



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

UFAM

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ADRIANO JORGE MENDONÇA LOUREIRO

**MEDIDA DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA PARA UM
SENSOR DE IMAGEM CMOS COM
TECNOLOGIA 3T-APS.**

Manaus-AM
2018

Suporte Financeiro



inct
institutos nacionais
de ciência e tecnologia

ADRIANO JORGE MENDONÇA LOUREIRO

**MEDIDA DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA PARA UM
SENSOR DE IMAGEM CMOS COM
TECNOLOGIA 3T-APS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) como requisito necessário para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Eduardo Adriano Cotta

AGRADECIMENTOS

Ao laboratório de óptica de matérias OptiMa-UFAM pelos recursos e equipamentos sem os quais não seria possível alcançar os objetivos deste trabalho.

Ao Centro de Tecnologia Eletrônica e da Informação – CETELI/UFAM pela disponibilização de infraestrutura para a formação teórica desse trabalho.

A fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM pela concessão dos recursos financeiros necessários a execução do projeto.

A minha esposa Luana Monteiro da Silva que sempre esteve ao meu lado dando o suporte necessário para a realização do trabalho.

Aos professores Dr. Eduardo Adriano Cotta e Dr. Carlos Cruz pelo auxílio nas questões relacionadas à física óptica e eletrônica, e também a todos os outros professores e colegas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento dessa dissertação.

RESUMO

Atualmente as câmeras digitais estão presentes em diversas tecnologias auxiliando na execução de diversas tarefas. O elemento principal da câmera digital é o sensor de imagem que absorve certa quantidade de fótons transformando-a em sinal elétrico para que um circuito de leitura identifique qual é o comprimento de onda da luz incidente, e consequentemente, a cor.

A facilidade com que o sensor transforma a energia da luz absorvida em energia elétrica é denominada eficiência quântica (EQ). Quanto maior a EQ, melhor é a qualidade na captura da imagem, principalmente em condições de baixa luminosidade.

Os dois principais tipos de sensores comercializados atualmente são o CCD e o CMOS, porém, o CMOS é o mais utilizado devido ao menor consumo energético. Devido à predominância de mercado dos sensores CMOS, a UFAM em parceria com a UFMG desenvolveu o projeto de um sensor de imagem do tipo CMOS 3T-APS para realização de estudos sobre essa tecnologia. Este sensor foi fabricado junto a outros circuitos dentro de um chip denominado IR2 que foi adquirido através de um consórcio entre universidades federais do Brasil.

Este trabalho apresenta uma metodologia para medir eficiência quântica em qualquer sensor de imagem fabricado com tecnologia CMOS 3T-APS. Os resultados obtidos com a aplicação dessa metodologia no sensor de imagem do chip IR2, foram plotados em um gráfico chamado de curva de eficiência quântica.

A curva de eficiência quântica plotada neste trabalho, mostra a quantidade de carga elétrica medida em função do número de fótons absorvidos para comprimentos de ondas compreendidos no intervalo de 457nm à 950nm. Essa curva é importante para se entender como funciona o sensor e facilitar a operação do mesmo nos próximos estudos relacionados ao chip IR2.

Palavras-chave: **sensores de imagem, imageadores, eficiência quântica, resposta espectral, sensibilidade luminosa.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 – Conexão da câmera com a TV para mostrar a imagem [46].	10
Figura 1. 2 – Eficiência quântica do sensor CMOS desenvolvido pela Photometrics [43].	11
Figura 1. 3 – Comparação entre dois dispositivos comercializados pela Sony[44]	11
Figura 2.1 – Diagrama de uma câmera digital [15].	13
Figura 2. 2 – Sensor CCD vs CMOS [32].	13
Figura 2. 3 – a) Capacitor MOS utilizado como elemento fotossensível, b) Arquitetura Interline Transfer da câmera CCD.	14
Figura 2. 5 - Sensor de Imagem CMOS PPS [28].	15
Figura 2. 6 – Esquema eletrônico do sensor de imagem CMOS 3T-APS.	16
Figura 2. 7 – Matriz de píxeis APS, adaptado de [3].	16
Figura 2. 8 – Ciclo de operação do sensor APS [adaptado de 28].	17
Figura 2. 9 – Operação do APS de acordo com incidência luminosa, adaptado de [28].	17
Figura 2. 10 – Saturação da fotografia devido à exposição à luz.	17
Figura 2. 11 – Sensor 3T-APS em modo logarítmico	18
Figura 2. 12 – Pixel com tecnologia 3T-APS em modo LIN-LOG [28].	18
Figura 2. 13 – Microfotografia do chip IR2, detalhe no sensor de imagem ampliado [7].	19
Figura 2. 14 – Píxeis Presentes no Chip IR2.	19
Figura 2. 15 – Diagrama de Blocos do chip IR2 [3].	20
Figura 2. 16 – Diagrama do circuito COLSEL	20
Figura 2. 17 – Sinais utilizados para o endereçamento sequencial do circuito ROWSEL [7].	21
Figura 2. 18 – diagrama do circuito COLSEL	22
Figura 2. 19 – Sinais utilizados para o endereçamento sequencial do circuito COLSEL [7].	22
Figura 2.20 – Diagrama do circuito T-Gate	23
Figura 2. 21 – diagrama do circuito RDR-RST.	23
Figura 2. 22 – (a) Chip IR2 onde o ponto quadrado representa o pino 1. (b) numeração dos pinos.	24
Figura 2. 23 – Circuito Step-Down inversor e Divisor de tensão [5].	24
Figura 2. 24 – Diagrama de Interligação para leitura e controle usando um Arduino [5].	25
Figura 3.1 – Conversão de luz em um sensor de imagem [6].	26
Figura 3. 2- Responsividade típica de um fotodetector de silício [22].	26
Figura 3. 3– (a) Fóton será absorvido para $hc/\lambda > E_g$. (b) e (c) Fóton não absorvido quando $hc/\lambda \leq E_g$ [8].	27
Figura 3. 4 – Fluxo de energia do fóton em $x=0$ e $x=dx$.	27
Figura 3. 5 – Coeficiente de absorção versus comprimento de onda para diferentes semicondutores [2].	28
Figura 3. 6 – Placa de silício atingida pela radiação de intensidade φ_0 .	29
Figura 3.7 – Circuito equivalente do fotodiodo.	30
Figura 3. 8 – Circuitos equivalentes para os modos de operação do fotodiodo (a) fotovoltaico (b) fotocondutivo.	31
Figura 3. 9 – Junção P-N polarizada reversamente.	33
Figura 3. 10 – Estrutura típica de um fotodiodo de junção P^+N adaptado de [1].	33
Figura 3. 11 – Microlente de SiO_2 aplicada sobre cada pixel para direcionar os fótons incidentes para a área sensível do pixel adaptado de [6].	34
Figura 3. 12 – Fotodiodos P-N, (a) $N+/P$ -SUBTRATE, (b) $P+/N$ -WELL, (c) N -WELL / P -SUBSTRATE [41].	34

Figura 3. 13 – Eficiência quântica para os três tipos de fotodiodo P-N, fabricado com tecnologia CMOS 0,8 μ m [41].	35
Figura 3. 14– aproximação para o fotodiodo.	36
Figura 3. 15 – Circuito 3T-APS adaptado de [36].	37
Figura 3. 16 - Circuito CDS tradicional [45].	37
Figura 3. 17 – Caminho dos fótons até a absorção.	39
Figura 4. 1 – Comprimentos de ondas usados para os experimentos de determinação da eficiência quântica do chip IR2.	41
Figura 4. 2 – Montagem do experimento para medir a tensão foto-gerada.	41
Figura 4. 3 – Arranjo experimental para o laser de 633nm.	41
Figura 4. 4 – Representação para cálculo do número de fótons incidentes.	42
Figura 4. 5 – Gabarito para controle do diâmetro do feixe incidente.	42
Figura 4. 6 – Pixel (0,0) descarregando no escuro e com aplicação de 500 μ W, 1mW e 2mW, para 2mW houve uma descarga de aproximadamente 0,75V (1,5V-0,75V) em 100 μ s.	43
Figura 4. 7 – Tensão descarregada na saída de cada pixel da matriz para a condição de escuro, ou seja, sem aplicação de luz no chip.	44
Figura 4. 8 – Resultado da leitura para 633nm para cada pixel da matriz.	45
Figura 4. 9 – Resultados do chip IR2 para: (a) Eficiência Quântica; (b) eficiência quântica externa e; (c) Responsividade.	49
Figura 4. 10 - Resultado obtida para chip IR2 comparado com sensores fabricados com tecnologia similar [6,18,23].	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Endereçamento binário para controle da matriz.	20
Tabela 2 – Sinais de entrada e saída do circuito ROWSEL.	21
Tabela 3 – Sinais de controle do endereçamento do circuito COLSEL.	21
Tabela 4 – sinais de seleção do modo de operação na tabela 4.	22
Tabela 5 – Sinais de entrada e saída do circuito COLSEL	22
Tabela 6 – Níveis de tensão analógica de alimentação do circuito RDR_RST utilizados para estabelecer o modo de operação da matriz no chip IR2.	23
Tabela 7 – Conjunto de parâmetros utilizados para 633 nm.	45
Tabela 8 - Tensão foto-gerada em Volts para o comprimento de onda de excitação de 633nm.	46
Tabela 9 - Corrente foto-gerada por cada pixel em nano ampère, calculadas a partir da equação 3.59.	46
Tabela 10 – Carga elétrica em pC.	47
Tabela 11 – Número de elétrons gerados ($\times 10^6$).	47
Tabela 12 – Eficiência quântica de cada pixel quando excitados pelo comprimento de onda de 633nm.	47
Tabela 13 – Responsividade de cada pixel em A/W de cada pixel quando excitados pelo comprimento de onda de 633nm.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	12
1.2. JUSTIFICATIVA.....	12
1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	12
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1. SENSOR DE IMAGEM CCD (<i>CHARGE-COUPLED DEVICE</i>).....	14
2.2. SENSOR DE IMAGEM CMOS PPS (<i>PASSIVE PIXEL SYSTEM</i>)	15
2.3. SENSOR DE IMAGEM CMOS APS (<i>ACTIVE PIXEL SYSTEM</i>)	15
2.4. SENSOR DE IMAGEM 3T-APS DO CHIP IR2.....	18
2.4.1. CIRCUITO <i>ROWSEL</i>	20
2.4.2. CIRCUITO <i>COLSEL</i>	21
2.4.3. CIRCUITO <i>T-GATE</i>	23
2.4.4. CIRCUITO <i>RDR-RST</i>	23
2.5. PINOS DE CONEXÃO DO SENSOR DE IMAGEM DO CHIP IR2	23
3. EFICIÊNCIA QUÂNTICA PARA UM SENSOR DE IMAGEM.....	26
3.1. ABSORÇÃO DA LUZ PELO SEMICONDUTOR	27
3.3. GERAÇÃO DE EXCITONS	28
3.4. CORRENTE FOTO-GERADA	29
3.5. EFICIENCIA QUÂNTICA NO FOTODIODO.....	30
3.6. TENSÃO FOTO-GERADA	31
3.7. FOTODIODO DE SILÍCIO.....	32
3.7.1. ESTRUTURAS TÍPICAS DE FOTODIODOS P-N UTILIZADOS EM SENSORES CMOS 3T-APS ...	34
3.7.3. CAPACITÂNCIA DE JUNÇÃO DO FOTODIODO.....	35
3.8. CARGA E DESCARGA DA CAPACITÂNCIA DO FOTODIODO.....	36
3.9. LEITURA DA TENSÃO FOTO-GERADA PARA O PIXEL 3T-APS	36
3.10. CÁLCULO DA CORRENTE FOTO-GERADA EM MODO LINEAR.....	38
3.11. CÁLCULO DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA EM MODO LINEAR	39
4. CONSTRUÇÃO DA CURVA DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA EM MODO LINEAR.....	41
4.1. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS.....	41
4.2. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA MEDIÇÃO DA TENSÃO FOTO-GERADA	42
4.2. OBTENÇÃO DOS DADOS NECESSÁRIOS PARA CONSTRUÇÃO DA CURVA EQ	45
4.6. O ESPECTRO DE EFICIÊNCIA QUÂNTICA.....	48

5. CONCLUSÃO	50
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICE A	54
APÊNDICE B.....	55
APÊNDICE C.....	61
APÊNDICE D	65
APÊNDICE E.....	68

1. INTRODUÇÃO

Em 1975, o engenheiro elétrico Steve Sasson construiu a primeira máquina fotográfica digital utilizando um sensor de imagem CCD, no qual era formada uma imagem em preto e branco de 100x400 píxeis (0,04 Mega píxeis). O equipamento era acoplado a um reprodutor de fita cassete para gravar as imagens e reproduzi-las em uma televisão [13].



Figura 1. 1 – Conexão da câmera com a TV para mostrar a imagem [46].

A primeira câmera digital não foi bem aceita na época devido à estética, ao alto custo para impressão das fotografias digitais e ao tempo necessário para formar a imagem, que era de aproximadamente vinte e três segundos. Mesmo assim, a ideia de capturar imagens, armazená-las em dispositivos digitais e visualizá-las instantaneamente impulsionou as pesquisas nessa área.

Os sensores de imagem digitais são formados por matrizes de elementos fotossensíveis chamados de píxeis, cada pixel tem a finalidade de converter a luz em um valor de tensão que é interpretado por um circuito que identifica e estipula uma cor em escala de cinza. *charge coupled device*

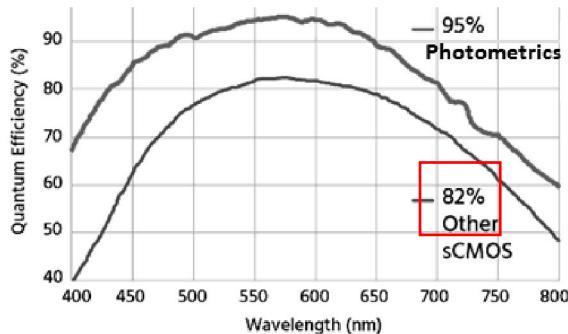
Os principais tipos de sensores digitais comerciais são o CCD (*Charged Couple Device*) e o CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Embora o CCD tenha sido a primeira tecnologia a ser comercializada, atualmente o sensor de imagem CMOS é o mais utilizado devido à integração dos circuitos de captura e processamento em um único chip, o que proporciona uma maior miniaturização dos dispositivos e redução dos custos de fabricação comparado com CCD.

Alguns problemas relacionados à tecnologia CMOS estão sendo fortemente estudados tais como o aumento da relação Sinal-Ruído (*SNR-Signal-to-Noise Ratio*), que expressa o quanto a amplitude do sinal de interesse se sobressai em relação à amplitude do ruído [3]; e o aumento do fator de preenchimento (*fill-factor*), que é a área fotossensível do pixel; e a eficiência quântica que ajuda na definição da cor da luz incidente.

A eficiência quântica mede a carga elétrica convertida a partir do número de fótons absorvidos pelo dispositivo, ou seja, representa à facilidade com que o dispositivo converte a luz em eletricidade. Um dos grandes obstáculos para melhorá-la é o aumento do *fill-factor*, que na maioria dos dispositivos CMOS é de aproximadamente 50%.

A figura 1.2 mostra a eficiência quântica de um sensor de imagem produzido pela empresa Photometrics cuja eficiência quântica chega até 95% no intervalo de 550 a 600nm, os detalhes sobre a tecnologia podem ser encontrados no site da empresa [43].

eficiência quântica interna e não a total. Além disso, fundamentalmente, a eficiência quântica não depende do *fill factor*, pois é calculada apena na área fotossensível. Responsividade também não considera o fator de preenchimento.

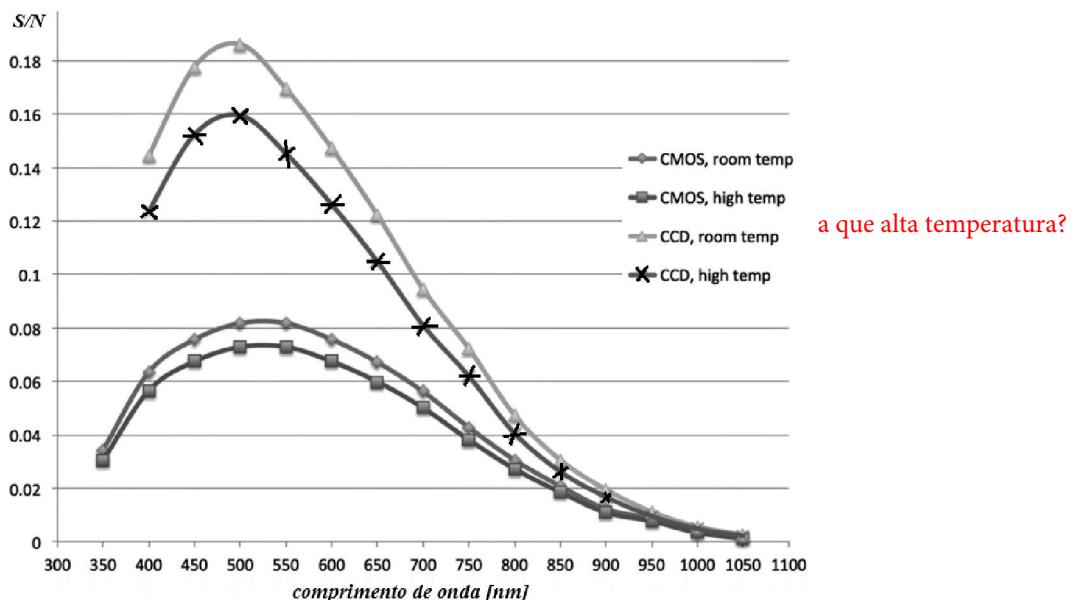


É menos recomendável utilizar dados de uma empresa, pois várias vezes são medidos sob condições desconhecidas que podem favorecer intencionalmente seu próprio produto. Revelar que a curva de outros sensores é no máximo 82% sem indicar que outros sensores, é uma informação rasa.

Figura 1. 2 – Eficiência quântica do sensor CMOS desenvolvido pela Photometrics [43].

não necessariamente para amplificação.

Os sensores CMOS possuem transistores de amplificação acoplados aos elementos fotosensíveis, esses transistores geram ruídos peculiares a esta tecnologia, por isso, várias técnicas vêm sendo desenvolvidas para minimizar este problema. A figura 1.3 mostra a relação entre eficiência quântica e ruído de leitura entre dois dispositivos sendo um CCD (ICX274) e outro CMOS (IMX174) ambos comercializados pela empresa Sony. Neste caso, nota-se uma melhor relação sinal/ruído (S/N) do sensor CCD em relação ao CMOS e quanto maior essa relação melhor é a qualidade na imagem capturada.



a que alta temperatura?

Figura 1. 3 – Comparação entre dois dispositivos comercializados pela Sony[44]
acho este argumento mais fraco, pois a volatilidade é alta.

Os dispositivos CCD continuarão durante muito tempo no mercado devido a grande quantidade já produzida e também a ao maior fill-factor que é importante para algumas aplicações específicas, tais como cromatografia e astronomia. Mas provavelmente, considerando o rápido avanço da tecnologia CMOS, esta ~~essa~~ terá o monopólio do mercado em um futuro próximo.

Este trabalho propõe uma metodologia para medição da eficiência quântica nos imageadores do tipo CMOS APS (do inglês Active Pixel Sensor) ou mais especificamente os do tipo 3T-APS que possuem 3 transistores em cada pixel.

já introduziu a abreviação antes no texto?

Foi realizada uma vasta análise da literatura especializada. Entretanto, todos os artigos e textos relacionados com métodos e protocolos de medidas da EQ apresentam resultados sem detalhes experimentais. Dessa forma, este trabalho se apresenta como uma proposta de protocolo

A norma EMVA 1288 (disponível online) tem um procedimento bem definido e minha aluna de mestrado Édilla Fernandes defendeu sua dissertação sobre "Montagem experimental para caracterização de câmeras digitais", no PPGEE/UFMG em 2011. A dissertação pode ser encontrada online no site do PPGEE. Publicamos no IMEKO/SEMETRO.

para medidas de EQ em câmeras CMOS 3T-APS, apresentando os modelos teóricos e procedimentos experimentais detalhados para a determinação da eficiência quântica em sensores deste tipo.

1.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A eficiência quântica é uma ferramenta fundamental para determinação da qualidade e da faixa do espectro de luz em que um sensor de imagem pode operar satisfatoriamente. Porém, a escassa literatura sobre os métodos e protocolos para determinação e registro da eficiência quântica em sensores de imagem do tipo 3T-APS, apresenta poucos detalhes técnicos.

Este trabalho explorará os aspectos físicos mais relevantes sobre a eficiência quântica em sensores 3T-APS, além de registrar experimentalmente o espectro de eficiência quântica para o chip IR2, expondo todos os detalhes sobre o procedimento utilizado.

