y. L.; WONG, K. S. High- Speed and High-Sensitivity SOI Metal-Semiconductor-Metal Photodetector with Trench Structure. **Appl. Phys. Letters**, v. 69, n. 1, p. 16-18, 1996.
39. LIU, M. Y.; CHEN, E.; CHOU, S. Y. 140GHz Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors on SOI Substrates with Scaled Active Layer. **Appl. Phys. Letters**, v. 65, n. 7, p. 887-888, 1994.
40. LEVINE, B. F. et al. 1Gb/s High Quantum Efficiency Monolithically Integrable Detector. **Appl. Phys. Letters**, v. 66, n. 22, p. 2984-2986, 1995.
41. EMSLEY, M. K. et al. Realization of High-Efficiency 10GHz Bandwidth Silicon Photodetector Arrays for Fully Integrated Optical Data Communication Interfaces. **Proc. of ESSDERC 2003 Conference**, Estoril, 16-18 September 2003. 47-50.
42. YOSHIDA, T.; OHTOMO, Y.; SHIMAYA, M. A Novel p-i-n Photodetector Fabricated on SIMOX for 1GHz 2V CMOS OEICs. **Technical Digest. of Electron Devices Meeting (IEDM)**, 6-9 December 1998. 29-32.
43. YANG, B. et al. 10Gb/s All-Silicon Optical Receiver. **IEEE Photonics Technologie Letters**, v. 15, n. 5, p. 745-747, May 2003.
44. ZHANG, W.; CHAN, M.; KO, C. H. Performance of Floating Gate/Body Tied NMOSFET

- Photodetector on SOI Substrate. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 47, n. 7, p. 1375-1384, July 2000.
45. DEHLINGER, G. et al. High-Speed Germanium on SOI Lateral PIN Photodiodes. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, n. 11, p. 2547-2549, November 2004.
46. DORIA, R. T. **Efeito da Tensão Mecânica em Transistores de Múltiplas Portas Operando em Temperaturas Criogênicas**. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo. 2010.
47. ZHENG, X.; WRIGLEY, C. **High Responsivity CMOS Imager Pixel Implemented in SOI Technologie**. IEEE International SOI Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2000.
48. AFZALIAN, A.; FLANDRE, D. Modeling of the Bulk vs. SOI CMOS Performances for the Optimal Design of APS Circuits in Low-Power, Low-Voltage Application. **IEEE Transactions On Electron Devices, Special Issue on Solid-State Sensors**, January 2003. 106-110.
49. WONG, H. Technology and Device Scaling Considerations for CMOS Imagers. **IEEE Transactions On Electron Devices**, v. 43, n. 12, p. 2131-2142, December 1996.
50. LULE, T. Sensitivity of CMOS Based Imagers and Scaling Perspectives. **IEEE Transactions On Electron Devices**, v. 47, n. 11, p. 2110-2121, November 2000.
51. ESTRADA, M. et al. FD MOS SOI Circuit to Enhance the Ratio of Illuminated to Dark-Current of a Co-Integrated a-Si:H photodiode. **Microelectronics Reliability**, v. 43, p. 189-193, January 2003.
52. GUTIERREZ, E. A.; CLAYES, C. L. **Low temperature Electronics: Physics, Devices, Circuits and Applications**. [S.l.]: Academic Press, v. 964p., 1991.
53. SELBERHERR, S. MOS Device Modeling at 77K. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 36, n. 8, p. 1464-1474, 1989.
54. MCKELVEY, J. P. **Solid State and Semiconductor Physics**. [S.l.]: Krieger Pub Co, v. 512p., 1982.
55. 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.
56. KLAASSEN, D. B. M. A Unified Mobility Model for Device Simulation – I. Model Equations and Concentration Dependence. **Solid State Electronic**, v. 35, n. 7, p. 953-959,