1.2. JUSTIFICATIVA

talvez não com o objetivo específico, mas esses resultados aparecem em alguns papers.

Não há estudos com objetivo específico de medir a eficiência quântica de um faixa especial em sensores do tipo CMOS 3T-APS. Dessa forma, este trabalho além de fornecer fundamentação teórica sobre essa tecnologia (CMOS 3T-APS), também propõe uma metodologia para medir a eficiência quântica em qualquer dispositivo fabricado com esta tecnologia.

Como o sensor de imagem do chip IR2 será alvo de outros estudos, este trabalho se faz necessário ao direcionamento correto dos trabalhos futuros.

1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA

Entender os fenômenos que geram a conversão de luz em fotocorrente em um sensor que utiliza a tecnologia 3T-APS; Em seguida, propor uma metodologia para medir a eficiência quântica de um chip 3T-APS em modo linear; Posteriormente, confeccionar o sistema necessário para execução dos experimentos necessários à obtenção da eficiência quântica; E por último, plotar o gráfico da eficiência quântica para o chip IR2.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 8 sessões divididas em:

1. Introdução onde é exposta a proposta e motivação para execução do trabalho;
2. Fundamentação teórica onde é explicado o princípio de funcionamento dos sensores de imagem e os detalhes técnicos sobre o chip IR2;
3. Eficiência quântica onde é exposta a física e a eletrônica aplicadas ao sensor 3T-APS operando em modo linear;
4. Metodologia para medida da eficiência quântica onde será apresentado o processo de obtenção dos dados e o aparato necessário para executar o procedimento e os cálculos a serem efetuados;
5. Conclusão;
6. Referências Bibliográficas;
7. Apêndices.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As câmeras digitais estão presentes em praticamente todos os telefones celulares existentes atualmente, sendo também utilizadas em carros, casas, eletrodomésticos, computadores, robôs, microscópios, satélites espaciais, entre outros. A figura 2.1 mostra um esquema básico de uma câmera digital.

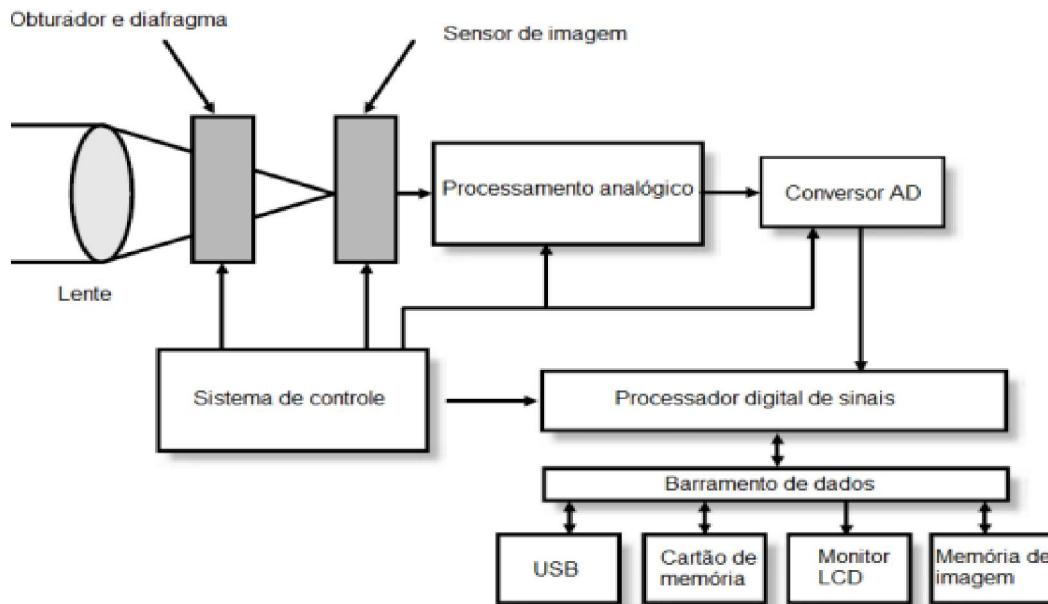


Figura 2.1 – Diagrama de uma câmera digital [15].

Esta é a função de um fotodetector. O sensor de imagem vai além, através de uma matriz!

Os sensores de imagem são dispositivos cuja função é captar a luz e convertê-la em sinal elétrico. Os sensores utilizados em câmeras digitais são fabricados em semicondutores através de duas tecnologias: CCD e CMOS.

As duas tecnologias são compostas por vários blocos distintos que incluem os píxeis, o processamento de sinais analógicos, o conversor analógico/digital, o clock, a lógica digital e as memórias [19].

Os píxeis são os elementos fotossensíveis que estão estruturados em uma matriz bidimensional e são acionados e lidos individualmente para composição da imagem. Na tecnologia CCD exige-se um controle externo ao chip para a leitura e amplificação das cargas armazenadas em cada pixel. Mas na tecnologia CMOS 3T-APS, a amplificação é feita em cada pixel. Além disso, todo circuito de controle pode ser colocado no mesmo chip [17], figura 2.2, com isso é possível miniaturizar significativamente o dispositivo e trazer mais funcionalidades ao sensor de imagem.

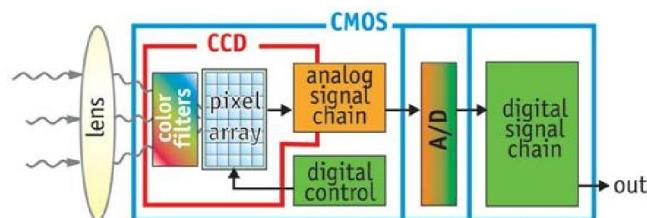


Figura 2.2 – Sensor CCD vs CMOS [32].

2.1. SENSOR DE IMAGEM CCD (*CHARGE-COUPLED DEVICE*)

No início da década de 80, os sensores de imagem CCD apresentavam qualidade bem superior aos CMOS. Isso impulsionou a maior parte das pesquisas no desenvolvimento dessa tecnologia que, ao longo das duas décadas seguintes, dominou áreas fundamentais como fotografia e aplicações científicas.

O sensor de imagem CCD utiliza um capacitor MOS [51] como elemento fotossensível do pixel (figura 2.3a), sendo a arquitetura de matriz mais utilizada a *Interline Transfer* (figura 2.3b). Nessa arquitetura, os fótons incidentes são convertidos em cargas elétricas, que são acumuladas durante o tempo de exposição. Posteriormente são transferidas para os registradores verticais e depois para o registrador horizontal para finalmente serem amplificados.

O dispositivo CCD possui fator de preenchimento de aproximadamente 100%, isso aperfeiçoa a absorção dos fótons incidentes e, consequentemente, aumenta sua sensibilidade em relação ao CMOS.

A maior desvantagem da tecnologia CCD está no consumo de energia, que chega a ser cem vezes superior à CMOS. Isso se deve principalmente ao fato dos sistemas de amplificação, controle e leitura serem externos ao chip. mas também aos altos valores de tensão que devem ser praticados nos eletrodos dos píxeis.

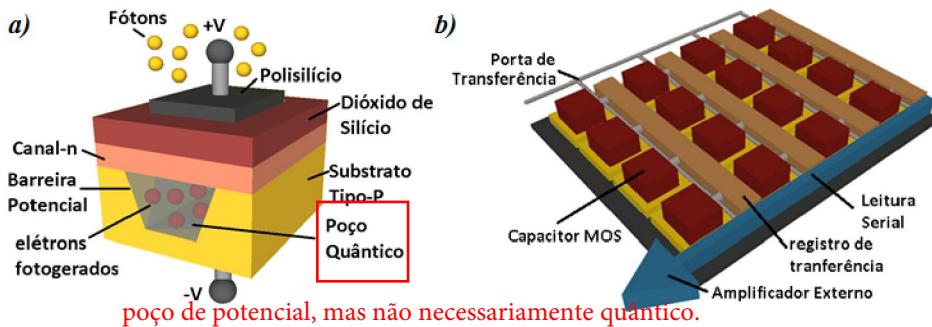


Figura 2.3 – a) Capacitor MOS utilizado como elemento fotossensível, b) Arquitetura *Interline Transfer* da câmera CCD, cores fantasia.

Apesar da superioridade dos sensores CCD, os sensores CMOS continuaram a ser estudados devido a quatro fatores: 1) menor custo de fabricação; 2) menor consumo de energia; 3) possibilidade de miniaturização do dispositivo; e 4) alta resistência a radiações cósmicas.

A crescente demanda por dispositivos *mobile* foi o fator predominante para evolução dos sensores CMOS. Além de possuírem eficiência enérgica superior ao CCD, eles podem ser produzidos às centenas em um único processo de fabricação, facilitando a integração de leitura e controle no mesmo chip.

Historicamente, o fator econômico forçou a utilização em massa dos sensores CMOS por volta de 2006, mesmo tendo qualidade de imagem inferior aos dispositivos CCD's até então produzidos. Ao longo dos últimos dez anos, os sensores CMOS ganharam força se tornando os principais sensores de imagem comercializados atualmente.

Os transistores dentro do pixel, figura 2.4, reduzem o fator de preenchimento e também aumentam o ruído FPN (do inglês *Fixed Pattern Noise*) que representa a falta de uniformidade nos valores de saída dos píxeis em um sensor de imagem digital sob uma iluminação uniforme.

A presença dos transistores também promove diminuição da área fotossensível, o que resulta na redução na relação sinal-ruído, e consequentemente, na diminuição da qualidade das imagens, principalmente em condições de baixa luminosidade.

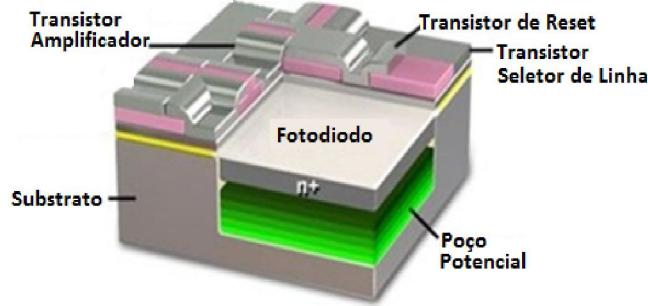


Figura 2. 4 – Sensor de Imagem CMOS 3T-APS mostrando a área do fotodiodo, adaptado de [33].

2.2. SENSOR DE IMAGEM CMOS PPS (PASSIVE PIXEL SYSTEM)

É um sensor de imagem CMOS em que a amplificação do sinal não é feita no pixel, por isso recebe o nome de passivo. Neste sensor, os fótons incidem no pixel durante certo tempo, sendo absorvidos e, convertidos em cargas elétricas. O transistor de passagem é habilitado para que haja a transferência da carga gerada para o amplificador.

Os sensores PPS (figura 2.5) possuem como vantagem, o alto fator de preenchimento, e como desvantagem, a baixa relação sinal ruído e o alto tempo de resposta.

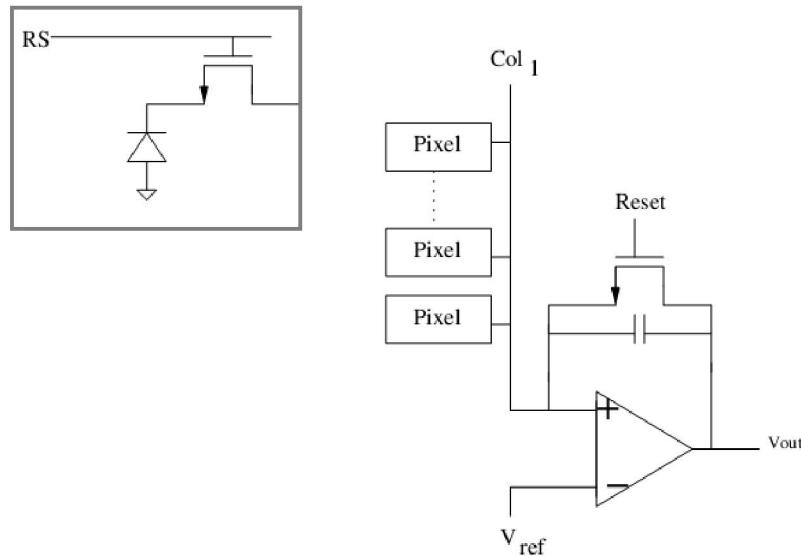


Figura 2. 4 - Sensor de Imagem CMOS PPS [28].

2.3. SENSOR DE IMAGEM CMOS APS (ACTIVE PIXEL SYSTEM)

O sensor de imagem APS recebe esse nome devido ao fato de possuir transistores amplificadores dentro do pixel. O primeiro circuito utilizando o APS foi desenvolvido pelo laboratório da NASA Jet Propulsion Lab e continha em um mesmo chip uma matriz de 128x128 pixels, geradores de *clock*, circuitos de controle e de supressão de ruído [26].

A principal característica do APS é a presença do amplificador dentro do pixel, o que aumenta a relação sinal ruído. Por outro lado, isto também gera uma diminuição do fator de preenchimento e da sensibilidade do sensor.

O presente trabalho tem por objetivo analisar um sensor de imagem que utiliza esta tecnologia, cujo pixel possui um fotodiodo (PD) e três transistores, sendo um de reset (*RESET*), um de amplificação (*BUFFER*) e um de seleção de linha (*ROWSEL*), como pode ser visto no esquema figura 2.6.

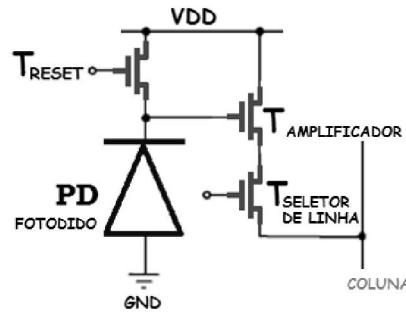


Figura 2. 5 – Esquema eletrônico do sensor de imagem CMOS 3T-APS.

O fotodiodo é um dispositivo semicondutor de junção P-N, no qual possui uma capacitância associada à camada de depleção. Essa capacitância é carregada através da fonte V_{DD} e o controle de carga é feito pelo transistor de *RESET*, quando iluminado por certo tempo, aumentando sua condutância e descarregando a carga adquirida. O transistor de *BUFFER* é responsável por fazer a amplificação do sinal facilitando a leitura. Por fim, o transistor de seleção de linha é acionado para liberar a leitura da tensão presente no fotodiodo após a descarga do capacitor.

O sensor é formado por uma matriz bidimensional de pixels APS (figura 2.7), a leitura da tensão de saída de cada pixel é interpretada para se gerar a cor em cada pixel. mas também, e mais importante, para desacoplar a capacitância do fotodiodo da capacitância de linha de leitura, reduzindo o ruído kTC e também atrasos na propagação do sinal e pixels alternados compartilhando a linha.

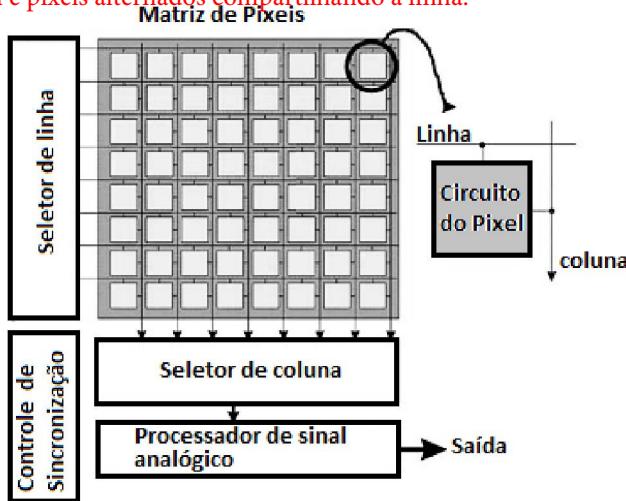


Figura 2. 6 – Matriz de píxeis APS, adaptado de [3].

Normalmente, a leitura da matriz de pixels funciona na sequência linha por coluna, ou seja, para a primeira coluna, é feita a leitura de todas as linhas e depois o mesmo procedimento é efetuado para a segunda coluna e assim por diante. O Pixel 3T-APS pode operar em dois modos, linear (LIN) e logarítmico (LOG), porém os dois podem ser combinados obtendo-se o modo linear-logarítmico (LIN-LOG).

Em modo linear o transistor de *RESET* é acionado apenas para carregar o fotodiodo, sendo desligado após a carga para que haja a descarga do capacitor. Esta descarga acontece durante um certo tempo denominado “tempo de exposição”, no qual é acionado o transistor *ROWSEL* para

ou tempo de integração (que inclusive é mais correto, já que o píxel pode continuar exposto, porém não mais integrando).

na verdade não há porque manter um tempo de exposição maior que o de integração.

leitura do pixel. O intervalo de tempo entre o instante da leitura da tensão de saída e início da exposição do pixel é chamado de tempo de integração (t_{int}). A figura 2.8 mostra o ciclo de operação do pixel dividido em dois períodos diferentes: tempo de RESET e tempo de exposição. Para o correto funcionamento do pixel, o tempo de integração deve ser menor ou igual ao tempo de exposição.

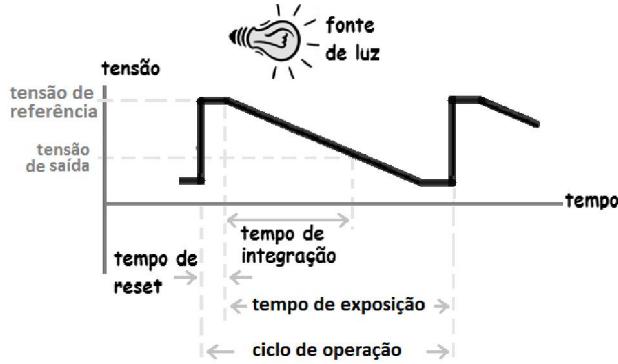


Figura 2.7 – Ciclo de operação do sensor APS.

Quanto maior a intensidade luminosa, mais rapidamente o pixel irá descarga e se o tempo de integração não for menor ou igual ao tempo para a descarga completa do pixel, o resultado obtido uma imagem branca sem muitos detalhes [17]. A figura 2.9 mostra a descarga do pixel para quatro níveis de intensidade de luz. Quando a leitura é feita após a descarga do pixel, diz-se que o pixel está saturado.

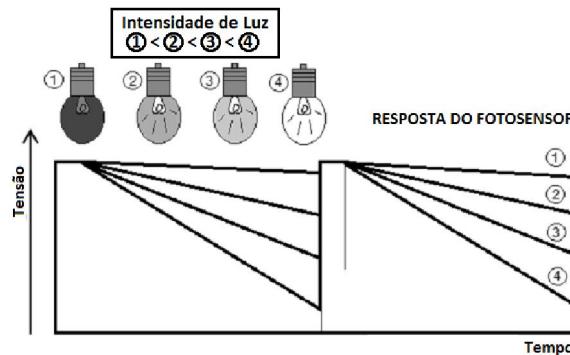


Figura 2.8 – Operação do APS de acordo com incidência luminosa, adaptado de [28].

Além do modo linear, existe o modo de operação logarítmico que minimiza o problema da saturação da imagem e aumenta o alcance dinâmico (*DR – Dynamic Range*). O DR é definido como a relação entre o maior sinal de entrada não saturado e o menor sinal detectável. A figura 2.10-a mostra a saturação do sensor e na figura 2.10-b observa-se uma melhora na fotografia através do aumento do alcance dinâmico, influenciando diretamente na qualidade da captura de imagens.

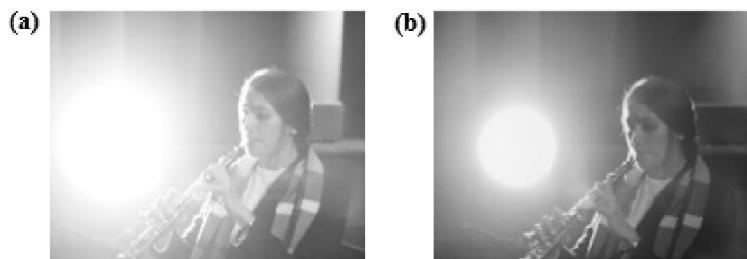


Figura 2.9 – Saturação da fotografia devido à exposição à luz.

O sensor operando em modo logarítmico funciona basicamente através da interligação permanente do *gate* do transistor de *RESET* com a fonte. Isto faz com que ele funcione como um diodo polarizado diretamente (figura 2.11). Dessa forma, a capacitância do fotodiodo estará constantemente carregada e sempre que houver incidência luminosa sobre ele, o capacitor será descarregado e a tensão de saída será reduzida. Nesse modo de operação a variação de tensão quase instantânea, permitindo que sua saída seja registrada através de amostragens discretizadas.