- 1992.
57. KLAASSEN, D. B. M. A Unified Mobility Model for Device Simulation – II. Temperature Dependence of Carrier Mobility and Lifetime. **Solid State Electronics**, v. 35, n. 7, p. 961-967, 1992.
 58. CANALI, C.; AL., E. Electron and Hole Drift Velocity Measurements in Silicon and their Relation to Electric Field and Temperature. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 22, p. 1045-1047, 1975.
 59. ATLAS User's Manual. Santa Clara: Silvaco, v. 5.16.3.R, 2010.
 60. X FAB MIXED-SIGNAL FOUNDRY EXPERTS. **Data Sheet X-FAB Semiconductor Foundries AG CX06**. X FAB. [S.l.], p. 1-8. 2012.
 61. FLANDRE, D.; AL, E. Fully Depleted SOI CMOS Technology for Hetero-Genueous, Micropower, High-Temperatura or RF Microsystems. **Solid State Electronics**, v. 45, n. 4, p. 541-549, April 2001.
 62. XFAB MIXED-SIGNAL FOUNDRY EXPERTS. **Data Sheet X-FAB Semiconductor Foundries AG XO35**. XFAB. [S.l.], p. 1-8. 2012.
 63. XFAB MIXED-SIGNAL FOUNDRY EXPERTS. **Data Sheet X-FAB Semiconductor Foundries AG FC025**. XFAB. [S.l.], p. 1-8. 2012.
 64. DOMAE, Y.; AL, E. **Improvement of the Tolerance to Total Ionizing Dose in SOI CMOS**. Proc. of IEEE Int. SOI Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 135-136.
 65. AUGENDRE, Y.; AL, E. **On the Scability of Source/ Drain Current Enhancement in Thin SOI**. Proc. of ESSDERC. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 301-304.
 66. SPEEDY Converter. **Top Conversions**, 2011. Disponivel em: <http://www.speedyconverter.com/?c=watt%2Fsquare+meter+to+lux>. Acesso em: Novembro 2012.
 67. KILCHYTSKA, V.; LEVACQ, D.; RASKIN, J. P. Floating Effective Back-Gate Effect on the Small- Signal Output Conductance of SOI MOSFETs. **IEEE Electron Device Letters**, June 2003. 414-416.
 68. GARTNER, W. Depletion-Layer Photoeffects in Semiconductors. **Physical Review**, v. 116, n. 1, p. 84-87, October 1959.
 69. MENTOR GRAPHIC'S. **The Higher Education Program**. Oregon: [s.n.], 2005.
 70. MOSIS Integrated Circuit Fabrication Service. **Multi Projectt Wafer**, 2012. Disponivel

em: <<http://www.mosis.com/>>.

71. THE Mosis Service. **IC Fabrication**, 2012. Disponível em: <<http://www.mosis.com/products/fab-processes>>.
72. ST Microelectronics. **Datasheet ST0,13**. Disponível em: <<http://www.st.com>>.
73. SOUZA, M. et al. Temperature and Silicon Film Thickness Influence on the Operation of Lateral SOI PIN Photodiodes for Detection of Short Wavelengths. **Journal of Integrated Circuits and Systems**, v. 6, n. 2, p. 107-113, September 2011.
74. LANYON, H.; TUFT, R. Bandgap Narrowing in Moderately to Heavily Doped Silicon. **IEEE Trans. On Electron Devices**, v. 26, n. 7, p. 1014-1018, 1979.
75. BRAGA, M. S. **Sensor de Imagem para Detecção de Gases**. USP. São Paulo. 2008.
76. SOUZA, M. et al. Analysis of Lateral SOI PIN Diodes for The Detection of Blue and UV Wavelengths in a Wide Temperature Range. **ECS Transactions** , v. 31, n. 1, p. 199-206, 2010.
77. AFAZALIAN, 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.

APÊNDICE A – EXEMPLO DE ESTRUTURA COM ÚNICO DEDO

```

#####
# Arquivo:PINBULK_Li1_lam200a1000_re0
# data: 08/08/2012
#
# Potência fixa de 1mW/cm2, com tensão fixa, variando lambda de 200 a 1000nm
#
#####

go atlas
TITLE PINBULK_Li1_lam200a1000_re0

#####
# Especificyng the initial mesh #
#####

set Li=1
mesh space.mult=1.0
#
x.mesh loc=0.0   spac=0.5
x.mesh loc=2.1   spac=0.5
x.mesh loc=2.8   spac=0.1
x.mesh loc=4.5   spac=0.01
x.mesh loc=5.00  spac=0.01
x.mesh loc=5.5   spac=0.01
x.mesh loc=7.2   spac=0.1
x.mesh loc=7.9   spac=0.5
x.mesh loc=10    spac=0.5

y.mesh loc=-0.280 spac=0.05
y.mesh loc=0.0    spac=0.05
y.mesh loc=0.02   spac=0.01
y.mesh loc=0.3    spac=0.01
y.mesh loc=1      spac=0.01
y.mesh loc=500    spac=100

eliminate columns x.min=0 x.max=10 y.min=0.4 y.max=500

#***** Regioes *****
region      num=1 y.min=0.0      y.max=500      x.min=0.0      x.max=10      silicon
region      num=2 x.min=0.0      x.max=2.1      y.min=-0.280   y.max=0.0      oxide
region      num=3 x.min=2.8      x.max=7.2      y.min=-0.280   y.max=0.0      oxide
region      num=4 x.min=7.9      x.max=10       y.min=-0.280   y.max=0.0      oxide

#***** DEFINE THE ELECTRODES *****
electrode   name=anode      x.min=2.1      x.max=2.8      y.min=-0.280   y.max=0.0
electrode   name=cathode x.min=7.2      x.max=7.9      y.min=-0.280   y.max=0.0

#***** DEFINING THE DOPING CONCENTRATIONS *****
doping      uniform   conc=1e20 p.type reg=1 x.min=0          x.max=4.5        y.min=0
y.max=0.3
doping      uniform   conc=4E20 n.type reg=1 x.min=5.5        x.max=10         y.min=0
y.max=0.3
doping      uniform   conc=1E15 p.type reg=1 x.min=4.5        x.max=5.5        y.min=0
y.max=0.3
doping      uniform   conc=1E15 p.type reg=1 x.min=0          x.max=10         y.min=0.3
y.max=500

```

```

#*****
*

contact name=anode
contact name=cathode

save outf=PINBULK_Li$"Li"_lam200a1000.str
tonyplot PINBULK_Li$"Li"_lam200a1000.str

#***** Definição feixe de luz
*****

beam num=1 x.origin=5 y.origin=-5.5E4 angle=90.0 wavelength=0.2

output minset

#Definição de modelos

models kla bgn consrh fldmob optr klaaug print temp=300
solve init

method newton autonr trap maxtrap=10 carriers=2
solve prev

#Aplicação de tensão

solve vanode=0 vstep=-0.1 vfinal=-1.5 name=anode

log outf=PINBULK_Li$"Li"_lam200a1000.log master
solve b1=1E-3 lambda=0.2
solve b1=1E-3 lambda=0.22
solve b1=1E-3 lambda=0.24
solve b1=1E-3 lambda=0.26
solve b1=1E-3 lambda=0.28
solve b1=1E-3 lambda=0.30
solve b1=1E-3 lambda=0.32
solve b1=1E-3 lambda=0.34
solve b1=1E-3 lambda=0.36
solve b1=1E-3 lambda=0.38
solve b1=1E-3 lambda=0.39
solve b1=1E-3 lambda=0.40
solve b1=1E-3 lambda=0.41
solve b1=1E-3 lambda=0.42
solve b1=1E-3 lambda=0.43
solve b1=1E-3 lambda=0.44
solve b1=1E-3 lambda=0.45
solve b1=1E-3 lambda=0.46
solve b1=1E-3 lambda=0.47
solve b1=1E-3 lambda=0.48
solve b1=1E-3 lambda=0.49
solve b1=1E-3 lambda=0.5
solve b1=1E-3 lambda=0.52
solve b1=1E-3 lambda=0.54
solve b1=1E-3 lambda=0.56
solve b1=1E-3 lambda=0.58
solve b1=1E-3 lambda=0.6
solve b1=1E-3 lambda=0.62
solve b1=1E-3 lambda=0.64
solve b1=1E-3 lambda=0.66
solve b1=1E-3 lambda=0.68
solve b1=1E-3 lambda=0.7
solve b1=1E-3 lambda=0.72
solve b1=1E-3 lambda=0.74
solve b1=1E-3 lambda=0.76
solve b1=1E-3 lambda=0.78
solve b1=1E-3 lambda=0.8