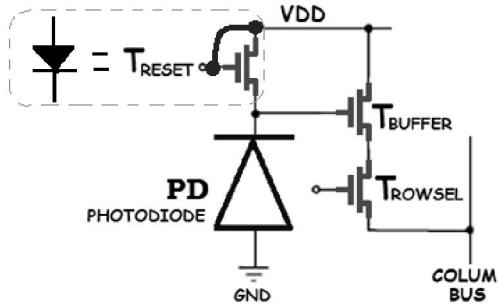


Figura 2. 10 – Sensor 3T-APS em modo logarítmico

Para baixos níveis de luminosidade, o nível de tensão registrado na saída durante o carregamento e após a exposição praticamente não sofre variação; nestas condições, do ponto de vista de uma imagem produzida, o observador veria sempre uma imagem escura sem muitos detalhes [17].

Já o LIN-LOG combina os benefícios do modo linear e do logarítmico. Em outras palavras, esta arquitetura mantém a sensibilidade de imagem em baixa luminosidade utilizando a resposta em modo linear e comprime a imagem em alta luminosidade através da resposta logarítmica. Esta técnica amplia o alcance dinâmico da imagem produzida [6].

O princípio de funcionamento do modo LIN-LOG se baseia na seleção automática do modo de operação em função da intensidade da luz incidente. A figura 2.12 mostra o princípio de funcionamento do pixel 3T-APS em modo LIN-LOG.

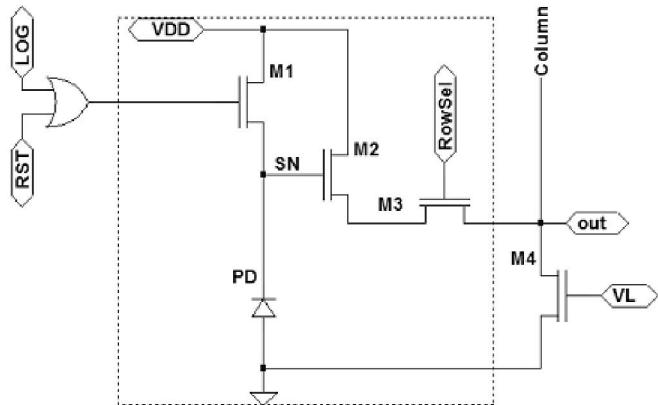


Figura 2. 11 – Pixel com tecnologia 3T-APS em modo LIN-LOG [28].

2.4. SENSOR DE IMAGEM 3T-APS DO CHIP IR2

O chip utilizado neste estudo foi fabricado com tecnologia $0,35\mu m$ através de uma parceria entre diferentes universidades brasileiras que foi e financiada pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Nanodispositivos Semicondutores (INCT:DISSE). Devido a isso, possui vários circuitos

diferentes, cada um com uma finalidade a ser utilizada por uma das universidades envolvidas no consórcio. Em particular, o sensor de imagem 3T-APS é alvo de vários estudos na UFAM, sendo um deles, este sobre eficiência quântica.

O chip IR2 possui um sensor de imagem do tipo 3T-APS que é formado por uma matriz de píxeis de oito linhas por oito colunas. Os transistores presentes nos circuitos possuem canal com largura $0,7\mu m$ e comprimento $0,35\mu m$. A figura 2.13 mostra uma microfotografia do chip dando atenção especial ao sensor de imagem CMOS em análise neste estudo.

Cada pixel do sensor tem a forma quadrada com $10\mu m$ de lado, além disso, oito dos sessenta e quatro píxeis foram intencionalmente cobertos por uma camada de metal com intuito de bloquear parcialmente ou completamente a incidência da luz no pixel para fins comparativos, dessa forma foi possível identificar a forma correta para o endereçamento dos píxeis da matriz.

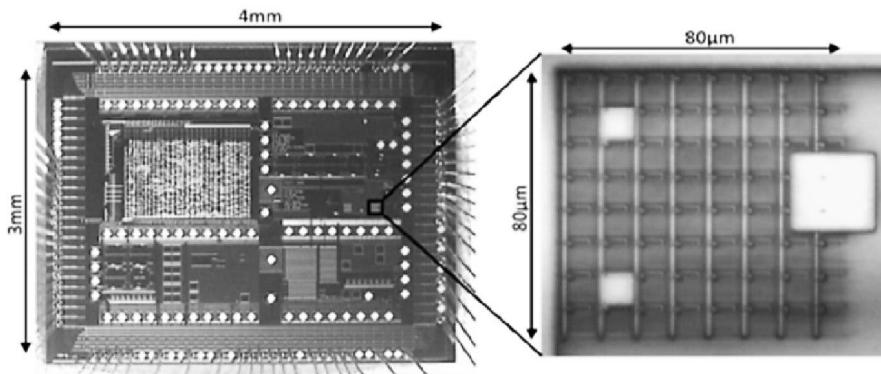


Figura 2. 12 – Microfotografia do chip IR2, detalhe no sensor de imagem ampliado [7].

O IR2 foi projetado para trabalhar nos três modos de operação: linear, logarítmico e LIN-LOG; dependendo apenas da configuração dos níveis de tensão para V_{RDR} e V_{RST} . A figura 2.14 mostra o esquema de funcionamento dos píxeis em que o circuito RDR-RST é responsável por controlar os níveis mínimos de tensão para V_{RDR} e V_{RST} .

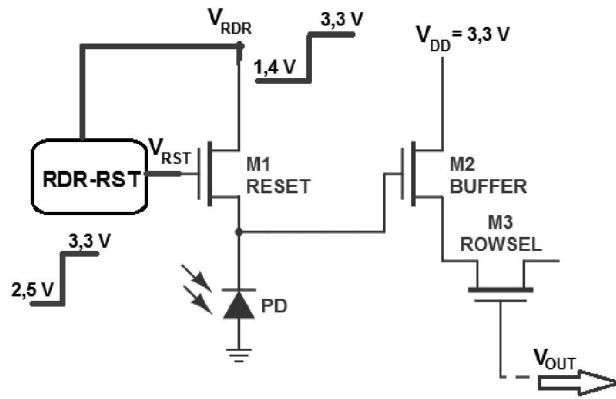


Figura 2. 13 – Píxeis Presentes no Chip IR2.

O diagrama de blocos do sensor é mostrado na figura 2.15, que indica os circuitos auxiliares para o controle e leitura:

- 1) ROWSEL: Seleciona a linha da matriz que será lida;
- 2) COLSEL: Seleciona a coluna da matriz que será lida;
- 3) TGATE: Controla o instante em que o pixel é lido;
- 4) RDR-RST: Controla o modo de operação do pixel, linear, logarítmico ou LIN-LOG;

- E_RST: Sinal analógico para nível baixo do RESET ($V_{RST} = 0$ ou $2,5V$).
- E_RDR: Sinal analógico para nível baixo do V_{RDR} ($V_{RDR} = 0$ ou $1,4$ ou $3,3V$).

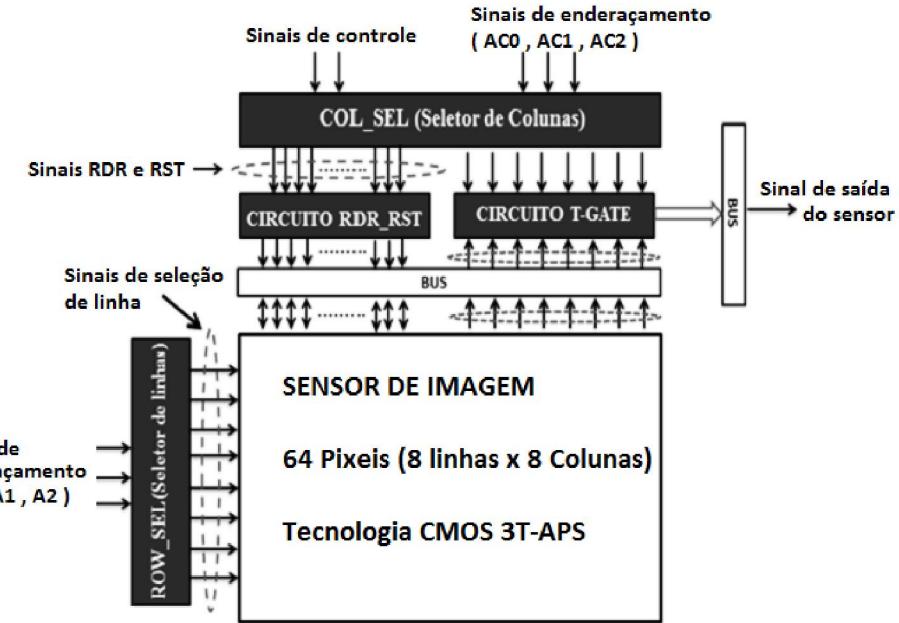


Figura 2. 14 – Diagrama de Blocos do chip IR2 [3].

2.4.1. CIRCUITO ROWSEL

O circuito ROWSEL tem a função de selecionar as linhas da matriz. Trata-se de um circuito DEMUX responsável pela escolha de uma das oito saídas através do código binário mostrado na tabela 1, seu diagrama é apresentado na figura 2.16.

Tabela 1 – Endereçamento binário para controle da matriz.

A ₀	A ₁	A ₂	SAÍDA
0	0	0	ROWSEL0
0	0	1	ROWSEL1
0	1	0	ROWSEL2
0	1	1	ROWSEL3
1	0	0	ROWSEL4
1	0	1	ROWSEL5
1	1	0	ROWSEL6
1	1	1	ROWSEL7

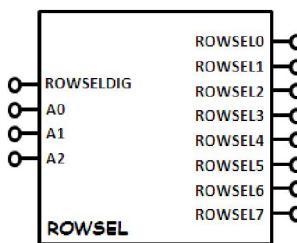


Figura 2. 15 – Diagrama do circuito COLSEL

Os píxeis podem ser selecionados em sequência e podem ser controlados manualmente ou através de software. A figura 2.17 mostra o sincronismo necessário para a seleção das linhas na sequência da linha 0 até a linha 7.

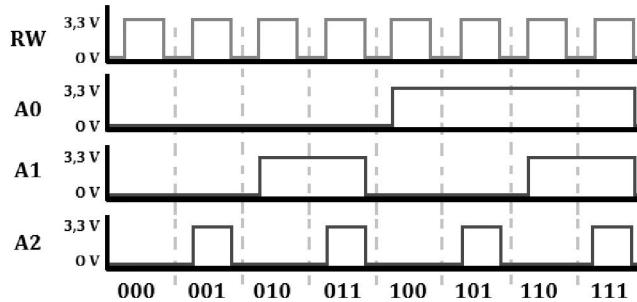


Figura 2. 16 – Sinais utilizados para o endereçamento sequencial do circuito *ROWSEL* [7].

A descrição da função, tipo e conexão para cada sinal está resumida na tabela 2.

Tabela 2 – Sinais de entrada e saída do circuito *ROWSEL*.

SINAL	FUNÇÃO	TIPO	NÍVEL (V)	CONEXÃO
A0, A1, A2	Controle do endereçamento do pixel	Dig. (0 ou 1)	0 ou 3,3	Arduino – Inversor – Chip IR2
<i>ROWSELDIG</i>	Controle da leitura do pixel	Dig. (0 ou 1)	0 ou 3,3	Arduino – Inversor – Chip IR2
<i>ROWSEL0</i> , ... <i>ROWSEL7</i>	É o endereço da Linha ativada para a leitura	Dig. (0 ou 1)	0 ou 3,3	Dentro do CHIP IR2

2.4.2. CIRCUITO *COLSEL*

Tem por função executar a demultiplexação dos sinais de colunas da matriz, ou seja, atuar na seleção de colunas da matriz de píxeis e também pelo controle do modo de operação. Os sinais de controle do endereçamento na tabela 3, os sinais de seleção do modo de operação na tabela 4 e a tabela 5 trás a descrição da função, tipo e conexão para cada sinal do circuito *COLSEL*.

Tabela 3 – Sinais de controle do endereçamento do circuito *COLSEL*.

AC0	AC1	AC2	SAÍDA
0	0	0	COL0
0	0	1	COL1
0	1	0	COL2
0	1	1	COL3
1	0	0	COL 4
1	0	1	COL 5
1	1	0	COL 6
1	1	1	COL 7

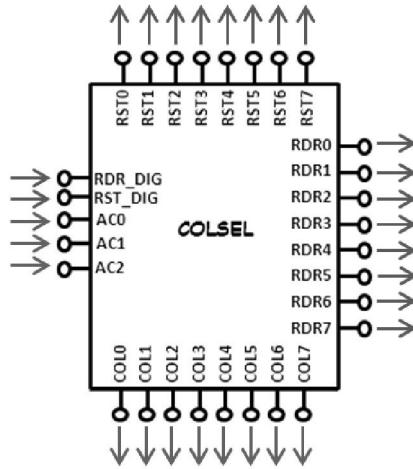


Figura 2. 17 – diagrama do circuito *COLSEL*

Tabela 4 – sinais de seleção do modo de operação na tabela 4.

RST_DIG	RDR_DIG	COL	RSTx	RDRx
0	0	1	0	0
0	1	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	1	1	1
X	X	0	0	0

Tabela 5 – Sinais de entrada e saída do circuito *COLSEL*

SINAL	FUNÇÃO	TIPO	NÍVEL (V)	CONEXÃO
AC0,AC1,AC2	Controle do endereço do pixel	Dig. (0 / 1)	0 / 3,3	Arduino – Inversor – Chip IR2
RDR_DIG e RSTD_DIG	Controle do modo de operação do pixel.	Dig. (0 / 1)	0 / 3,3	Arduino – Inversor – Chip IR2
RST0,...,RST7	É o sinal de controle de RESET de cada coluna da matriz	Dig. (0 / 1)	0 / 3,3	Interno ao CHIP IR2

A figura 2.19 mostra o comportamento das ondas quadráticas nos terminais de endereçamento do circuito *COLSEL*, para que a seleção de cada coluna seja feita periodicamente através da combinação binária de AC0, AC1 e AC2.

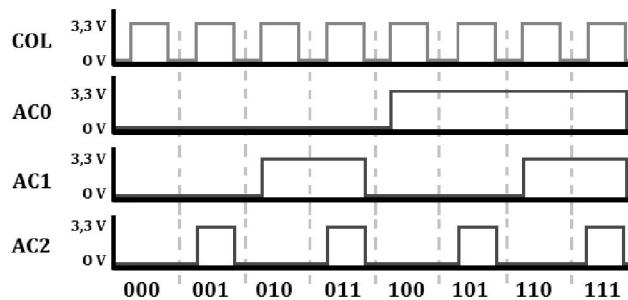


Figura 2. 18 – Sinais utilizados para o endereçamento sequencial do circuito *COLSEL* [7].

Para a geração das tensões V_{RDR} e V_{RST} , é necessário que se tenha a presença do sinal de coluna correspondente à posição do pixel em estudo e também os sinais *RST* e *RDR* que são acionados externamente através de controle manual ou automático com a utilização de microcontroladores como, por exemplo, o arduino.

2.4.3. CIRCUITO T-GATE

O circuito **T-GATE** (figura 2.20) é um circuito composto de chaves controladas, que determina quando o pixel será lido. Os sinais provenientes da matriz 00 à 07 são repassados para a saída do circuito T-GATE de acordo com os sinais de habilitação COL0 à COL7.

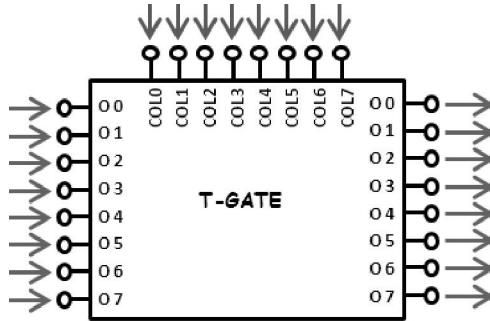


Figura 2.19 – Diagrama do circuito T-Gate

2.4.4. CIRCUITO RDR-RST

Esse circuito controla o modo de operação do pixel, linear, logarítmico ou LIN-LOG através da modulação dos sinais de controle vindos do circuito **COLSEL**. Assim, os sinais de entrada **RST_x** e **RDR_x** são sinais digitais que controlam os sinais **RST** e **RDR** que são os sinais de **RESET** e **VDD** respectivamente, sendo x o índice da coluna do pixel analisado.

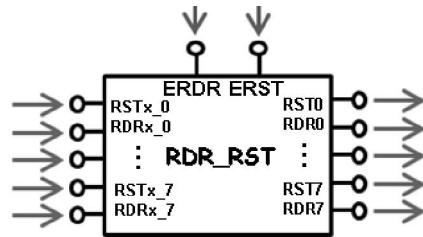


Figura 2. 20 – diagrama do circuito RDR-RST.

Os sinais **ERDR** ($1.4V$) e **ERST** ($2.5V$) são entradas analógicas DC de valores V_{RDR} ($1.4V$) e V_{RST} ($0, 2.5V$ ou $3.3V$), responsáveis por modular os sinais **RST_x** e **RDR_x**. Os valores de tensões configurados para cada um define o modo de operação do chip IR2 e podem ser vistos na tabela 6.

Tabela 6 – Níveis de tensão analógica de alimentação do circuito RDR_RST utilizados para estabelecer o modo de operação da matriz no chip IR2.

MODO DE OPERAÇÃO	ERDR	ERST
LINEAR	$3,3\text{ V}$	0 V
LOGARÍTIMO	$3,3\text{ V}$	$3,3\text{V}$
LIN-LOG	$1,4\text{ V}$	$2,5\text{ V}$

2.5. PINOS DE CONEXÃO DO SENSOR DE IMAGEM DO CHIP IR2

Para acionarmos o chip IR2 (figura 2.22-a) é necessário atentar para a correta interligação dos pinos do chip. A figura 2.22-b mostra um esquemático da vista frontal do socket onde estão

indicados os pinos a serem utilizados para interligação do sensor de imagem. Neste ponto é muito importante atentar para o pontinho quadrado no chip, esse ponto representa o pino 1 (V_{DD}).

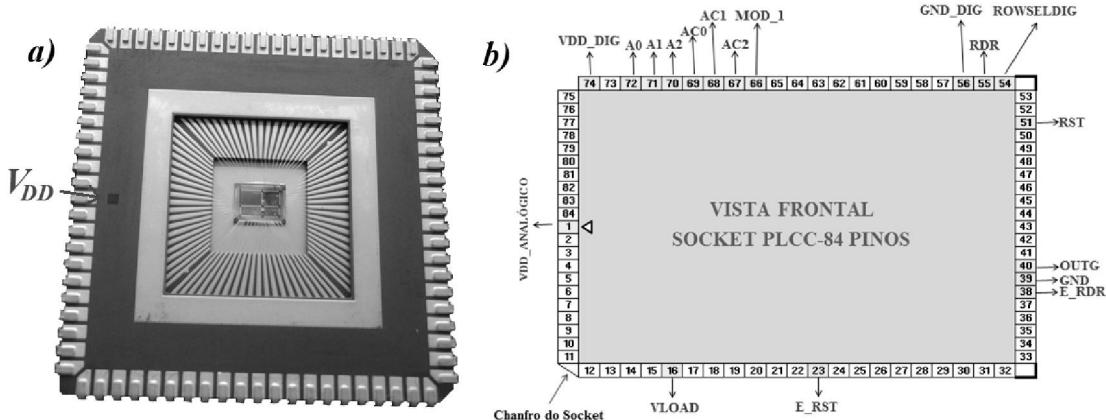
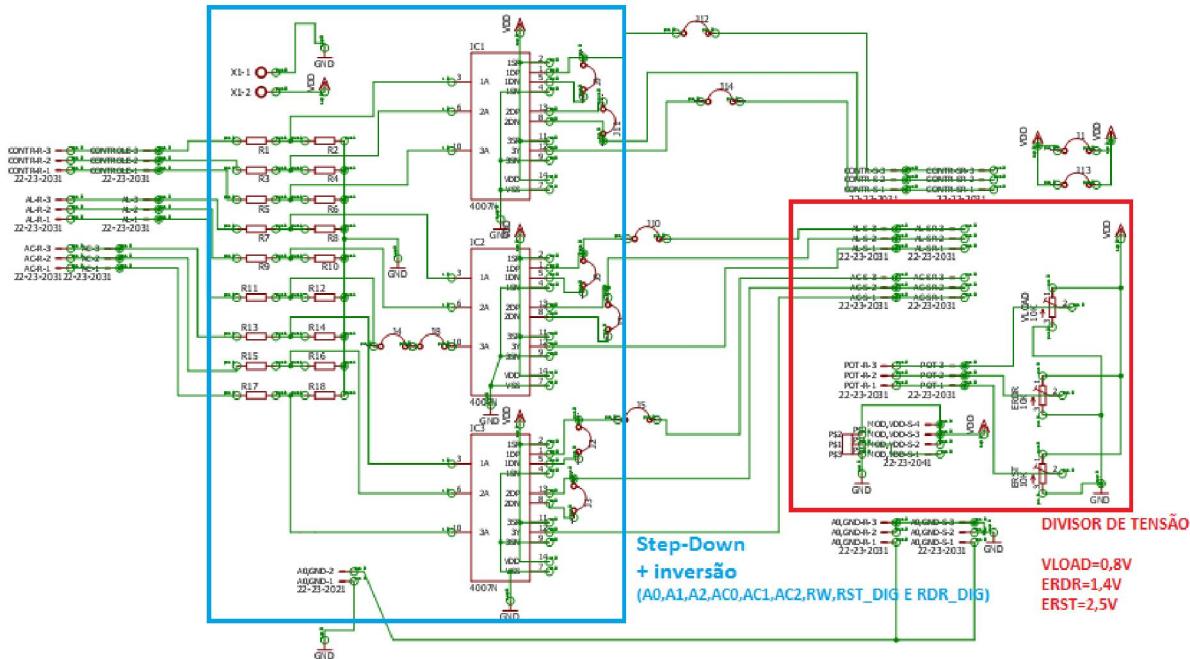


Figura 2.21 – (a) Chip IR2 onde o ponto quadrado representa o pino 1. (b) numeração dos pinos.