```

```
solve b1=1E-3 lambda=0.82  
solve b1=1E-3 lambda=0.84  
solve b1=1E-3 lambda=0.86  
solve b1=1E-3 lambda=0.88  
solve b1=1E-3 lambda=0.9  
solve b1=1E-3 lambda=0.92  
solve b1=1E-3 lambda=0.94  
solve b1=1E-3 lambda=0.96  
solve b1=1E-3 lambda=0.98  
solve b1=1E-3 lambda=1
```

```
Log off
```

```
#save outf=FINAL_Q_SOI2_HR_400.str  
#tonyplot FINAL_Q_SOI2_HR_400.str
```

```
quit
```

APÊNDICE B – EXEMPLO DE ESTRUTURA MULTIFINGER

```

#####
# Arquivo:SOI_m40_ST013_HR
# data: 20/08/2012
#
# Potência fixa de 1mW/cm2, com tensão fixa, variando lambda de 200 a 1000nm
#
#####

go atlas
TITLE SOI_m40_ST013_HR

#####
# Especificyng the initial mesh #
#####

set m=40
mesh space.mult=1.0
#
x.mesh loc=0.0      spac=0.5
x.mesh loc=0.33    spac=0.5
x.mesh loc=1.03    spac=0.5
x.mesh loc=1.36    spac=0.1
x.mesh loc=1.84    spac=0.1
x.mesh loc=2.17    spac=0.5
x.mesh loc=2.87    spac=0.5
x.mesh loc=3.2     spac=0.1
x.mesh loc=3.68    spac=0.1
x.mesh loc=4.01    spac=0.5
x.mesh loc=4.71    spac=0.5
x.mesh loc=5.04    spac=0.1
x.mesh loc=5.52    spac=0.1
x.mesh loc=5.85    spac=0.5
x.mesh loc=6.55    spac=0.5
x.mesh loc=6.88    spac=0.1
x.mesh loc=7.36    spac=0.1
x.mesh loc=7.69    spac=0.5
x.mesh loc=8.39    spac=0.5
x.mesh loc=8.72    spac=0.1
x.mesh loc=9.2     spac=0.1
x.mesh loc=9.53    spac=0.5
x.mesh loc=10.23   spac=0.5
x.mesh loc=10.56   spac=0.1
x.mesh loc=11.04   spac=0.1
x.mesh loc=11.37   spac=0.5
x.mesh loc=12.07   spac=0.5
x.mesh loc=12.4    spac=0.1
x.mesh loc=12.88   spac=0.1
x.mesh loc=13.21   spac=0.5
x.mesh loc=13.91   spac=0.5
x.mesh loc=14.24   spac=0.1
x.mesh loc=14.72   spac=0.1
x.mesh loc=15.05   spac=0.5
x.mesh loc=15.75   spac=0.5
x.mesh loc=16.08   spac=0.1
x.mesh loc=16.56   spac=0.1
x.mesh loc=16.89   spac=0.5
x.mesh loc=17.59   spac=0.5
x.mesh loc=17.92   spac=0.1
x.mesh loc=18.4    spac=0.1
x.mesh loc=18.73   spac=0.5
x.mesh loc=19.43   spac=0.5
x.mesh loc=19.76   spac=0.1
x.mesh loc=20.24   spac=0.1
x.mesh loc=20.57   spac=0.5
x.mesh loc=21.27   spac=0.5
x.mesh loc=21.6    spac=0.1
x.mesh loc=22.08   spac=0.1
x.mesh loc=22.41   spac=0.5

```

x.mesh	loc=23.11	spac=0.5
x.mesh	loc=23.44	spac=0.1
x.mesh	loc=23.92	spac=0.1
x.mesh	loc=24.25	spac=0.5
x.mesh	loc=24.95	spac=0.5
x.mesh	loc=25.28	spac=0.1
x.mesh	loc=25.76	spac=0.1
x.mesh	loc=26.09	spac=0.5
x.mesh	loc=26.79	spac=0.5
x.mesh	loc=27.12	spac=0.1
x.mesh	loc=27.6	spac=0.1
x.mesh	loc=27.93	spac=0.5
x.mesh	loc=28.63	spac=0.5
x.mesh	loc=28.96	spac=0.1
x.mesh	loc=29.44	spac=0.1
x.mesh	loc=29.77	spac=0.5
x.mesh	loc=30.47	spac=0.5
x.mesh	loc=30.8	spac=0.1
x.mesh	loc=31.28	spac=0.1
x.mesh	loc=31.61	spac=0.5
x.mesh	loc=32.31	spac=0.5
x.mesh	loc=32.64	spac=0.1
x.mesh	loc=33.12	spac=0.1
x.mesh	loc=33.45	spac=0.5
x.mesh	loc=34.15	spac=0.5
x.mesh	loc=34.48	spac=0.1
x.mesh	loc=34.96	spac=0.1
x.mesh	loc=35.29	spac=0.5
x.mesh	loc=35.99	spac=0.5
x.mesh	loc=36.32	spac=0.1
x.mesh	loc=36.8	spac=0.1
x.mesh	loc=37.13	spac=0.5
x.mesh	loc=37.83	spac=0.5
x.mesh	loc=38.16	spac=0.1
x.mesh	loc=38.64	spac=0.1
x.mesh	loc=38.97	spac=0.5
x.mesh	loc=39.67	spac=0.5
x.mesh	loc=40	spac=0.1
x.mesh	loc=40.48	spac=0.1
x.mesh	loc=40.81	spac=0.5
x.mesh	loc=41.51	spac=0.5
x.mesh	loc=41.84	spac=0.1
x.mesh	loc=42.32	spac=0.1
x.mesh	loc=42.65	spac=0.5
x.mesh	loc=43.35	spac=0.5
x.mesh	loc=43.68	spac=0.1
x.mesh	loc=44.16	spac=0.1
x.mesh	loc=44.49	spac=0.5
x.mesh	loc=45.19	spac=0.5
x.mesh	loc=45.52	spac=0.1
x.mesh	loc=46	spac=0.1
x.mesh	loc=46.33	spac=0.5
x.mesh	loc=47.03	spac=0.5
x.mesh	loc=47.36	spac=0.1
x.mesh	loc=47.84	spac=0.1
x.mesh	loc=48.17	spac=0.5
x.mesh	loc=48.87	spac=0.5
x.mesh	loc=49.2	spac=0.1
x.mesh	loc=49.68	spac=0.1
x.mesh	loc=50.01	spac=0.5
x.mesh	loc=50.71	spac=0.5
x.mesh	loc=51.04	spac=0.1
x.mesh	loc=51.52	spac=0.1
x.mesh	loc=51.85	spac=0.5
x.mesh	loc=52.55	spac=0.5
x.mesh	loc=52.88	spac=0.1
x.mesh	loc=53.36	spac=0.1
x.mesh	loc=53.69	spac=0.5

```

x.mesh loc=54.39   spac=0.5
x.mesh loc=54.72   spac=0.1
x.mesh loc=55.2    spac=0.1
x.mesh loc=55.53   spac=0.5
x.mesh loc=56.23   spac=0.5
x.mesh loc=56.56   spac=0.1
x.mesh loc=57.04   spac=0.1
x.mesh loc=57.37   spac=0.5
x.mesh loc=58.07   spac=0.5
x.mesh loc=58.4    spac=0.1
x.mesh loc=58.88   spac=0.1
x.mesh loc=59.21   spac=0.5
x.mesh loc=59.91   spac=0.5
x.mesh loc=60.24   spac=0.1
x.mesh loc=60.72   spac=0.1
x.mesh loc=61.05   spac=0.5
x.mesh loc=61.75   spac=0.5
x.mesh loc=62.08   spac=0.1
x.mesh loc=62.56   spac=0.1
x.mesh loc=62.89   spac=0.5
x.mesh loc=63.59   spac=0.5
x.mesh loc=63.92   spac=0.1
x.mesh loc=64.4    spac=0.1
x.mesh loc=64.73   spac=0.5
x.mesh loc=65.43   spac=0.5
x.mesh loc=65.76   spac=0.1
x.mesh loc=66.24   spac=0.1
x.mesh loc=66.57   spac=0.5
x.mesh loc=67.27   spac=0.5
x.mesh loc=67.6    spac=0.1
x.mesh loc=68.08   spac=0.1
x.mesh loc=68.41   spac=0.5
x.mesh loc=69.11   spac=0.5
x.mesh loc=69.44   spac=0.1
x.mesh loc=69.92   spac=0.1
x.mesh loc=70.25   spac=0.5
x.mesh loc=70.95   spac=0.5
x.mesh loc=71.28   spac=0.1
x.mesh loc=71.76   spac=0.1
x.mesh loc=72.09   spac=0.5
x.mesh loc=72.79   spac=0.5
x.mesh loc=73.12   spac=0.1
x.mesh loc=73.6    spac=0.1
x.mesh loc=73.93   spac=0.5
x.mesh loc=74.63   spac=0.5
x.mesh loc=74.96   spac=0.5