O controle e a leitura do chip IR2 são realizados usando um microcontrolador do tipo Arduino UNO cujas saídas digitais tem valor de tensão de 5V, porém, a tensão correta para alimentação e controle do sensor é 3,3V. Para evitar problemas com o chip, o circuito esquemático da figura 2.23 foi construído para executar o Step-Down de 5V para 3,3V, porém, faz também a inversão lógica das saídas, as tensões $VLOAD = 0,8V$ e $ERDR$ e $ERST$ são fornecidas ao chip através de divisores tensão.



Como há a inversão lógica das saídas, o software para controle é feito através de lógica inversa. O Diagrama de interligação completo para controle do chip é mostrado na figura 2.24 e os códigos fonte utilizados para controle e leitura da matriz de píxeis estão disponibilizados nos apêndices A e B.

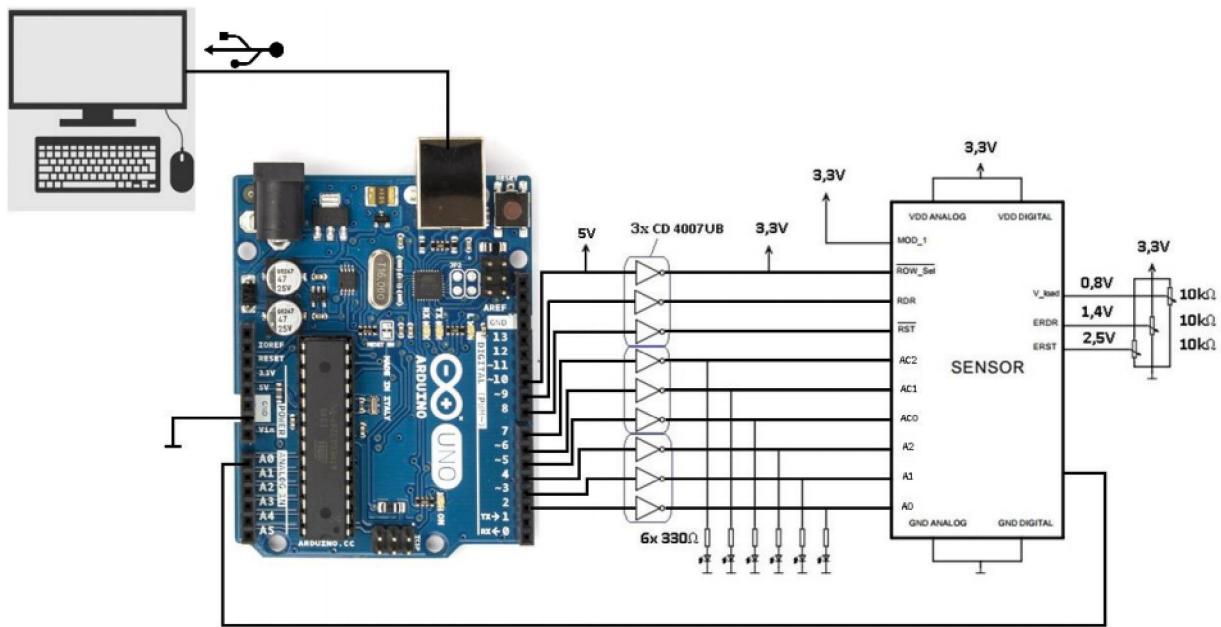


Figura 2. 23 – Diagrama de Interligação para leitura e controle usando um Arduino [5].

3. EFICIÊNCIA QUÂNTICA PARA UM SENSOR DE IMAGEM

A eficiência quântica representa o número de elétrons criados e lidos satisfatoriamente pelo dispositivo para uma dada quantidade de fótons absorvidos pelo sistema óptico [1].

Para um sensor de imagem de silício, o processo de conversão da energia dos fótons em energia elétrica ocorre de acordo com a figura 3.1, que também apresenta as etapas de amplificação do sinal elétrico e conversão do sinal analógico em sinal digital.

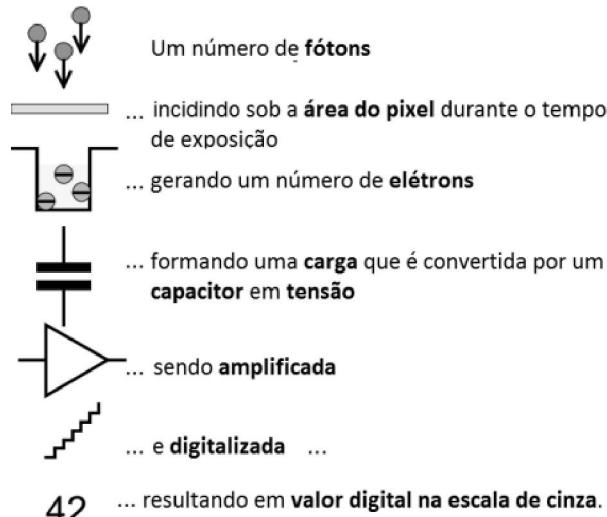


Figura 3.1 – Conversão de luz em um sensor de imagem [6].

O objetivo principal deste trabalho é determinar a relação entre elétrons criados e fótons absorvidos para uma determinada faixa de comprimentos de onda.

Outro aspecto interessante sobre os sensores de imagem é a resposta espectral, $R(\lambda)$, que também será obtida neste trabalho. Enquanto a eficiência quântica fornece o número de elétrons gerados em função do número de fótons absorvidos, a resposta espectral é a razão entre a corrente elétrica gerada e a potência da luz incidente [21]. A resposta espectral também é conhecida como responsividade e sua unidade é Ampère por Watt (A/W). A figura 3.2 mostra uma curva de responsividade típica para um fotodiodo de silício.

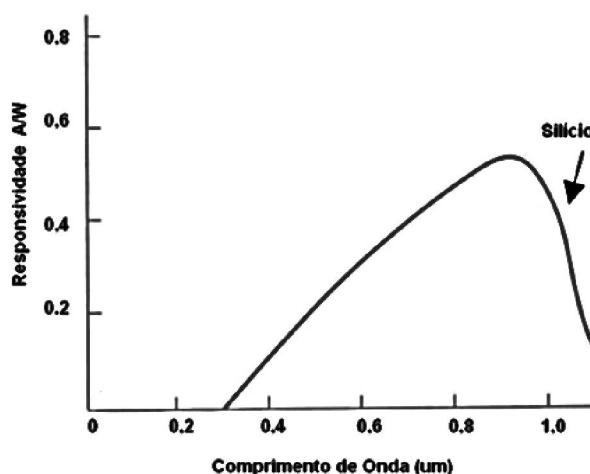


Figura 3.2- Responsividade típica de um fotodetector de silício, adaptado de [2].

3.1. ABSORÇÃO DA LUZ PELO SEMICONDUTOR

Existem várias formas de interação entre os fótons e os semicondutores, dentre elas podemos citar a absorção dos fótons pelos elétrons da banda de valência, na qual alguns recebem energia suficiente para saltar para a banda de condução.

A energia do fóton de luz incidente é dada por $E=hf$, sendo $h=6,626 \times 10^{-34} J.s$ a constante de Planck e f a frequência da luz dada em Hertz (Hz). A relação entre o comprimento de onda da luz e a frequência é dada por,

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E}, \quad (3.1)$$

sendo E é a energia do fóton em elétron-Volt (eV) e c é a velocidade da luz em metros por segundo (m/s).

Quando a energia do fóton for maior que a energia de *bandgap* (E_g) ocorrerá absorção do fóton devido à interação dele com a banda de valência fazendo com que elétrons da banda de valência saltem para banda de condução criando pares de elétrons-lacunas. A figura 3.3 mostra uma representação esquemática da absorção da luz por um semicondutor de *gap* direto.

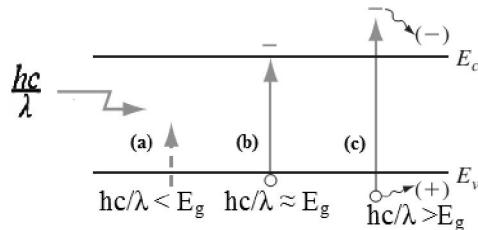


Figura 3. 3– (a) Fóton será absorvido para $hc/\lambda > E_g$. (b) e (c) Fóton não absorvido quando $hc/\lambda \leq E_g$ [8].

O fluxo de energia transportada pela luz é denotado por $\phi(x)$ e é expresso pelas unidades Watt por metro quadrado ($W.m^{-2}$). A figura 3.4 mostra o fluxo de energia de um fóton que incide em uma peça de semicondutor em $x=0$ e penetra até a distância dx .

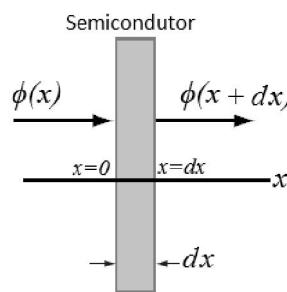


Figura 3. 4 – Fluxo de energia do fóton em $x=0$ e $x=dx$.

A parcela de fluxo de energia do fóton que foi absorvida até $x=dx$ é dada por,

$$\alpha\phi(x)dx, \quad (3.2)$$

sendo α o coeficiente de absorção dado em (m^{-1}). Como parte da energia foi absorvida em $x+dx$,

$$\phi(x+dx) - \phi(x) = d\phi(x) = -\alpha\phi(x)dx. \quad (3.3)$$

$$\frac{d\phi(x)}{dx} = -\alpha \cdot \phi(x). \quad (3.4)$$

Resolvendo a equação 3.4 para $\phi(0) = \phi_0$, obtém-se,

$$\phi(x) = \phi_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}. \quad (3.5)$$

Em resumo, $\phi(x)$ representa a distribuição de intensidade da luz à medida que ela propaga no material. Quanto maior o coeficiente de absorção mais rápido será a absorção da energia do fóton pelo semicondutor, sendo que esse coeficiente de absorção varia de acordo com a energia do fóton incidente e com a estrutura de bandas do semicondutor. A figura 3.5 mostra o comportamento do coeficiente de absorção em função do comprimento de onda para diferentes semicondutores.

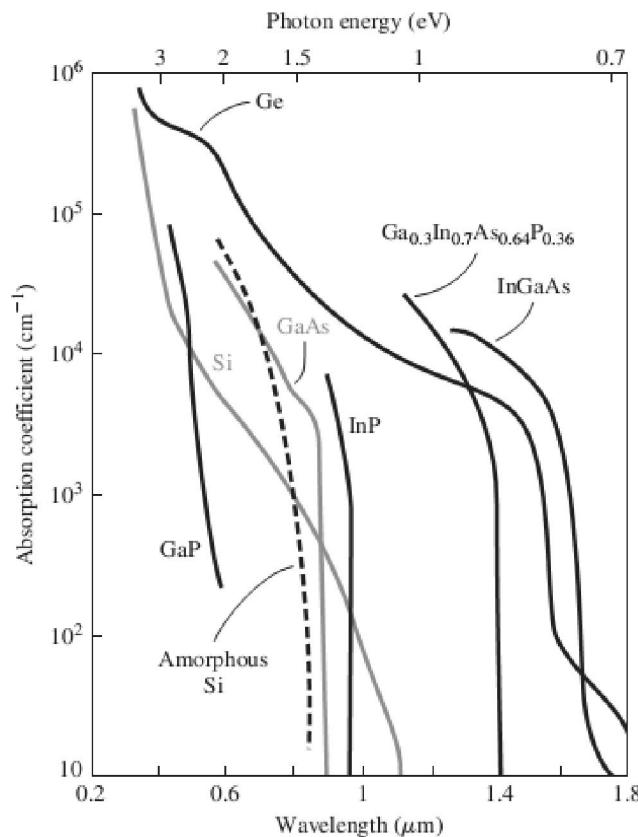


Figura 3. 5 – Coeficiente de absorção versus comprimento de onda para diferentes semicondutores [2].

3.3. GERAÇÃO DE EXCITONS

Devido às diferenças entre os índices de refração do ar e do semicondutor, ocorre reflexão da luz quando os fótons atingem o semicondutor, a incidência luminosa pode acontecer em várias direções, porém, para facilitar os cálculos, será considerada a incidência perpendicular, sendo o coeficiente de reflexão dado por,

$$R_{flec} = \left(\frac{n_{ar} - n_{\text{Semicondutor}}}{n_{ar} + n_{\text{Semicondutor}}} \right)^2. \quad (3.6)$$

O coeficiente de reflexão é necessário para se calcular a quantidade de fótons que são transmitidos ao semicondutor, ou seja, $(I - R_{flec})$ dos fótons incidentes penetram no semicondutor

para serem absorvidos. Dessa forma, a intensidade de fótons absorvidos pelo semicondutor será dada por,

$$\phi_o(1 - e^{-\alpha x}). \quad (3.7)$$

Alguns fótons absorvidos criam pares elétrons-lacunas, sendo a taxa de geração destes pares dada por,

$$g' = \eta(1 - R_{flec})(1 - e^{-\alpha x}) \frac{A\phi_o}{hf}, \quad (3.8)$$

em que A é a área de incidência da luz no semicondutor.

lá atrás no texto foi utilizado o símbolo EQ. É importante uniformizar.

Para uma quantidade unitária de fótons incidentes, o fator multiplicativo, η , representa a eficiência quântica.

3.4. CORRENTE FOTO-GERADA

aqui é mais um componente, um pedaço de material, uma lâmina, que um dispositivo.

Em um dispositivo semicondutor de silício, polarizado por uma tensão V , circula uma corrente i_o . Mas após ser atingido por luz a corrente que passa por ele será i conforme ilustrado na figura 3.6.

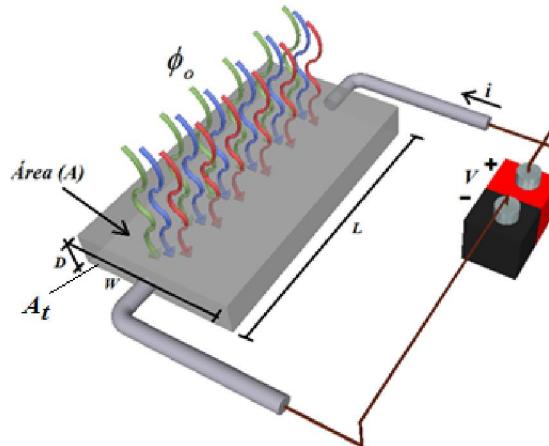


Figura 3. 6 – Placa de silício atingida pela radiação de intensidade ϕ_o .

O acréscimo de corrente é fornecido pela geração de pares, que depende da absorção da luz, da área de incidência ($W.L$) e das condições de reflexão da luz na superfície do silício. Levando em consideração que cada fóton absorvido gera um par elétron-lacuna, a expressão para a taxa de geração de pares será dada por,

$$\text{#pares gerados por segundo} \quad g' = (1 - R_{flec})(1 - e^{-\alpha D}) \frac{\phi_o WL}{hf}. \quad (3.9)$$

Assim, o número total de pares gerados depende das dimensões do semicondutor atingido pela luz. Considerando o volume do dispositivo ($W.D.L$) a equação 3.9 pode ser escrita por,

$$g = g' Vol = (1 - R_{flec})(1 - e^{-\alpha D}) \frac{\phi_o}{hfD}, \quad 3.10 \text{ não é a mesma grandeza que } 3.11$$

sendo D a profundidade de penetração ou espessura do silício conforme a figura 3.6. Considerando a intensidade de luz estacionária durante o tempo de integração do sinal, as taxas geração e recombinação de pares podem ser escritas como:

$$r' = g' = \frac{\delta_n}{\tau_n} = \frac{\delta_p}{\tau_p}, \quad (3.11)$$

utilize sub-índices para uniformidade de notação

sendo $\delta n = \delta p$ as concentrações dos portadores majoritários e minoritários no estado estacionário e τ_p o tempo até a recombinação dos portadores. mas tau_p é diferente de tau_n, a menos que o semicondutor seja intrínseco, correto?

A condutividade do semicondutor antes da aplicação da luz depende da mobilidade dos portadores μ_n , μ_p e é dada por,

$$\sigma = n_o e \mu_n + p_o e \mu_p . \quad (3.12)$$

Com a aplicação da luz há uma variação na condutividade chamada de fotocondutividade que é dada por,

$$\Delta\sigma = e(\delta n \mu_n + \delta p \mu_p) . \quad (3.13)$$

$$\Delta\sigma = eg' \tau_p (\mu_n + \mu_p) . \quad (3.14)$$

A fotocorrente gerada após a aplicação da luz (i_{ph}) será obtida a partir da densidade de corrente foto-gerada,

$$i_{ph} = J_{ph} A_t , \quad (3.15)$$

no qual $J_{ph} = \Delta\sigma \cdot E$ é a densidade de corrente gerada devido à aplicação da luz e A_t é a área transversal do bloco de silício mostrado na figura 3.6, E é o campo elétrico aplicado, que é proporcional ao potencial à tensão V e à distância entre as extremidades L . Assim, a corrente foto-gerada será,

$$i_{ph} = \Delta\sigma E A_t . \quad (3.16)$$

$$i_{ph} = eg' \tau_p (\mu_n + \mu_p) E A_t . \quad (3.17)$$

Como o campo elétrico é dado por V/L , a equação 3.18 fica,

$$i_{ph} = \frac{WD}{L} eg' \tau_p (\mu_n + \mu_p) V . \quad (3.18)$$

Dessa forma, a corrente total no circuito (i) será a soma da corrente de polarização e a fotocorrente gerada:

$$i = i_o + i_{ph} . \quad (3.19)$$

Considerando que os pares sejam gerados uniformemente ao longo da superfície do semicondutor, a fotocorrente pode ser obtida através da integração da fotocondutividade sobre a área transversal [2].

A finalização do desenvolvimento anterior considerou deriva, e foi realizado para o caso do incremento de corrente em um fotocondutor, não para um fotodiodo. No caso de um fotodiodo o processo de construção da fotocorrente é um pouco diferente, valendo-se de um processo de difusão além de deriva.

3.5. EFICIENCIA QUÂNTICA NO FOTODIODO O circuito APS possui um fotodiodo para absorção e conversão da luz em sinal elétrico. Neste caso, a radiação luminosa atua como uma fonte de corrente no circuito, aumentando de acordo com a intensidade e comprimento de onda da luz recebida. O esquema elétrico do fotodiodo pode ser visto na figura 3.7, no qual i_{ph} é a corrente foto-gerada devido à aplicação de luz, C_j é a capacitância de junção, R_{sh} é a resistência de junção e R_s é a resistência série.

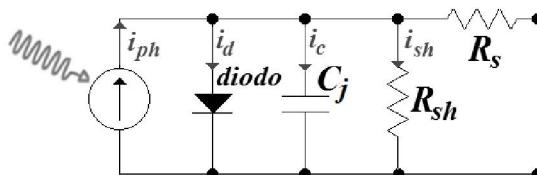


Figura 3.7 – Circuito equivalente do fotodiodo.

A corrente foto-gerada i_{ph} é diretamente proporcional ao número de fótons que são absorvidos por segundo no silício. Aqui N_{ph} representa o número de fótons irradiados por segundo por uma fonte luminosa. Assim a corrente foto-gerada pode ser dada por:

$$i_{ph} = \eta e N_{ph}. \quad (3.20)$$

O numero de fótons incidentes por segundo no fotodiodo é diretamente proporcional à potência e ao comprimento de onda da fonte irradiante, daí:

$$N_{ph} = \frac{\lambda_o P_o}{h.c}, \quad (3.21)$$

no qual n_{ph} é a taxa de fótons incidentes por segundo, λ_o é o comprimento de onda da luz e P_o é a potência óptica que incide em toda superfície do fotodiodo.

A intensidade luminosa ϕ_o que atinge a área de junção P-N do fotodiodo e é absorvida, é responsável por praticamente toda a carga gerada. Assim,

$$i_{ph} = \eta e \frac{P_{oj}}{h.c}, \quad \text{e lambda_o?} \quad (3.22)$$

sendo e a Carga do elétron em coulombs (C), P_{oj} é a potência óptica incidente na área de junção P-N do fotodiodo.

Outra característica interessante do fotodiodo é sua responsividade que é a relação entre corrente foto-gerada e potência óptica incidente, que é dada por:

$$R_{ph} = \frac{i_{ph}}{P_o}. \quad (3.23)$$

Rescrevendo a equação 3.23 para eficiência quântica, com λ_o dado em nm temos,

$$\eta = 1241,2 \frac{R_{ph}}{\lambda_o} \left(\frac{P_o}{P_{oj}} \right) \quad \text{caracterize melhor o que se entende por incidir em toda a área e incidir na área da junção. Geralmente, na grande maioria dos fotodiódos a incidência é perpendicular ao plano da junção, logo } P_o = P_{oj}, \text{ inclusive nos fotodiódos do 3T-APS.} \quad (3.24)$$

não é verdade!

Quanto maior o comprimento de onda, menor o coeficiente de absorção e a responsividade, logo a curva tende descer para frequências acima de 700nm, porém, o inverso não ocorre, pois quanto menor o comprimento de onda, maior é a reflexão da luz, e com isso, menor é a responsividade, dessa forma, para frequências abaixo de 400nm, a responsividade também diminui, e é por isso que a curva da eficiência quântica tem o formato similar ao apresentado na figura 1.2. **também não é verdade.**

3.6. TENSÃO FOTO-GERADA

A tensão foto-gerada é a tensão medida nos terminais do fotodiodo quando há a aplicação de luz. O resultado dessa tensão depende de como está sendo feita a medida. Basicamente, existem duas configurações ou modos para operação do fotodiodo (figura 3.8): o modo fotovoltaico e o modo fotocondutivo.

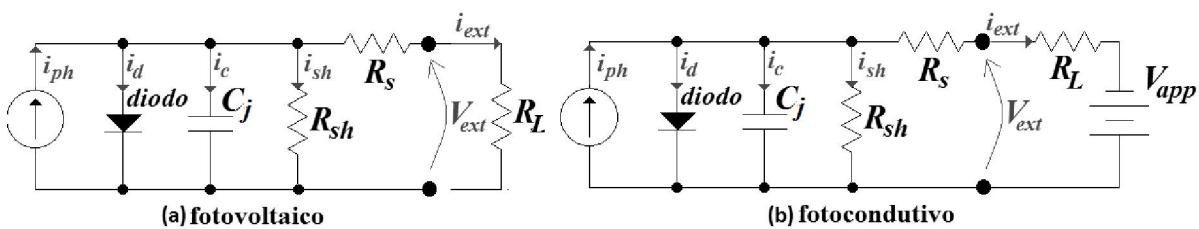


Figura 3. 8 – Circuitos equivalentes para os modos de operação do fotodiodo (a) fotovoltaico (b) fotocondutivo.

No modo de operação modo fotovoltaico, figura 3.8-a, existe uma menor variação de resposta para a variação de temperatura [9]. Tomando como V_d a tensão em cima do diodo temos as seguintes equações,

i_c desprezada.

$$i_{ph} = i_d + i_{sh} + i_{ext} . \quad (3.25)$$

$$V_{ext} = V_d - i_{ext} \cdot R_s . \quad \text{nem sempre, na verdade o que se quer é}$$

$$V_d = i_{sh} \cdot R_{sh} . \quad \text{máxima potência na carga! Assim funciona}$$

uma célula solar. (3.27)

No modo fotovoltaico, o resistor externo R_L tem alto valor de resistência de forma que a corrente i_{ext} seja muito pequena se comparada a i_{ph} . O mesmo princípio é adotado para o valor da resistência R_{sh} , que possui alta resistividade fazendo i_{sh} ser muito menor que i_{ph} ($i_{sh} \ll i_{ph}$). Logo, $i_{ph} = i_d$ e $V_{ext} = V_d$.

Assumindo o diodo como ideal e a polarização do diodo com corrente i_o , tem-se que a corrente do diodo é dada por:

polarização? Esta é a corrente de saturação reversa.

$$i_d = i_o \left[\exp\left(\frac{eV_d}{KT}\right) - 1 \right]. \quad (3.28)$$

Sendo i_o a corrente de polarização reversa do diodo, $K = 1,38 \times 10^{-23} m^2 kg.s^{-2}K^{-1}$ é a constante de Boltzmann e T é a temperatura em Kelvin. Reescrevendo a equação 3.28, obtém-se:

aqui parece que a equação abaixo foi derivada a partir das infirmações prestadas acima, quando de fato não o foi. Esta é a equação de Shockley que vem de uma derivação de difusão de portadores de carga.

$$\left(\frac{eV_d}{KT} \right) = \ln \left(\frac{i_{ph}}{i_o} \right) + 1 \cong \frac{i_{ph}}{i_o}. \quad \text{quando } V_d > \sim 3KT/e \quad (3.29)$$

$$V_d = V_{ext} = \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{i_{ph}}{i_o} \right). \quad (3.30)$$

$$V_d = V_{ext} = \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{\eta e P_{oj} \lambda_o}{h.c i_o} \right). \quad \text{separe com um ponto.} \quad (3.31)$$

$$V_d = V_{ext} = \frac{KT}{e} \left[\ln \left(\frac{\eta e \lambda_o}{h.c i_o} \right) + \ln P_{oj} \right]. \quad (3.32)$$

Em modo Fotocondutivo, figura 3.8-b, a polarização reversa tem como principal consequência à melhoria na velocidade de resposta do fotodiodo e a melhoria na sua linearidade. Esta resposta mais rápida do fotodiodo ocorre devido ao aumento da largura da região de depleção, ocasionando uma menor capacidade de junção [10].

Considerando a mesma análise aplicada ao modo fotovoltaico para o modo fotocondutivo temos $i_{ph} \approx i_{ext}$ [1], e com isso,

$$i_{ext} = \frac{\eta e P_{oj} \lambda_o}{h.c}. \quad (3.33)$$

$$V_d = V_{ext} = \frac{\eta e P_{oj} \lambda_o}{h.c} R_L. \quad \text{Quando } R_s \text{ for desprezível.} \quad (3.34)$$

Esse modo é o preferível para aplicação em sensores de imagem de silício, e é o utilizado quando o pixel possui como elemento fotossensível o fotodiode de junção P-N que será descrito seguir.

3.7. FOTODIODO DE SILÍCIO

Existem vários tipos de detectores de luz feitos com silício, por exemplo, fotodiodos, fototransistores, fotointensificadores, fotodiodes a vácuo, fotodiodes avalanche, fotomultiplicadores, entre outros.

Este trabalho aborda píxeis fabricados com fotodiodos de junção P-N, que são os mais utilizados na fabricação de sensores de imagem CMOS de baixo custo.

Um fotodiodo de junção P-N é basicamente um diodo P-N polarizado reversamente. A figura 3.9 mostra a interligação reversa do fotodiodo, na qual se aplica uma tensão de polarização reversa V_R muito maior do que a tensão de junção interna V_{bi} , que ocorre na camada de depleção. Os fotodiodos são fabricados de forma que as dopagens tenham os níveis $N_a \gg N_d$ ou $N_d \gg N_a$, proporcionando uma camada de depleção mais larga na região menos dopada. Esse tipo de junção é chamada de *one-side junction* e é representada por P⁺N ou N⁺P.

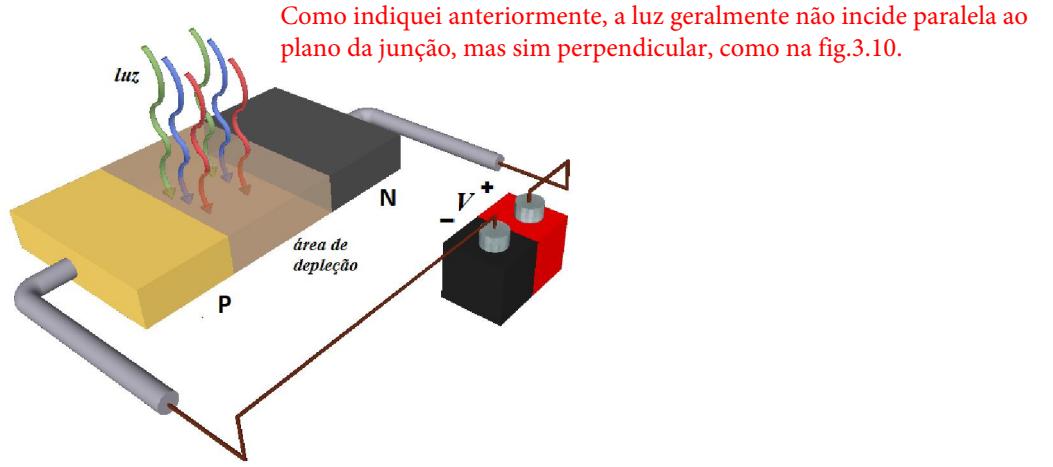


Figura 3. 9 – Junção P-N polarizada reversamente.

A estrutura mais simples de um fotodiodo P-N é mostrada na figura 3.10, na qual as conexões ôhmicas com metal são feitas através de semicondutores altamente dopados [1].

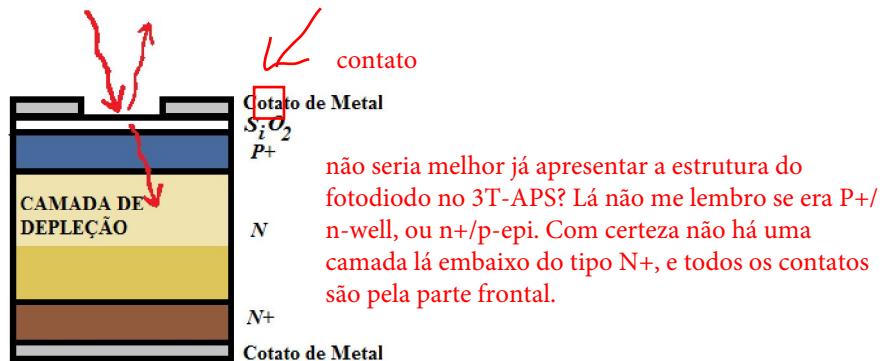


Figura 3. 10 – Estrutura típica de um fotodiodo de junção P⁺N, adaptado de [1].

Nessa estrutura, a camada de depleção é formada dentro do material do tipo N e a largura dessa região é dada por,

$$W = x_{p^+} + x_n. \quad \text{deve indicar W na figura 3.10.} \quad (3.35)$$

As larguras das regiões de depleção geradas em cada região x_{p^+} e x_n variam de acordo com o potencial elétrico aplicado e dopagem das camadas [1] conforme as equações:

Pela figura 3.10, isto aqui é a extensão da camada de depleção para dentro da região P+, $x_{p^+} = \left(\frac{2\epsilon_{Si}V_R}{eN_d} \right)^{1/2}$ Indicar que Vr é o potencial reverso aplicado. (3.36)

e não foi indicado na figura, mas é representada pela região em amarelo claro.

$$x_p = \left(\frac{2\epsilon_{Si}V_R N_d}{eN_a^2} \right)^{1/2}. \quad (3.37)$$

Para uma detecção de fótons eficiente, os pares devem ser gerados dentro da região de depleção. No fotodíodo de junção P-N os limites de detecção dependem do comprimento da onda incidente e da tensão de polarização reversa aplicada.

Para **ondas curtas**, o coeficiente de absorção é alto e os fótons serão absorvidos perto da superfície, por isso a região P⁺ tem que ser o mais fina possível. Porém, para obter uma alta eficiência quântica neste tipo de fotodíodo é necessária **uma alta tensão reversa**, o que muitas vezes, poder ter valor aproximado ou ser superior à tensão de ruptura do dispositivo [1].

A detecção também pode ser melhorada com a adição de uma camada anti-reflexiva de SiO_2 , com espessura $\lambda/4$, sendo λ é o comprimento de onda específico para o qual se deseja aumentar a eficiência quântica.

Outra técnica utilizada nos dispositivos mais modernos é aplicação de microlentes sobre o pixel para aumentar a intensidade de luz incidente na área fotossensível, figura 3.11 [6].

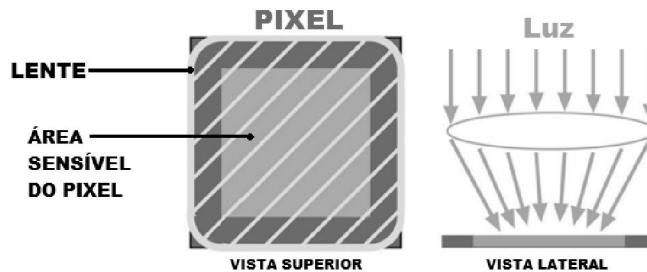


Figura 3. 11 – Microlente de SiO_2 aplicada sobre cada pixel para direcionar os fótons incidentes para a área sensível do pixel, adaptado de [6].

3.7.1. ESTRUTURAS TÍPICAS DE FOTODIODOS P-N UTILIZADOS EM SENSORES CMOS 3T-APS.

A figura 3.12 mostra três tipos mais comuns de fotodiodos P-N fabricados em processo CMOS, uma comparação detalhada dos três pode ser encontrada em [41].

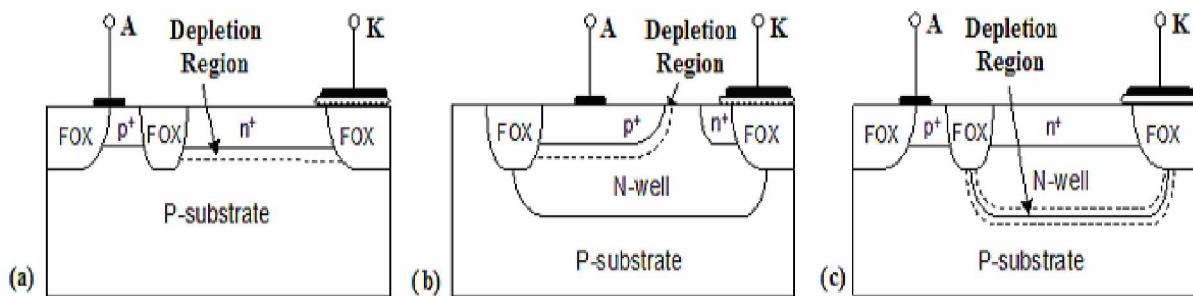


Figura 3. 12 – Fotodiodos P-N, (a) N+/P-SUBTRATE, (b) P+/N-WELL, (c) N-WELL /P-SUBSTRATE [41].

DIFFUSION-SUBRATE Junction (N+ /P-SUBRATE) é o tipo mais utilizado, devido ao seu layout simples, é menos suscetível a variações na litografia, diminuindo assim o FPN em sensores APS. Além disso, exibe **baixa corrente de escuro ($0,04 \sim 0,25nA$)** e tem boa sensibilidade à luz visível com eficiência quântica máxima no comprimento de onda de $600nm$ (figura 3.13). A desvantagem desse tipo de fotodíodo está na vulnerabilidade para o *crosstalk* que é interferência na leitura de um pixel devido a outro pixel e ruídos gerados pela difusão e fuga de portadores através do substrato P.

DIFFUSION-WELL Junction (P+/N-WELL) possui baixa eficiência quântica, por isso é utilizado somente para aplicações específicas em que há necessidade de redução do *crosstalk* ou alta velocidade de resposta, geralmente é usado em sistemas de segurança cuja faixa de comprimento de

onda é de 550nm, devido à alta corrente de escuro não é utilizado em sistemas que se deseja qualidade na captura de imagem.

WELL-SUBSTRATE Junction (N-WELL/P-SUBSTRATE) possui uma elevada eficiência quântica para comprimentos de ondas curtos e o maior pico de eficiência quântica na faixa do visível devido à largura e profundidade de sua região de depleção quando comparada aos outros dois tipos. É bastante vulnerável ao *crosstalk* e ruídos de difusão e exibe uma corrente de escuro mediana entre os dois tipos.

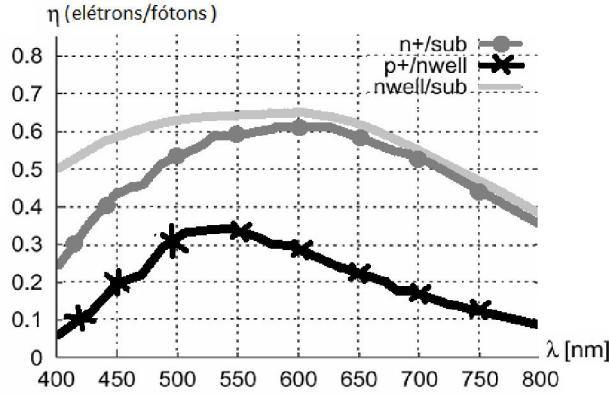


Figura 3. 13 – Eficiência quântica para os três tipos de fotodiode P-N, fabricado com tecnologia CMOS 0,8μm [41].

3.7.3. CAPACITÂNCIA DE JUNÇÃO DO FOTODIODO

O fotodiodo é o elemento fotossensível presente no sensor 3T-APS e possui uma capacidade que é descarregada devido à aplicação de luz em sua camada de depleção. Essa capacidade (C_{ph}) é determinada pelo tipo de polarização e tensão aplicada sobre os terminais do fotodiodo. Algumas propriedades importantes sobre a junção P-N, cujas equações são utilizadas neste trabalho, estão detalhadas no apêndice E.

Quando um diodo P-N está polarizado reversamente, a largura da camada de depleção é diretamente proporcional à tensão reversa aplicada V_R [2],

$$W = \left[\frac{2\epsilon_{Si}(V_R + v_{bi})}{e} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2}. \quad (3.38)$$

v_{bi} é o potencial interno do diodo conhecido também por potencial embutido ou barreira potencial do diodo e é dado por, antes chamou a constante de Boltzmann de K, agora K_b. Sugiro uniformizar.

$$v_{bi} = \frac{K_b T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right). \quad (3.39)$$

A capacidade de junção do diodo P-N ocorre devido à formação da camada de depleção e pode ser escrita por:

$$C_j = \frac{A_j \epsilon_{Si}}{W}. \quad (3.40)$$

$\epsilon_{Si}=1,04x10^{-12} F/cm$ (F/cm) é a permissividade do silício e A_j é a área transversal de junção entre as placas formadas pela região de depleção. Substituindo 3.38 em 3.40 obtém-se,

$$C_j = A_j \left[\frac{e \epsilon_{Si}}{2(V_R + v_{bi})} \left(\frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2}. \quad (3.41)$$

junção abrupta

O fotodiodo do chip IR2 foi fabricado com junção do tipo *one side junction*, na qual a camada N^+ foi fortemente dopada gerando o fotodiodo do tipo N^+P com ($N_d \gg N_a$).

Resolvendo a equação 3.41 para $N_d \gg N_a$, é possível obter a capacidade de junção para o fotodíodo N⁺P que é dada por,

$$C_{ph} = A_j \left[\frac{e\epsilon_{Si}N_a}{2(V_R + v_{bi})} \right]^{1/2}. \quad (3.42)$$

A tensão de trabalho do fotodíodo do chip IR2 varia entre 1,2V e 1,8V, dessa forma, para facilitar os cálculos, pode-se fazer $V_R \gg v_{bi}$, com isso a equação 3.42 pode ser reescrita como,

v_{bi} geralmente é coisa de 0.5 a 1 V. Pelos valores de V_R acima, esta aproximação não é válida.

$$C_{ph} \approx A_j \left[\frac{e\epsilon_{Si}N_a}{2V_R} \right]^{1/2}.$$

É importante explicar, pois o que se vê nos esquemáticos de circuito lá atrás são tensões de 5V, 3.3V, 2.4V, etc. Inclusive as menores são utilizadas para o transistor LOAD e para os RDR, etc, mas não para o fotodíodo.

3.8. CARGA E DESCARGA DA CAPACITÂNCIA DO FOTODÍODO

A figura 3.14 mostra uma aproximação no circuito do fotodíodo para modo de operação linear, sendo i_{ph} a corrente foto-gerada em decorrência da irradiação de luz incidente.

Quando chave S₁ é acionada a tensão V_R é carregada na capacidade C_{ph} até V_d(t) = V_R.

Depois, S1 é desligada fazendo com V_d(t) decaia ao longo do tempo.

C_{ph} varia a medida que se descarrega pois a tensão nos seus terminais é reduzida pela influência da corrente fotogerada.