```

```

y.mesh loc=-0.031 spac=0.05
y.mesh loc=0.0     spac=0.05
y.mesh loc=0.075   spac=0.02
y.mesh loc=0.150   spac=0.05
y.mesh loc=0.550   spac=0.05

```

```

#***** Regioes *****

```

region	num=1	y.min=0.0	y.max=0.150	x.min=0.0	x.max=74.96	silicon
region	num=2	x.min=0.0	x.max=0.33	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=3	x.min=1.03	x.max=2.17	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=4	x.min=2.87	x.max=4.01	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=5	x.min=4.71	x.max=5.85	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=6	x.min=6.55	x.max=7.69	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=7	x.min=8.39	x.max=9.53	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=8	x.min=10.23	x.max=11.37	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=9	x.min=12.07	x.max=13.21	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=10	x.min=13.91	x.max=15.05	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=11	x.min=15.75	x.max=16.89	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide

region	num=12	x.min=17.59	x.max=18.73	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=13	x.min=19.43	x.max=20.57	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=14	x.min=21.27	x.max=22.41	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=15	x.min=23.11	x.max=24.25	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=16	x.min=24.95	x.max=26.09	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=17	x.min=26.79	x.max=27.93	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=18	x.min=28.63	x.max=29.77	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=19	x.min=30.47	x.max=31.61	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=20	x.min=32.31	x.max=33.45	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=21	x.min=34.15	x.max=35.29	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=22	x.min=35.99	x.max=37.13	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=23	x.min=37.83	x.max=38.97	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=24	x.min=39.67	x.max=40.81	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=25	x.min=41.51	x.max=42.65	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=26	x.min=43.35	x.max=44.49	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=27	x.min=45.19	x.max=46.33	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=28	x.min=47.03	x.max=48.17	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=29	x.min=48.87	x.max=50.01	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=30	x.min=50.71	x.max=51.85	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=31	x.min=52.55	x.max=53.69	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=32	x.min=54.39	x.max=55.53	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=33	x.min=56.23	x.max=57.37	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=34	x.min=58.07	x.max=59.21	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=35	x.min=59.91	x.max=61.05	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=36	x.min=61.75	x.max=62.89	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=37	x.min=63.59	x.max=64.73	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=38	x.min=65.43	x.max=66.57	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=39	x.min=67.27	x.max=68.41	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=40	x.min=69.11	x.max=70.25	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=41	x.min=70.95	x.max=72.09	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=42	x.min=72.79	x.max=73.93	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=43	x.min=74.63	x.max=74.96	y.min=-0.031	y.max=0.0	oxide
region	num=44	y.min=0.15	y.max=0.550	x.min=0.0	x.max=74.96	
oxide						