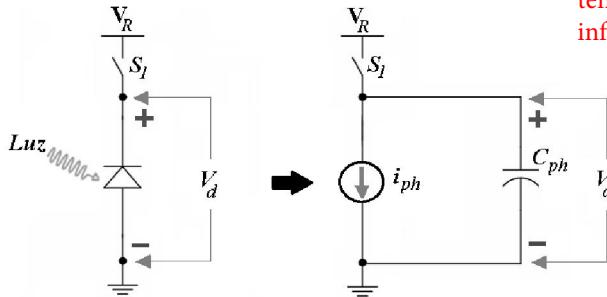


Figura 3. 14 – Aproximação para o comportamento do fotodíodo no pixel.

A corrente foto-gerada fará com que a capacidade do fotodíodo descarregue devido à polarização reversa. Dessa forma, a corrente foto-gerada poderá ser escrita por,

$$i_{ph} = -C_{ph} \frac{dV}{dt}, \quad \text{aqui há uma questão de ordem. Não é a fotocorrente que depende da capacidade e da redução de V, mas o contrário.} \quad (3.44)$$

$$\int_{V_R}^{V_d} C_{ph} dV = - \int_0^{\tau_{int}} i_{ph} dt. \quad (3.45)$$

Substituindo a equação 3.43 na equação 3.45 obtém-se:

Tinha que utilizar 3.42.

$$V \int_0^{\tau_{int}} A_j \left[\frac{e\epsilon_{Si}N_a}{2V} \right]^{1/2} dV = i_{ph} \tau_{int} \quad (3.46)$$

$$i_{ph} = \frac{A_j}{\tau_{int}} \left(2e\epsilon_{Si}N_a \right)^{1/2} \left[(V_R^{1/2} - V_d^{1/2}) \right]. \quad (3.47)$$

Aqui é o contrário. O que se quer é determinar V_d conhecendo-se V_R, tau_int e i_ph.

Sendo que τ_{int} é o tempo de integração para o pixel operando em modo linear.

3.9. LEITURA DA TENSÃO FOTO-GERADA PARA O PIXEL 3T-APS

Neste trabalho iremos nos concentrar na medida da eficiência quântica para o modo linear apenas, a figura 3.15 mostra o pixel 3T-APS, composto por três transistores denominados M1 (RESET), M2 (BUFFER), M3 (ROWSEL - RW). O quarto transistor M4 (COLUNA) está localizado fora do

pixel, sua função é manter a corrente I_B constante através da aplicação de uma tensão de $0,8V$, denominada V_{LOAD} para o chip IR2.

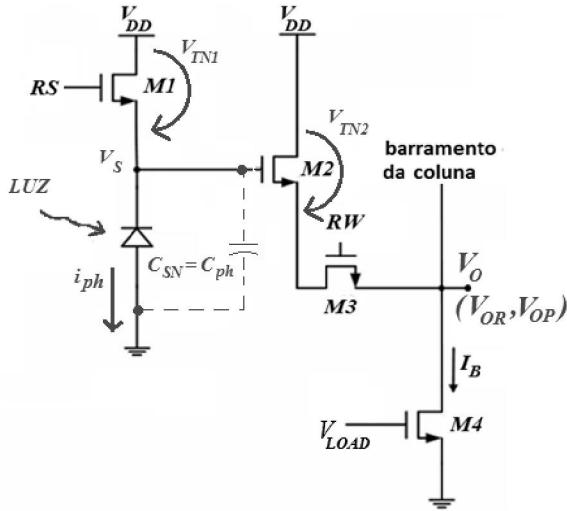


Figura 3. 15 – Circuito dos píxeis 3T-APS presentes no chip IR2.

~~Em modo linear, o pixel opera com carregamento e descarregamento da capacitância no nó C_{SN} que é constituída pela capacitância do fotodiodo e pelas capacitâncias parasitárias conectadas a esse nó: a capacitância da fonte do transistor de RESET ($M1$) e a capacitância de porta do transistor seguidor de fonte ($M2$). Porém, o fotodiodo usado no chip IR2 foi projetado para que as capacitâncias nesse nó sejam sobrepostas pela capacitância C_{ph} , ou seja, $C_{SN} \approx C_{ph}$.~~

A tensão reversa aplicada ao nó S será a diferença entre a tensão da fonte V_{DD} e a tensão de limiar, V_{TN1} , do transistor de RESET ($M1$).

$$V_S = V_{DD} - V_{TN1}. \quad (3.48)$$

Após a carga da capacitância no nó, o RESET é desligado fazendo C_{ph} descarregar. Durante a descarga é feita a leitura do pixel, o tempo escolhido para essa leitura é denominado tempo de integração.

de padrão fixo

As tensões de limiares dos transistores $M1$ e $M2$ são as maiores fontes de ruídos no sensor 3T-APS. Para reduzir os efeitos causados por essas duas tensões foi criada a técnica de correlação entre duas amostragens ou CDS (Correlated Double Sampling) [28]. Esse método usa o sinal V_{OR} que é armazenado ao final RESET e o sinal V_{OD} ao final da integração. A diferença entre essas duas tensões, V_{OD} e V_{OR} , tem como resultado a tensão foto-gerada V_{ph} ,

$$V_{ph} = V_{OR} - V_{OD}. \quad (3.49)$$

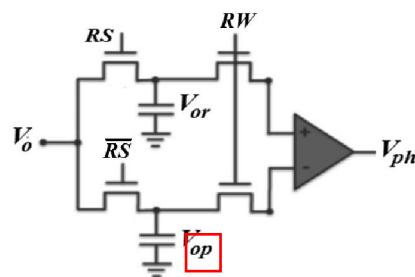


Figura 3. 16 - Circuito CDS tradicional [45].

Durante o *RESET* o fotodiodo é carregado com a tensão V_S . Após essa carga, o transistor RW é acionado e a corrente de polarização I_B será dada por, Vs era Vr!

$$I_B = K(V_{GS} - V_{TN2})^2 = K(V_S - V_{OR} - V_{TN2})^2. \quad (3.50)$$

V_S é a tensão no nó S, V_o é a tensão de saída, V_{TN2} é a tensão de limiar de M2 e K é dada por,

$$K = \mu C_{ox} w / 2L. \quad (3.51)$$

A partir da equação 3.50 obtém-se,

$$V_{OR} = V_S - \left(V_{TN2} + \sqrt{\frac{I_B}{K}} \right). \quad (3.52)$$

$$V_{OR} = V_{DD} - \left(V_{TN1} + V_{TN2} + \sqrt{\frac{I_B}{K}} \right). \quad (3.53)$$

A tensão máxima lida na saída do pixel ocorre quando $I_B = 0$:

$$V_{OMAX} = V_{DD} - (V_{TN1} + V_{TN2}). \quad (3.54)$$

Na fase de exposição ou descarga do fotodiodo, o transistor RW é desligado durante o tempo de exposição (tempo em que o fotodiodo está exposto a luz) para que haja a descarga de sua capacidade, durante essa fase a tensão no nó S é dada por:

$$V_S(t) = V_{DD} - V_{TN1} - V_{ph}(t). \quad (3.55)$$

V_{ph} é a tensão foto-gerada que é dada por,

$$V_{ph}(t) = \int_0^t \frac{i_{ph}}{C_{ph}} dt. \quad (3.56)$$

Aplicando o valor de V_S na equação 3.54 para um instante t qualquer, obtém-se,

$$V_{OD} = V_{DD} - V_{ph} - \left(V_{TN1} + V_{TN2} + \sqrt{\frac{I_B}{K}} \right). \quad (3.57)$$

Tanto na equação 3.53 como na equação 3.57 é possível observar que a saída do circuito é dependente dos fatores construtivos. Assim, aplica-se a técnica CDS para reduzir os ruídos gerados devido aos fatores construtivos.

3.10. CÁLCULO DA CORRENTE FOTO-GERADA EM MODO LINEAR

O cálculo da corrente foto-gerada no circuito 3T-APS, conforme definido na sessão 3.8, será dado no intervalo de V_R até V_d , sendo V_d a tensão no fotodiodo. Porém, a tensão final após o tempo de integração, $V_d(\tau_{int})$, de acordo com a sessão 3.9, terá o valor de $V_S - V_{ph}$, com V_{ph} medido através da técnica CDS. Utilizando a equação 3.46 para o pixel 3T-APS obtém-se,

$$i_{ph} = \frac{A_j}{\tau_{int}} (2e\varepsilon_{Si} N_a)^{1/2} [V_S^{1/2} - (V_S - V_{ph})^{1/2}]. \quad (3.58)$$

Substituindo $V_S = V_{DD} - V_{TN1}$ na equação 3.47 obtém-se,

$$i_{ph} = \frac{A_j}{\tau_{int}} \left(\sqrt{V_{DD} - V_{TN1}} - \sqrt{V_{DD} - V_{TN1} - V_{ph}} \right) \sqrt{2e\varepsilon_{Si} N_a}. \quad (3.59)$$

A área de junção A_j é a própria área fotossensível do pixel que é dada pela multiplicação do *fill-factor* pela área do pixel. No chip IR2 o *fill-factor* é de 56% e a área é de $10^{-10} m^2$, $N_a = 2,12 \times 10^{17} cm^{-3}$ é a concentração de impurezas aceitadoras $\varepsilon_{si} = 1,04 \times 10^{-12} F/cm$ é a permissividade do silício. O sensor IR2 foi projetado de acordo com o *AMS Process Parameters C35* [40], no qual a tensão de limiar do transistor de *RESET* varia de 0,4 à 0,6V com valor médio de 0,5V.

A quantidade de elétrons que saltam da camada de valência para camada de condução durante a exposição do pixel é dado por,

$$N_e = \frac{i_{ph}\tau_{int}}{e}. \quad (3.60)$$

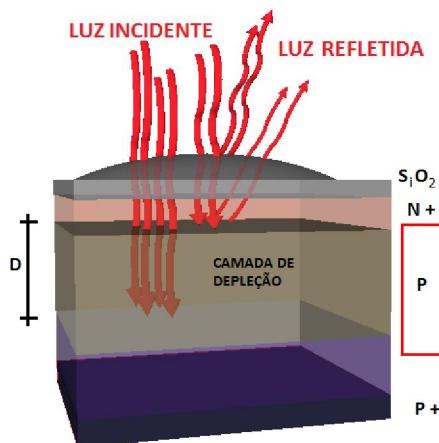
3.11. CÁLCULO DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA EM MODO LINEAR

Para determinarmos a eficiência quântica do dispositivo, precisamos calcular a quantidade de carga gerada para o tempo de integração estipulado, obtendo assim o número de elétrons que saltam da camada de valência para a camada de condução e a quantidade de fôtons que são absorvidos pelo pixel durante o tempo de integração. A quantidade fôtons incidentes no pixel é dada por,

$$N_{ph} = \frac{P_o \cdot \tau_{int}}{h.c / \lambda_0}. \quad (3.61)$$

N_{ph} representa o número total de fôtons incidentes e P_o representa a potência óptica incidente na área sensível do pixel que é calculado considerando o *fill-factor*.

Nem todos os fôtons incidentes são absorvidos pela camada de depleção do fotodíodo devido à reflexão e absorção de fôtons pelas camadas SiO_2 e N^+ (figura 3.17).



o desenho está dando uma falsa impressão do que é região P e o que é região de depleção.

Figura 3. 17 – Caminho dos fôtons até a absorção.

como assim?

A camada de dióxido de silício e a camada N^+ são projetadas com objetivo de não absorver fôtons de luz. Porém os efeitos de reflexão da luz continuam presentes. Considerando a incidência de luz perpendicular à área sensível, é possível utilizar a equação 3.6 para determinar o coeficiente de reflexão e determinar a quantidade de fôtons que são transmitidos até a camada de depleção.

O número de fôtons absorvidos pela camada de depleção será dado por,

$$N_{phabs} = N_{ph} (1 - R_{decSiO_2}) (1 - R_{flecSi}) (1 - e^{-\alpha D}). \quad \text{não está correto. O tanto absorvido em } N^+ \text{ tem que ser contabilizado.} \quad (3.62)$$

Na equação 3.62, α é o coeficiente de absorção do silício e D é a profundidade da camada de depleção, figura 3.17, que é formada devido à tensão reversa aplicada ao nó S. Considerando que o potencial interno é muito menor que a tensão reversa e que a junção do fotodíodo do chip IR2 é do tipo N^+P , a profundidade D da camada de depleção formada será dada por,

$$D = \left[\frac{2\varepsilon_{Si} V_s}{e N_a} \right]^{1/2}. \quad (3.62)$$

que varia com V_s

Este é o D durante o reset, mas não durante a integração.

$$D = \left[\frac{2\epsilon_{Si}(V_{DD} - V_{TN1})}{eN_a} \right]^{1/2}. \quad (3.63)$$

Com o número de fótons absorvidos e o número de elétrons gerados é possível calcular a eficiência quântica através da razão,

$$\eta = \frac{N_e}{N_{phabs}}. \quad (3.64)$$

A equação 3.64 representa a proposta deste trabalho para medir a eficiência quântica do chip IR2.

4. CONSTRUÇÃO DA CURVA DA EFICIÊNCIA QUÂNTICA EM MODO LINEAR

Para mensurar a eficiência quântica é necessário medir a corrente foto-gerada no pixel para um determinado comprimento de onda, no qual a fonte de luz pode ser lâmpada ou laser. A temperatura, em que todos os testes foram realizados, foi de 22°C.

Quanto maior o número de comprimentos de onda disponíveis para construção do gráfico da eficiência quântica maior é a precisão da curva EQ. Na ausência de uma fonte de intensidade suficiente e com um espectro tão largo, utilizou-se os comprimentos de ondas disponíveis compreendidos no intervalo de 457nm à 950nm mostrados na figura 4.1.

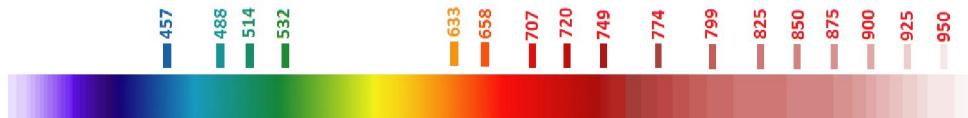
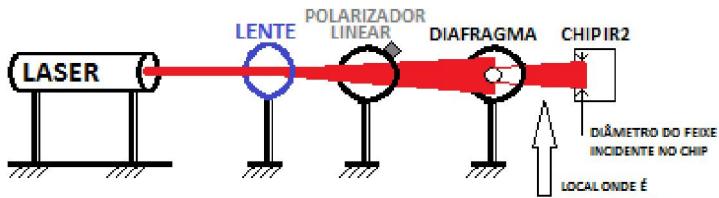


Figura 4. 1 – Comprimentos de ondas usados para os experimentos de determinação da eficiência quântica do chip IR2.

4.1. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

Para execução da medida da tensão foto-gerada foi montado o esquema da figura 4.2, no qual a intensidade do feixe incidente foi controlada através de um polarizador linear na saída da fonte luminosa, uma vez que os lasers utilizados possuem um contraste de polarização da ordem de 98:1.



Foi utilizado filtro espacial para garantir uniformidade da luz incidente no chip?

Figura 4. 2 – Montagem do experimento para medir a tensão foto-gerada.

Além do polarizador linear o experimento possui uma lente biconvexa para divergir o feixe e um diafragma para controlar o diâmetro do feixe incidente no pixel. A figura 4.3 mostra o arranjo experimental feito para leitura do chip com o laser de comprimento de onda de 633nm , em que o diâmetro do feixe, em formato circular, foi ajustado para 8mm .

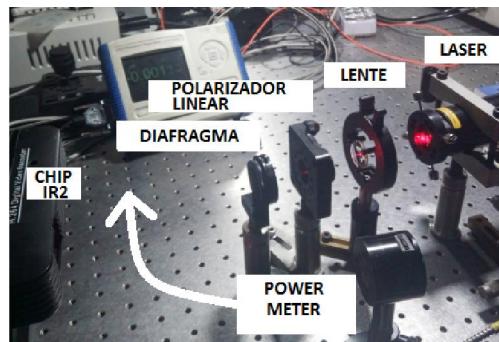


Figura 4. 3 – Arranjo experimental para o laser de 633nm .

Com o arranjo montado a leitura é feita através de um computador que é interligado com o Arduino do sistema de controle do chip conforme foi apresentado na Sessão 2.

A lente e o diafragma são usados para controlar o diâmetro do feixe incidente e assim calcula-se o número de fótons incidentes através da relação de áreas. A figura 4.4 mostra essa relação para o pixel (0,6).

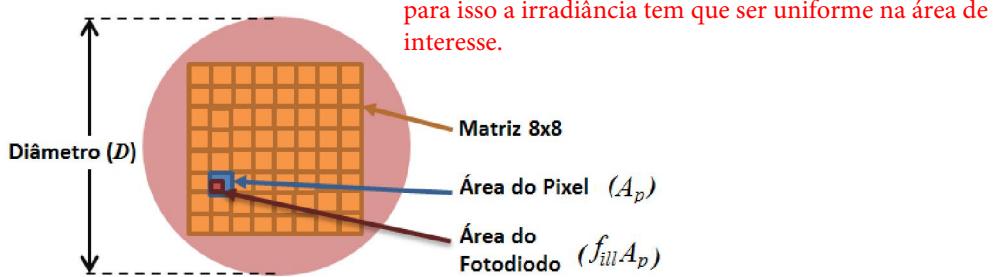


Figura 4. 4 – Representação para cálculo do número de fótons incidentes.

Utilizando a relação entre as áreas, o número de fótons incidentes na área sensível de um pixel é dado por,

$$N_{ph} = f_{ill} \left(\frac{4A_p}{\pi D^2} \right) P_o . \quad (4.1)$$

FF é a terminologia mais comum para fill factor

A_p é a área total do pixel , D é o diâmetro do feixe incidente, f_{ill} é o fill-factor (fator de preenchimento) do pixel e P_o é a potencia incidente na área do feixe medida através de um power-meter calibrado.

Para que o diâmetro do feixe fosse medido adequadamente foi feito um gabarito em frente ao chip conforme a figura 4.5 com diâmetro de 8mm. Esse diâmetro foi regulado para todos os comprimentos de ondas testados. O controle do diâmetro do feixe é importante para se determinar o número de fótons que incidem na área sensível do fotodiodo. Porém, nem todos os fótons incidentes são absorvidos, o número de fótons absorvidos é calculado através da equação 3.62.

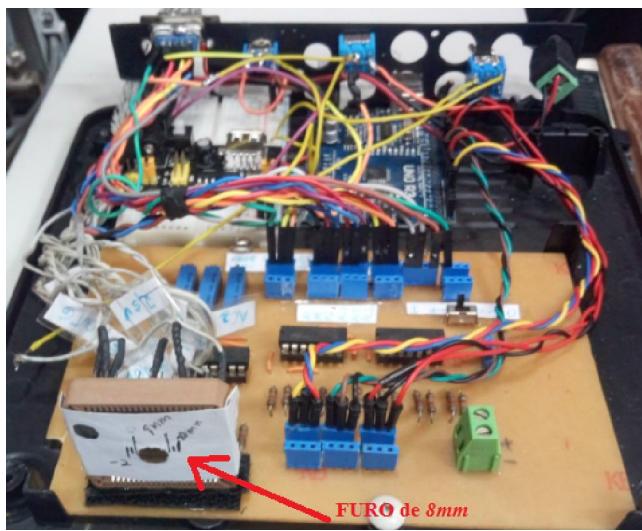


Figura 4. 5 – Gabarito para controle do diâmetro do feixe incidente.

1.2. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA MEDIÇÃO DA TENSÃO FOTO-GERADA.

Um pixel que opera em modo linear tem saturação dependendo da intensidade da luz e do tipo de construção. Como neste trabalho é necessário se obter a derivada da curva de descarga do

fotodiodo, é necessário analisar o comportamento do pixel no escuro e também com várias potências ópticas aplicadas para assim, selecionar o melhor tempo de integração que deverá ser menor ou igual ao tempo de exposição.

Para fazer essa análise, foi utilizado o algoritmo do apêndice A no qual se escolhe um pixel através do endereçamento binário controlando os tempos de reset e exposição para que a tensão de saída seja analisada através de um osciloscópio. Com isso, configurou-se o pixel (0,0) da matriz para operar dentro do tempo de $600\mu s$ entre cada reset, sendo $100\mu s$ para o tempo de carga e $500\mu s$ para o tempo de exposição.

Com o arranjo em funcionamento mediu-se com um osciloscópio a tensão de saída para as condições de escuro e de aplicação luz em três potências distintas, $0,5mW$, $1mW$ e $2mW$. O experimento foi feito com o laser de comprimento de onda $633nm$ cujo feixe de luz foi distribuído em uma área circular de diâmetro $8mm$ sobre o chip IR2. O resultado das tensões de saída para cada potência é apresentado na figura 4.6.

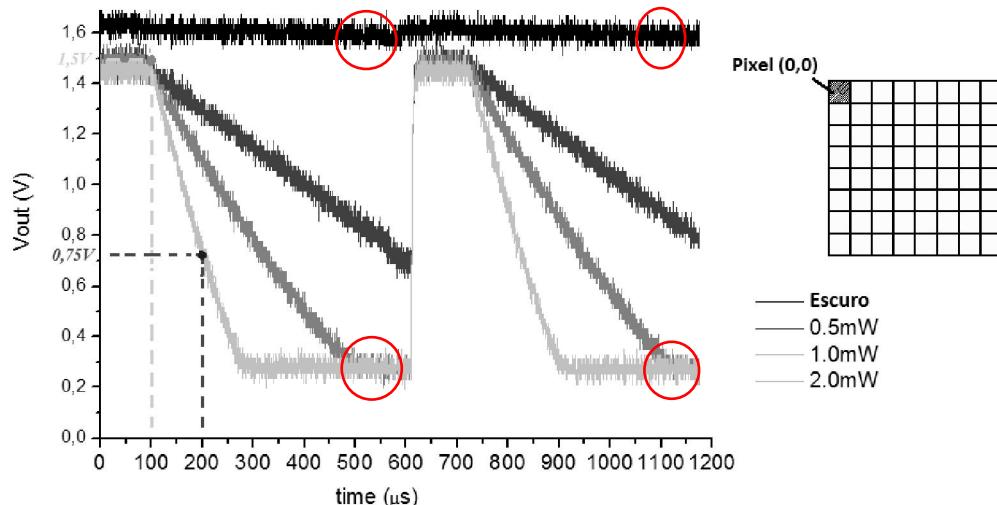


Figura 4.6 – Pixel (0,0) descarregando no escuro e com aplicação de $500\mu W$, $1mW$ e $2mW$, para $2mW$ houve uma descarga de aproximadamente $0,75V$ ($1,5V - 0,75V$) em $100\mu s$.

Vê-se claramente que a tensão em condição de escuro praticamente não varia, principalmente se comparada às variações de tensões obtidas para as três potências aplicadas. Dessa forma, o valor medido na leitura utilizando potências iguais ou acima de $1mW$ pode ser utilizado sem a preocupação com o efeito de escuro. Não tenho certeza se é verídico, pois há um efeito visual da inclinação de cada curva. Se observar a região plana, percebe-se amplitude de ruído semelhante.

Quanto maior a potência utilizada menor o nível de ruído conforme pode ser visualizado nas espessuras das linhas medidas no osciloscópio, logo, para executar os testes com tempos de exposição dentro do intervalo de $100\mu s$ a $150\mu s$ para o pixel (0,0) pode-se escolher potências no intervalo de $1mW$ a $2mW$ para diminuir o ruído e obter um resultado mais robusto.

Para fazer uma análise mais completa da matriz, utilizou-se o algoritmo do apêndice B que seleciona o primeiro pixel (0,0) e executa mil vezes o ciclo de *RESET* obtendo para cada ciclo uma medida da tensão foto-gerada, após as mil execuções o resultado da média das leituras é impresso, após esse procedimento, o algoritmo seleciona o próximo pixel (0,1) executando o mesmo procedimento do anterior e continua até que os sessenta e quatro pixels sejam lidos linha por linha.

Configurando o tempo de exposição para $100\mu s$ e bloqueando a passagem de luz para o sensor, obteve-se o comportamento da matriz no escuro, a figura 4.7 mostra o valor máximo, mínimo e a média das mil leituras para cada pixel da matriz. Assim, é possível observar que a descarga no escuro varia em torno de $18mV$ a $23mV$.

O mesmo teste foi feito para tempos de exposições de $150\mu s$ e $200\mu s$. Porém, os resultados encontrados não apresentaram variação em relação ao resultado obtido para $100\mu s$.

	Máximo							
	coluna 0	coluna 1	coluna 2	coluna 3	coluna 4	coluna 5	coluna 6	coluna 7
linha 0	0.044	0.044	0.044	0.044	0.054	0.049	0.044	0.044
linha 1	0.044	0.044	0.044	0.054	0.044	0.044	0.044	0.044
linha 2	0.049	0.044	0.044	0.044	0.039	0.044	0.049	0.044
linha 3	0.044	0.044	0.044	0.044	0.054	0.049	0.044	0.044
linha 4	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.054	0.044	0.044
linha 5	0.049	0.044	0.044	0.044	0.044	0.049	0.044	0.044
linha 6	0.044	0.044	0.044	0.049	0.044	0.054	0.044	0.044
linha 7	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.049	0.054	0.049

	Média							
	coluna 0	coluna 1	coluna 2	coluna 3	coluna 4	coluna 5	coluna 6	coluna 7
linha 0	0.018	0.018	0.019	0.019	0.018	0.019	0.020	0.018
linha 1	0.016	0.015	0.019	0.020	0.019	0.020	0.020	0.019
linha 2	0.018	0.019	0.020	0.018	0.018	0.019	0.018	0.019
linha 3	0.029	0.008	0.019	0.019	0.017	0.019	0.019	0.019
linha 4	0.022	0.021	0.022	0.024	0.021	0.021	0.025	0.015
linha 5	0.022	0.025	0.012	0.015	0.027	0.015	0.011	0.015
linha 6	0.022	0.022	0.023	0.019	0.024	0.027	0.022	0.023
linha 7	0.020	0.023	0.021	0.022	0.021	0.023	0.023	0.022

	Mínimo							
	coluna 0	coluna 1	coluna 2	coluna 3	coluna 4	coluna 5	coluna 6	coluna 7
linha 0	-0.005	-0.005	0.000	-0.005	-0.005	-0.005	0.000	-0.005
linha 1	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.010
linha 2	-0.005	-0.005	-0.010	-0.005	-0.005	-0.005	-0.015	-0.005
linha 3	-0.005	-0.005	-0.010	-0.005	-0.010	-0.005	-0.005	-0.005
linha 4	-0.005	-0.005	-0.005	-0.015	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
linha 5	-0.010	-0.005	-0.020	-0.015	-0.010	0.000	-0.010	-0.005
linha 6	-0.005	0.000	-0.005	-0.005	-0.005	0.000	-0.005	-0.005
linha 7	-0.015	-0.005	-0.010	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005

Figura 4. 7 – Tensão descarregada na saída de cada pixel da matriz para a condição de escuro, ou seja, sem aplicação de luz no chip.

Observando a figura 4.6 é possível notar que o fotodiodo, com a aplicação $500\mu W$, não descarregou completamente em $500\mu s$. Entretanto, com a aplicação de $1mW$ observa-se que o mesmo descarrega completamente em aproximadamente $400\mu s$. Dessa forma, devemos tomar o cuidado de realizar a segunda leitura da tensão de saída em um instante de tempo anterior ao instante em que o pixel estiver completamente descarregado, esse instante vai variar de acordo com a potência da luz incidente. Assim, quando maior a potência de excitação óptica, menor deverá ser o tempo integração escolhido.

Após várias medições feitas com o chip IR2 dentro do intervalo de 450 à $950nm$, foi possível observar que para potências compreendidas no intervalo de $1mW$ a $2mW$, os tempos de integração devem estar contidos no intervalo de $100\mu s$ a $150\mu s$.

O dispositivos modernos contam com tecnologias para o aumento da sensibilidade como, por exemplo, a retro iluminação do pixel, além de mecanismos para redução dos ruídos e algoritmos de redução de FPN. Como os elementos de compensação de ruídos não estão presentes no chip, optou-se pela utilização da maior potência para que a medida da eficiência quântica no chip IR2 seja robusta e confiável.

A figura 4.8 mostra o resultado da leitura feita para o comprimento de onda de $633nm$, potência de $2mW$ e tempo de integração de $100\mu s$.

	Máximo							
	coluna 0	coluna 1	coluna 2	coluna 3	coluna 4	coluna 5	coluna 6	coluna 7
linha 0	0,791	0,854	0,903	0,869	0,674	0,942	0,942	0,938
linha 1	0,820	0,498	0,923	0,884	0,664	0,947	0,952	0,947
linha 2	0,854	0,913	0,962	0,884	0,664	0,952	0,820	0,815
linha 3	0,884	0,947	0,977	0,898	0,664	0,957	0,796	0,791
linha 4	0,898	0,962	0,991	0,908	0,669	0,962	0,830	0,830
linha 5	0,942	0,981	1,016	0,918	0,679	0,991	0,977	0,977
linha 6	0,908	0,625	1,001	0,898	0,669	0,977	0,967	0,967
linha 7	0,952	1,001	1,040	0,923	0,674	1,006	0,991	0,991

	Média							
	coluna 0	coluna 1	coluna 2	coluna 3	coluna 4	coluna 5	coluna 6	coluna 7
linha 0	0,732	0,798	0,834	0,808	0,622	0,877	0,876	0,876
linha 1	0,762	0,452	0,860	0,820	0,615	0,881	0,887	0,886
linha 2	0,792	0,848	0,894	0,825	0,617	0,887	0,756	0,756
linha 3	0,820	0,879	0,913	0,834	0,613	0,893	0,724	0,704
linha 4	0,830	0,893	0,924	0,840	0,619	0,894	0,768	0,767
linha 5	0,846	0,909	0,945	0,854	0,627	0,919	0,907	0,908
linha 6	0,838	0,573	0,931	0,836	0,621	0,910	0,903	0,902
linha 7	0,877	0,932	0,974	0,860	0,624	0,939	0,921	0,922

	Mínimo							
	coluna 0	coluna 1	coluna 2	coluna 3	coluna 4	coluna 5	coluna 6	coluna 7
linha 0	0,698	0,708	0,796	0,781	0,596	0,625	0,850	0,850
linha 1	0,732	0,425	0,469	0,796	0,591	0,601	0,859	0,859
linha 2	0,767	0,796	0,840	0,801	0,596	0,610	0,728	0,728
linha 3	0,762	0,801	0,889	0,811	0,591	0,591	0,708	0,708
linha 4	0,737	0,840	0,879	0,815	0,596	0,601	0,742	0,742
linha 5	0,781	0,884	0,898	0,825	0,601	0,635	0,879	0,879
linha 6	0,811	0,552	0,576	0,811	0,596	0,620	0,879	0,879
linha 7	0,850	0,869	0,942	0,830	0,601	0,649	0,894	0,898

Figura 4. 8 – Resultado da leitura para 633nm para cada pixel da matriz.

Conforme pode ser visto na figura 4.8 a tensão média obtida na leitura para esse tempo de exposição varia de 0,73 à 0,92V o que é bem maior que 23mV. Com isso, é possível desconsiderar a influência da corrente de escuro.

4.2. OBTENÇÃO DOS DADOS NECESSÁRIOS PARA CONSTRUÇÃO DA CURVA EQ

O método utilizado neste trabalho para calcular a eficiência quântica consiste basicamente na medida da tensão foto-gerada com a aplicação da técnica CDS para um pixel trabalhando em modo linear. Dessa forma, o programa descrito no apêndice B é utilizado para se medir a tensão após o carregamento do pixel (*RESET*) e no instante final do tempo de integração escolhido. A diferença entre esses dois valores resulta na própria tensão foto-gerada que será utilizada para o cálculo da corrente foto-gerada através da equação 3.59.

Após o cálculo da corrente, utiliza-se a equação 3.62 para mensurar o número de fótons absorvidos pelo sistema óptico. A tabela 7 mostra o conjunto de parâmetros utilizados para a ativação e medida da eficiência quântica do chip IR2 para 633 nm, esse conjunto de dados conta com algumas propriedades ópticas do silício que podem ser obtidas no apêndice D.

Tabela 7 – Conjunto de parâmetros utilizados para 633 nm.

V_{DD}	3,22	V	Tensão de alimentação dos pixels.
t_{int}	100,00	μs	Tempo de integração.
P_{total}	1,95	mW	Potência incidente.
d_{feixe}	8,00	mm	Diâmetro do feixe incidente no chio IR2.
A_{feixe}	50,24	mm^2	Área do feixe incidente no chip IR2.
P/A	0,04	W/mm^2	Potencia total distribuída na área do feixe incidente.
A_{pixel}	10,00	μm	Área total do pixel.
$fill$	56	%	Fator de preenchimento do pixel.
P_o	2,17E-06	W	Potência incidente na área sensível do pixel.

λ_o	633,00	nm	Comprimento de onda.
E_o	3,00E-19	J	Energia do fóton.
E_{tint}	2,17E-10	J	Energia incidente durante o tempo de integração
n_{ph}	7,26E+08		Número de fótons incidentes.
n_{si}	3,87		Índice de refração do silício para 633nm.
n_{ar}	1,00		Índice de refração do ar.
n_{SiO_2}	1,46		Índice de refração do SiO ₂ .
R_{SiO_2}	0,03		Coeficiente de reflexão entre ar e SiO ₂ .
R_{si}	0,35		Coeficiente de reflexão entre SiO ₂ e Silício.
N_a	2,12E+17	m-3	Concentração de portadores majoritários do silício tipo P.
$alpha$	3,20E+03	cm-1	Coeficiente de absorção do silício.
D	0,16	μm	Camada de depleção.
$N_{ph\ abs}$	4,55E+08		Número de fótons absorvidos.

A tabela 8 mostra os valores de tensões foto-geradas para o comprimento de onda de 633nm, e a tabela 9 mostra a corrente foto-gerada obtida através da aplicação dessas tensões na equação 3.59.

Tabela 8 - Tensão foto-gerada em Volts para o comprimento de onda de excitação de 633nm.

	Col0	Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7
Lin0	0,73	0,8	0,83	0,81	0,62	0,88	0,88	0,88
Lin1	0,76	0,5	0,86	0,82	0,62	0,88	0,89	0,89
Lin2	0,79	0,85	0,89	0,83	0,62	0,89	0,8	0,8
Lin3	0,82	0,88	0,91	0,83	0,61	0,89	0,7	0,7
Lin4	0,83	0,89	0,92	0,84	0,62	0,89	0,8	0,8
Lin5	0,85	0,91	0,95	0,85	0,63	0,92	0,91	0,91
Lin6	0,84	0,6	0,93	0,84	0,62	0,91	0,9	0,9
Lin7	0,88	0,93	0,97	0,86	0,62	0,94	0,92	0,92

Tabela 9 - Corrente foto-gerada por cada pixel em nano ampère, calculadas a partir da equação 3.59.

	Col0	Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7
Lin0	355,9	391,0	410,4	396,4	298,7	433,9	433,3	433,3
Lin1	371,8	213,1	424,6	402,9	295,1	436,0	439,3	438,8
Lin2	387,8	418,0	443,2	405,6	296,1	439,3	368,6	368,6
Lin3	402,9	434,9	453,7	410,4	294,1	442,6	357,0	339,1
Lin4	408,3	442,6	459,8	413,7	297,1	443,2	375,0	374,5
Lin5	416,9	451,5	471,5	421,3	301,2	457,0	450,4	450,9
Lin6	412,6	273,7	463,7	411,5	298,2	452,0	448,1	447,6
Lin7	433,9	464,2	487,7	424,6	299,7	468,1	458,1	458,7

Conforme já foi exposto, o sensor possui 64 píxeis, com 8 linhas e 8 colunas sendo que alguns píxeis estão parcialmente cobertos. Isso é notado pelas leituras das tabelas 8 e 9, nas quais se observa uma pequena diferença na leitura em relação aos píxeis descobertos. Além disso, toda a coluna 4 sempre apresenta uma leitura bastante inferior as demais. Esta leitura anômala se deve a uma imperfeição intencional introduzida no chip, no qual o canal de leitura desta coluna é levemente mais estreito que as demais.

Este trabalho se limita apenas em obter, de forma robusta e confiável, a eficiência quântica do dispositivo em estudo. Assim, todos os píxeis citados acima, que apresentam suas propriedades intencionalmente afetadas, serão desconsiderados no cálculo da eficiência quântica.

Após a obtenção da corrente foto-gerada, a eficiência quântica pode ser obtida através do cálculo do número de elétrons livres criados a partir da incidência da luz no pixel. Essa quantidade pode ser obtida através da carga elétrica, que por sua vez foi mensurada através da corrente foto-gerada com a aplicação da equação 3.64. Os valores encontrados estão apresentados nas tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Carga elétrica em pC .

	Col0	Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7
Lin0	35,6	39,1	41,0	39,6	29,9	43,4	43,3	43,3
Lin1	37,2	21,3	42,5	40,3	29,5	43,6	43,9	43,9
Lin2	38,8	41,8	44,3	40,6	29,6	43,9	36,9	
Lin3	40,3	43,5	45,4	41,0	29,4	44,3	35,7	33,9
Lin4	40,8	44,3	46,0	41,4	29,7	44,3	37,5	37,4
Lin5	41,7	45,1	47,1	42,1	30,1	45,7	45,0	45,1
Lin6	41,3	27,4	46,4	41,2	29,8	45,2	44,8	44,8
Lin7	43,4	46,4	48,8	42,5	30,0	46,8	45,8	45,9

Tabela 11 – Número de elétrons gerados ($\times 10^6$).

	Col0	Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7
Lin0	22,24	24,44	25,65	24,77	18,67	27,12	27,08	27,08
Lin1	23,24	13,32	26,53	25,18	18,44	27,25	27,46	27,42
Lin2	24,24	26,13	27,70	25,35	18,51	27,46	23,04	
Lin3	25,18	27,18	28,35	25,65	18,38	27,66	22,31	21,19
Lin4	25,52	27,66	28,74	25,86	18,57	27,70	23,44	23,40
Lin5	26,06	28,22	29,47	26,33	18,83	28,56	28,15	28,18
Lin6	25,79	17,10	28,98	25,72	18,64	28,25	28,01	27,97
Lin7	27,12	29,01	30,48	26,53	18,73	29,26	28,63	28,67

A eficiência quântica será obtida através da razão $N_e/N_{ph,abs}$. A Tabela 13 apresenta o resultado da eficiência quântica medida para cada pixel excitado pelo comprimento de onda de 633 nm.

Tabela 12 – Eficiência quântica de cada pixel quando excitados pelo comprimento de onda de 633nm.

	Col0	Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7
Lin0	0,489	0,538	0,564	0,545	0,411	0,596	0,596	0,596
Lin1	0,511	0,293	0,584	0,554	0,406	0,599	0,604	0,603
Lin2	0,533	0,575	0,609	0,558	0,407	0,604	0,507	0,507
Lin3	0,554	0,598	0,624	0,564	0,404	0,609	0,491	0,466
Lin4	0,561	0,609	0,632	0,569	0,409	0,609	0,516	0,515
Lin5	0,573	0,621	0,648	0,579	0,414	0,628	0,619	0,620
Lin6	0,567	0,376	0,637	0,566	0,410	0,621	0,616	0,615
Lin7	0,596	0,638	0,671	0,584	0,412	0,644	0,630	0,631

Calculando a média com as considerações já feitas, o resultado da eficiência quântica para 633nm é de aproximadamente $0,6 \pm 0,07$ elétron/fóton que também é representado na forma $60 \pm 7\%$.

Outro dado importante que pode ser obtido através desse método é a responsividade cujo valor mensurado de $0,2 \pm 0,02$ A/W está exposto na tabela 13.

Tabela 13 – Responsividade de cada pixel em A/W de cada pixel quando excitados pelo comprimento de onda de 633nm.

	Col0	Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7
Lin0	0,164	0,180	0,189	0,182	0,137	0,200	0,199	0,199
Lin1	0,171	0,098	0,195	0,185	0,136	0,201	0,202	0,202
Lin2	0,178	0,192	0,204	0,187	0,136	0,202	0,170	0,170
Lin3	0,185	0,200	0,209	0,189	0,135	0,204	0,164	0,156
Lin4	0,188	0,204	0,212	0,190	0,137	0,204	0,173	0,172
Lin5	0,192	0,208	0,217	0,194	0,139	0,210	0,207	0,207
Lin6	0,190	0,126	0,213	0,189	0,137	0,208	0,206	0,206
Lin7	0,200	0,214	0,224	0,195	0,138	0,215	0,211	0,211

Na literatura, os valores apresentados para a eficiência quântica de 633nm variam de 0,45 [6,18,23] à 0,95 [43], isso é um ponto a ser considerado visto que o valor de 0,6, está entre as faixas encontradas para a eficiência quântica nesse comprimento de onda.