***** DEFINE THE ELECTRODES *****

electrode	name=anode	x.min=0.33	x.max=1.03	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=2.17	x.max=2.87	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=4.01	x.max=4.71	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=5.85	x.max=6.55	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=7.69	x.max=8.39	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=9.53	x.max=10.23	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=11.37	x.max=12.07	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=13.21	x.max=13.91	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=15.05	x.max=15.75	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=16.89	x.max=17.59	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=18.73	x.max=19.43	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=20.57	x.max=21.27	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=22.41	x.max=23.11	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=24.25	x.max=24.95	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=26.09	x.max=26.79	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=27.93	x.max=28.63	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=29.77	x.max=30.47	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=31.61	x.max=32.31	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=33.45	x.max=34.15	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=35.29	x.max=35.99	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=37.13	x.max=37.83	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=38.97	x.max=39.67	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=40.81	x.max=41.51	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=42.65	x.max=43.35	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=44.49	x.max=45.19	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=46.33	x.max=47.03	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=48.17	x.max=48.87	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=50.01	x.max=50.71	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=51.85	x.max=52.55	y.min=-0.031	y.max=0.0

electrode	name=cathode	x.min=53.69	x.max=54.39	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=55.53	x.max=56.23	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=57.37	x.max=58.07	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=59.21	x.max=59.91	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=61.05	x.max=61.75	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=62.89	x.max=63.59	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=64.73	x.max=65.43	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=66.57	x.max=67.27	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=68.41	x.max=69.11	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=70.25	x.max=70.95	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=cathode	x.min=72.09	x.max=72.79	y.min=-0.031	y.max=0.0
electrode	name=anode	x.min=73.93	x.max=74.63	y.min=-0.031	y.max=0.0

#***** DEFINING THE DOPING CONCENTRATIONS *****

doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=0	x.max=1.36	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=3.68	x.max=5.04	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=7.36	x.max=8.72	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=11.04	x.max=12.4	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=14.72	x.max=16.08	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=18.4	x.max=19.76	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=22.08	x.max=23.44	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=25.76	x.max=27.12	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=29.44	x.max=30.80	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=33.12	x.max=34.48	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=36.8	x.max=38.16	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=40.48	x.max=41.84	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=44.16	x.max=45.52	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=47.84	x.max=49.20	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=51.52	x.max=52.88	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=55.2	x.max=56.56	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=58.88	x.max=60.24	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=62.56	x.max=63.92	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=66.24	x.max=67.6	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=69.92	x.max=71.28	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=1e20	p.type	reg=1	x.min=73.6	x.max=74.96	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=1.84	x.max=3.2	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=5.52	x.max=6.88	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=9.2	x.max=10.56	y.min=0	y.max=0.15
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=12.88	x.max=14.24	y.min=0	y.max=0.15

doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=16.56	x.max=17.92	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=20.24	x.max=21.6	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=23.92	x.max=25.28	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=27.6	x.max=28.96	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=31.28	x.max=32.64	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=34.96	x.max=36.32	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=38.64	x.max=40	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=42.32	x.max=43.68	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=46.00	x.max=47.36	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=49.68	x.max=51.04	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=53.36	x.max=54.72	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=57.04	x.max=58.40	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=60.72	x.max=62.08	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=64.4	x.max=65.76	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=68.08	x.max=69.44	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=4E20	n.type	reg=1	x.min=71.76	x.max=73.12	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=1.36	x.max=1.84	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=3.2	x.max=3.68	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=5.04	x.max=5.52	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=6.88	x.max=7.36	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=8.72	x.max=9.2	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=10.56	x.max=11.04	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=12.4	x.max=12.88	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=14.24	x.max=14.72	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=16.08	x.max=16.56	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=17.92	x.max=18.4	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=19.76	x.max=20.24	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=21.6	x.max=22.08	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=23.44	x.max=23.92	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=25.28	x.max=25.76	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=27.12	x.max=27.6	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=28.96	x.max=29.44	y.min=0
y.max=0.15							
doping	uniform	conc=2E12	p.type	reg=1	x.min=30.8	x.max=31.28	y.min=0
y.max=0.15							

```

doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=32.64 x.max=33.12 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=34.48 x.max=34.96 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=36.32 x.max=36.8 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=38.16 x.max=38.64 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=40 x.max=40.48 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=41.84 x.max=42.32 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=43.68 x.max=44.16 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=45.52 x.max=46.00 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=47.36 x.max=47.84 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=49.2 x.max=49.68 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=51.04 x.max=51.52 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=52.88 x.max=53.36 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=54.72 x.max=55.2 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=56.56 x.max=57.04 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=58.4 x.max=58.88 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=60.24 x.max=60.72 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=62.08 x.max=62.56 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=63.92 x.max=64.4 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=65.76 x.max=66.24 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=67.6 x.max=68.08 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=69.44 x.max=69.92 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=71.28 x.max=71.76 y.min=0
y.max=0.15
doping uniform conc=2E12 p.type reg=1 x.min=73.12 x.max=73.6 y.min=0
y.max=0.15

```

```

#*****
*

```

```

contact name=anode
contact name=cathode

```

```

#save outf=SOI_m$"m"_ST013_SR.str

```

```

#***** Definição feixe de luz
*****

```

```

beam num=1 x.origin=37.48 y.origin=-5.5E4 angle=90.0 wavelength=0.2

```

```

output minset

```

```

#Definição de modelos

```

```
models kla bgn consrh fldmob optr klaaug print temp=300
solve init
```

```
method newton autonr trap maxtrap=10 carriers=2
solve prev
```

```
#Aplicação de tensão
```

```
solve vanode=0 vstep=-0.1 vfinal=-1.5 name=anode
```

```
log outf=SOI_m$"m"_ST013_HR.log master
```

```
solve b1=1E-3 lambda=0.2
solve b1=1E-3 lambda=0.22
solve b1=1E-3 lambda=0.24
solve b1=1E-3 lambda=0.26
solve b1=1E-3 lambda=0.28
solve b1=1E-3 lambda=0.30
solve b1=1E-3 lambda=0.32
solve b1=1E-3 lambda=0.34
solve b1=1E-3 lambda=0.36
solve b1=1E-3 lambda=0.38
solve b1=1E-3 lambda=0.39
solve b1=1E-3 lambda=0.40
solve b1=1E-3 lambda=0.41
solve b1=1E-3 lambda=0.42
solve b1=1E-3 lambda=0.43
solve b1=1E-3 lambda=0.44
solve b1=1E-3 lambda=0.45
solve b1=1E-3 lambda=0.46
solve b1=1E-3 lambda=0.47
solve b1=1E-3 lambda=0.48
solve b1=1E-3 lambda=0.49
solve b1=1E-3 lambda=0.5
solve b1=1E-3 lambda=0.52
solve b1=1E-3 lambda=0.54
solve b1=1E-3 lambda=0.56
solve b1=1E-3 lambda=0.58
solve b1=1E-3 lambda=0.6
solve b1=1E-3 lambda=0.62
solve b1=1E-3 lambda=0.64
solve b1=1E-3 lambda=0.66
solve b1=1E-3 lambda=0.68
solve b1=1E-3 lambda=0.7
solve b1=1E-3 lambda=0.72
solve b1=1E-3 lambda=0.74
solve b1=1E-3 lambda=0.76
solve b1=1E-3 lambda=0.78
solve b1=1E-3 lambda=0.8
solve b1=1E-3 lambda=0.82
solve b1=1E-3 lambda=0.84
solve b1=1E-3 lambda=0.86
solve b1=1E-3 lambda=0.88
solve b1=1E-3 lambda=0.9
solve b1=1E-3 lambda=0.92
solve b1=1E-3 lambda=0.94
solve b1=1E-3 lambda=0.96
solve b1=1E-3 lambda=0.98
solve b1=1E-3 lambda=1
```

```
Log off
```

```
#save outf=FINAL_Q_SOI2_HR_400.str
#tonyplot FINAL_Q_SOI2_HR_400.str
```

```
quit
```