Outro fator importante a ser notado é a unidade correta para a corrente foto-gerada, obtida através da aplicação das unidades de medida na equação 3.58 conforme pode ser visto na resolução a seguir,

$$i_{ph}[A] = \frac{A_j[m^2]}{\tau_{int}[s]} \left(2e[C] \varepsilon_{Si} [F.m^{-1}] N_a [m^{-3}] \right)^{1/2} (V_s^{1/2} - (V_s - V_{ph})^{1/2}) [V^{1/2}]$$

$$i_{ph}[A] = \frac{[m^2]}{[s]} \left(\frac{C^2}{Vm^4} \right)^{1/2} [V^{1/2}]$$

$$i_{ph}[A] = \frac{[m^2]}{[s]} \left[\frac{C}{m^2} \right] \left[\frac{1}{V^{1/2}} \right] [V^{1/2}]$$

$$i_{ph}[A] = \frac{C}{[s]} \quad \text{superíndice}$$

O último dado, e mais importante, se baseia no cálculo da eficiência quântica que utiliza a equação 3.58 composta pelas seguintes ordens de grandeza, carga elétrica ($e=1,6 \times 10^{-19} C$), concentração de portadores aceitadores no substrato ($N_a=2,12 \times 10^{17} cm^{-3}$), permissividade do silício ($1,04 \times 10^{-12} F/cm$), a área sensível em ($x10^{-6}$) e o tempo em ($x10^{-6}$). Além disso, também se utiliza a equação 3.62 composta pelo coeficiente de absorção ($x10^3 \sim x10^4$) e pela largura da camada de depleção ($0,16 \times 10^{-6}$). Mesmo com essas diferentes ordens de grandeza, o resultado obtido na aplicação da equação 3.64 foi 0,6 elétron/fóton, que estando entre 0 e 1, é um valor aceitável para a eficiência quântica.

Baseando-se na robustez do resultado obtido, os mesmos procedimentos foram feitos para os comprimentos de onda mostrados na figura 4.1 e os resultados foram anotados conforme se segue.

4.6. O ESPECTRO DE EFICIÊNCIA QUÂNTICA

Considerando todos os comprimentos de ondas disponíveis, chega-se ao gráfico da eficiência quântica para o chip IR2, figura 4.9. As tabelas com os resultados detalhados das medidas estão disponíveis no apêndice C.

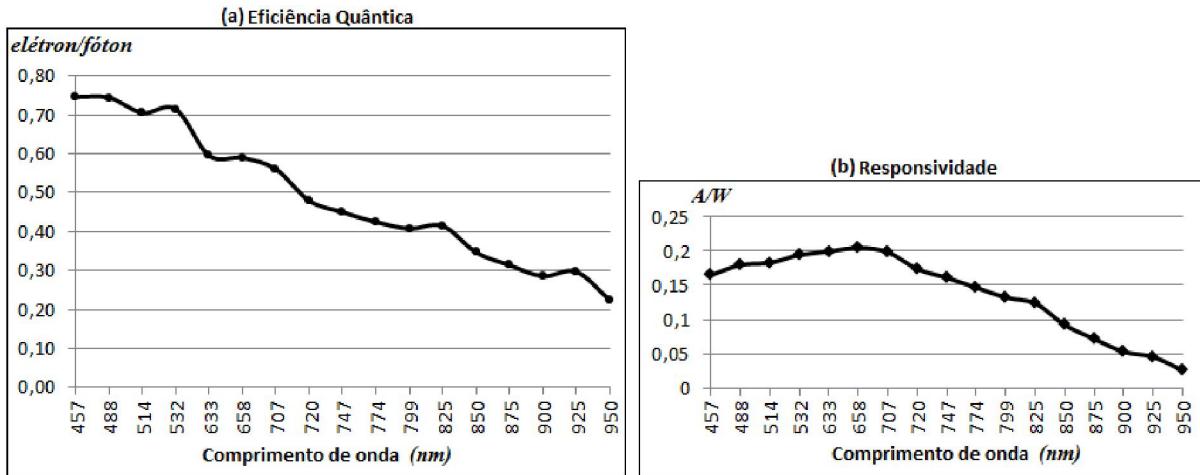


Figura 4. 9 – Resultados do chip IR2 para: (a) Eficiência Quântica; (b) eficiência quântica externa e; (c) Responsividade.

A corrente obtida para todos os comprimentos de onda testados ficou da ordem de centenas de nA , que encontram-se em concordância com a literatura existente [6] e dentro de um padrão aceitável para um sensor fabricado utilizando as tecnologias adotadas[6]. Na literatura são encontrados vários valores para eficiência quântica de imageadores CMOS, porém, não foi encontrado nenhum protocolo de referência com detalhes sobre os procedimentos utilizados para a determinação da eficiência quântica para um sensor de imagem CMOS 3T-APS. Entretanto, os resultados obtidos são bastante satisfatórios e em alguns pontos, aproximam-se muito das curvas encontradas em *datasheets* de alguns sensores de imagem CMOS comercializados atualmente conforme mostrados na figura 4.10.

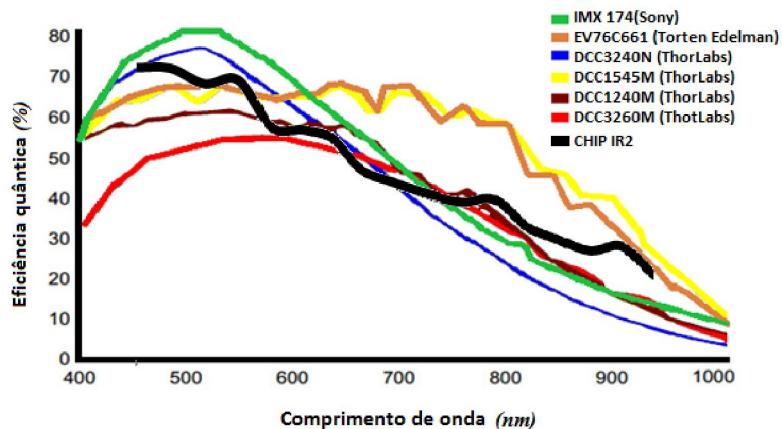


Figura 4. 10 - Resultado obtida para chip IR2 comparado com sensores fabricados com tecnologia similar [6,18,23].

5. CONCLUSÃO

Apesar de uma literatura escassa sobre o tema, os resultados encontrados para os comprimentos de onda testados encontram-se dentro do intervalo $0,1$ à 1 elétron/fóton. Além disso, o cálculo da EQ leva em consideração o cálculo da corrente foto-gerada dada pela equação 3.59 que possui variáveis das mais diferentes ordens de grandeza, mas mesmo assim, o resultado obtido estava dentro do esperado para um sensor de imagem CMOS.

Outro fator que torna a análise mais confiável é o valor obtido para a corrente foto-gerada, que estão em concordância com a literatura vigente (da ordem de nano amperes) [3,7,8,9]. Além disso, a excussão de tensão (descarga do pixel) medida e utilizada nos cálculos também está de acordo com a literatura já descrita para o chip IR2 [5,6,7] e tecnologias CMOS 3T-APS [36].

E finalmente, fazendo a comparação dos espectros encontrados na literatura com o resultado obtido neste trabalho, pode-se notar uma boa concordância com as eficiências quânticas de alguns dispositivos encontrados no mercado. Porém, vale lembrar que mesmo as tecnologias sendo semelhantes, vários fatores podem influenciar no resultado da EQ, como por exemplo, a presença de microlentes ou as dimensões utilizadas na construção dos píxeis tais como a profundidade da camada N^+ , a largura e o comprimento do pixel e, principalmente, o *fill-factor*.

O método utilizado neste trabalho para obtenção da eficiência quântica também proporcionou a obtenção da responsividade do chip que é a resposta de corrente para uma dada potência ótica incidente, o que também será muito importante para estudos posteriores no chip.

Alguns fatores importantes foram observados durante os experimentos como o efeito de múltiplas reflexões. Este efeito faz com que a diferença entre a leitura dos píxeis expostos e os tampados seja menor à medida que a potência ótica aumenta, dessa forma, dependendo da potência, os píxeis apresentam praticamente a mesma leitura, independente de estarem tampados ou não, devido às múltiplas reflexões. há um processo de difusão lateral causando crosstalk que não está sendo considerado.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se o estudo do efeito de *crosstalk*, no qual se estudará a influência de um pixel sobre outro adjacente na matriz e o estudo do ruído para várias potências aplicadas sobre o chip, estes dois estudos somados com os pontos observados neste trabalho, definirão os limites máximos e mínimos de potência para o correto funcionamento do chip IR2.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wilson, F.B. Hawkes; Optoelectronics, an introduction referency. 3th Edition. Nova York, 1998.
- [2] D. A. Neamen; "Semiconductor physics and devices", McGraw-Hill Higher Education, (2003).
- [3] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest, J. Salvi; "Review of CMOS image sensors", Micro- electronics Journal 37, 433{451 (1997)
- [4] JUNIOR, Aldemir Silva. CARACTERIZAÇÃO ELETRO-ÓPTICA DO RUÍDO DE UM SENSOR DE IMAGEM NO MODO LOGARÍTMICO EM TEMPERATURAS CRIOGÊNICAS. 2016. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Amazonas, Amazonas.
- [5] CASTTRO, Luís Smith. ELABORAÇÃO DO SETUP DE TESTES E CÓDIGO DE ACESSO DO SENSOR ÓPTICO HDR – APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DUPLA AMOSTRAGEM EM MODO LINEAR-LOGARÍTMICO PARA REDUÇÃO DE FP-N. 2015. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Amazonas, Amazonas.
- [6] OLIVEIRA, Ewerton Gomes. MODELO PARA ESCOLHA DE TOPOLOGIAS DE SENSORES DE PÍXEIS ATIVOS LOGARÍTMICOS ADEQUADAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES DE IMAGEM COM LARGO ALCANCE. 2016. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Amazonas, Amazonas.
- [7] SOUZA, Alexandre Kennedy Pinto. Monografia (Graduação), "Demultiplexação em Níveis Analógicos para o Controle de Sensores de Imagem de Largo Alcance Dinâmico", Departamento de Eletrônica e Telecomunicações, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.
- [8] FURTADO, André Santos de Oliveira. Fabricação e Caracterização de Sensor de Pixel Ativo com Tecnologia NMOS de Porta Metálica. 2009. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas.
- [9] CHMIELEWSKI, Adão Maciel Monteiro. ANÁLISE E PROJETO DE UM SENSOR DE IMAGEM EM 0.35 μ m CMOS PARA COMPRESSÃO DE DADOS NO PLANO FOCAL DE CÂMERAS DIGITAIS. 2009. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [10] DESMOND, Y.H.C., CMOS active pixel sensor for fault tolerance and background illumination subtraction, M.sc dissertation, Simon Fraser University, 2005.
- [11] Resposta espectral de um sensor CCD. <[http://www.andor.com/learning-academy/ccd-spectral-response-\(qe\)-defining-the-qe-of-a-ccd](http://www.andor.com/learning-academy/ccd-spectral-response-(qe)-defining-the-qe-of-a-ccd)>. Acessado em 08 de maio de 2017 as 16h47min.
- [12] Palakodety, Atmaram. CMOS ACTIVE PIXEL SENSORS FOR DIGITAL CAMERAS: CURRENT STATE-OF-THE-ART. 2007. 70p. Dissertation (M.sc). Univerity of Northe Texas, Texas.
- [13] MARICE, E., "Montagem Experimental Para Concretização de Câmeras Digitais". 146pgs. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrica) – Colegiado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- [14] DICK, R. H., WECKLER, G. P., "Integrated Arrays of Silicon Photodetectors for Image Sensing", IEEE Transactions on Electron Devices, v. ED-15, n. 4, pp. 196-201, Apr. 1968.
- [15] J. Nakamura; "Image sensors and signal processing for digital still cameras", CRC press, (2016).
- [16] C. H. Gerald; "Ccd arrays cameras and displays", Washington, Bellingham, (1998).
- [17] DA SILVA, Luciano Lourenço Furtado. Monografia (Graduação), "CIRCUITOS DE CONTROLE ANALÓGICO PARA SENSORES DE IMAGEM DO TIPO APS", Departamento de Eletrônica e Telecomunicações, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

- [18] Curva QE do sensor CMOS EV76C661. Disponível em: <<https://www.cloudynights.com/topic/382234-testing-next-generation-cmos-sensor/>>. Acesso em: 14 de Novembro de 2017 às 23h58min.
- [19] O. Y. Pecht and R. E. Cummings. CMOS Imagers: From Phototransduction to Image Processing. Kluwer, 2004.
- [20] LORENZO, E. Electricidad solar: ingenieria de los sistemas fotovoltaicos. Progensa, (1994) .
- [21] WEHR, Gabriela. Desenvolvimento e Comparação de Células Solares N+ P-N+ e N+ PP+ em Silício Multicristalino. 2011. 136p. Tesi (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [22] RESENDE, S. M., Materiais e Dispositivos Eletrônicos. 2^a ed. Livraria da Física, 2004.
- [23] Quantum Efficiency of Monochrome Cameras. Disponível em: <https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9_PF.cfm?ObjectGroup_ID=4024>. Acesso em: 16 de Novembro de 2017 as 22h31minh.
- [24] Quantum Efficiency of an n-well over p-substrate photodiode in the prototype CMOS imager. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/10/5/5014/htm>>. Acesso em: 15 de Novembro de 2017 às 13h21minh.
- [25] P. Nobel, Self-Scannedimage detectorarrays, EEE Transactionson Electron Devices (1968).
- [26] R.H. Nixon, S.E.Kemeny, B.Pain, C.O.Staller, and E.R.Fossum, 256x256 CMOS activepixel sensor camera-on-a-chip, EEE Journal of Solid- State Circuits (1996).
- [27] DWL Monteiro, G Vdovin, JG Rocha, SUP Science (2002)
- [28] CRUZ, Carlos A. Moraes, SIMPLIFIED WIDE DYNAMIC RANGE CMOS IMAGE SENSOR WITH 3T APS RESET-DRAIN ACTUATION. Tesi (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- [29] ISLAM, Md. Akramul. A SELF-ADJUSTING LIN-LOG ACTIVE PIXEL FOR WIDE DYNAMIC RANGE CMOS IMAGE SENSOR. 2015. 87p. Tesi (Degree of Bachelor of Science in Electrical and Electronic Engineering). Chittagong University of Engineering and Technology, Chittagong.
- [30] Large area CMOS active pixel sensor x-ray imager for digital breast tomosynthesis: Analysis, modeling, and characterization. Disponível em <<https://www.researchgate.net/publication/283115892>>. Acesso em 21 de setembro de 2017 as 21h35minh.
- [31] Suat Utku Ay. Photodiode Peripheral Utilization Effect on CMOS APS Pixel Performance. IEEE, 7p, July 2008.
- [32] Comparação entre CMOS e CCD. Disponível em <http://meroli.web.cern.ch/meroli/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html>. Acesso em 08 de junho de 2017 as 19h20minh.
- [33] Introduction to CMOS Image Sensors. Disponível em <<https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/digitalimaging/cmosimagesensors/>>. Acesso em 09 de Junho de 2017 as 20h49minh.
- [34] Anatomy of the Active Pixel Sensor Photodiode. Disponível em <<https://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/cmosimagesensors.html>>. Acessado em 09 de junho de 2017 as 21h17minh.
- [35] AR0130CS - 1/3-Inch CMOS Digital Image Sensor, Datasheet, Rev. 12, ON SEMICONDUCTOR, 2016.
- [36] ADITYA RAYANKULA, B.E. CMOS ACTIVE PIXEL IMAGE SHARP-NESS SENSOR. 2006. 183p. Thesis (Master of Science in Electrical Engineering). New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico.
- [37] Photodiode Characteristics and Applications. Disponível em <<http://www.osiopptoelectronics.com/application-notes/an-photodiode-parameters-characteristics.pdf>>. Acessado em 27 de setembro de 2017 às 14h58min.
- [38] Jaroslav Hynecek, Eric C. Fox e Douglas R. Dykaar.Sensor pixel with linear and logarithmic

- response. 2001. US6323479 B1. US Patent 6,323,479. Disponível em: <<http://ip.com/pat/US6323479>>. Acessado em 14 de outubro de 2017 às 19h23min.
- [39] Martin Wäny e CH Schindellegi. Photodetector and method for detecting radiation. US 6815685 B2. US Patent 6,815,685. Disponível em:<<http://ip.com/pat/US6815685>>.
- [40] Austriamicrosystems 0.35 µm CMOS C35 Process Parameters.
- [41] M. Tabet. "Double Sampling Techniques for CMOS Image Sensors." Ph.D. Dissertation, University of Waterloo, Canada, 2002.
- [42] R. Hornsey, Lecture slides, Topic: "Fabrication Technology and Pixel Design." Waterloo Institute for Computer Research, May 1999.
- [43] Sensor CMOS Prime95B <<https://www.photometrics.com>>. Acesso em 28 de abril de 2017 às 15h29min
- [44] Adimec Compares CCD vs CMOS. Disponível em <<http://image-sensors-world.blogspot.com.br/2015/03/adimec-compares-ccd-vs-cmos.html>>. Acesso em 29 de maio de 2017 às 17h12min.
- [45] Traditional Correlated Double Sampling Method for Noise Reduction. Disponível em <<http://lsi.epfl.ch/page-64063-en.html>>. Acessado em 20 de junho de 2017 às 18h11min.
- [46] Kodak - O Início da Era Digital e o fim da Película Fotográfica. Disponível em <<https://wilsonroque.blogspot.com.br/2015/08/kodak-o-inicio-da-era-digital-e-o-fim.html>>. Acessado em 29 de maio de 2017 às 16h44min.
- [47] DA SILVA, Luciano Lourenço Furtado da, Relatório de Estágio Supervisionado, "Banco de Testes para Sensores de Imagem de Longo Alcance Dinâmico", Departamento de Eletrônica e Telecomunicações, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.
- [48] Índice de Refração do SiO₂. Disponível em <https://www.rp-photonics.com/refractive_index.html>. Acessado em 27 de novembro de 2017 às 18h02min.
- [49] Índice de refração do silício. Disponível em <<https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Si&page=AsP-Nes>>. Acessado em 27 de novembro de 2017 às 00h12min.
- [50] Optical Propriedades of Silicon. Disponível em <<http://www.pveducation.org/pvcdrrom/materials/optical-properties-of-silicon>>. Acesso em 30 de março de 2018 às 17h12min.
- [51] Capacitor MOS. Disponível em: <https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter6/ch6_2.htm>. Acesso em: 20 de Novembro de 2017 às 11:21h.

APÊNDICE A

PROGRAMA PARA CONTROLAR UM PIXEL DA MATRIZ DO CHIP IR2

Este programa executa o controle de um pixel, nele é possível estabelecer o tempo de RESET e o tempo de exposição do pixel para poder visualizar o funcionamento do pixel escolhido através do osciloscópio.

```
void setup() {
    pinMode(10, OUTPUT);
    pinMode(9, OUTPUT);
    pinMode(8, OUTPUT);
    pinMode(7, OUTPUT);
    pinMode(6, OUTPUT);
    pinMode(5, OUTPUT);
    pinMode(4, OUTPUT);
    pinMode(3, OUTPUT);
    pinMode(2, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
}

int timereset=100; //tempo de carga do fotodiodo ou tempo de reset
int timeexpo=500; //tempo de exposição a luz no pixel em modo linear

//escolhe o pixel
digitalWrite(2,1); //A0
digitalWrite(3,1); //A1
digitalWrite(4,1); //A5
digitalWrite(5,1); //AC0
digitalWrite(6,1); //AC1
digitalWrite(7,1); //AC2

//Conrole do pixel escolhido
void loop() {
    digitalWrite(8,0);
    digitalWrite(9,0);
    digitalWrite(10,0);
    delayMicroseconds(timereset); //tempo de reset
    digitalWrite(8,1);
    delayMicroseconds(timeexpo); //tempo de exposição
}
```

APÊNDICE B

PROGRAMA PARA LEITURA DA MATRIZ COMPLETA EM MODO LINEAR COM APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE DUPLA AMOSTRAGEM (CDS)

O programa descrito nessa sessão efetuar a leitura do valor máximo, mínimo e médio para a tensão foto-gerada, o programa seleciona um pixel então lê a tensão na saída após o reset e após o tempo de exposição fazendo a diferença entre os dois dados resultando na tensão foto-gerada, para cada pixel são executadas n medidas em que n é escolhido pelo usuário através da variável *cmax*, no trabalho foram utilizadas mil medidas. Além disso, o programa também expõe a matriz com o maior valor encontrado e com o menor valor encontrado para que seja feita a análise se há discrepâncias na medida.

```
void setup() {
    pinMode(10, OUTPUT); //RW -> ROWSEL
    pinMode(9, OUTPUT); //RDR-> eRDR
    pinMode(8, OUTPUT); //RST-> eRST
    pinMode(7, OUTPUT); //AC2
    pinMode(6, OUTPUT); //AC1
    pinMode(5, OUTPUT); //AC0
    pinMode(4, OUTPUT); //A2
    pinMode(3, OUTPUT); //A1
    pinMode(2, OUTPUT); //A0
    Serial.begin(9600);
}

float v_dd;
float e_rdr;
float e_RST;
float VDD = A2;
float ERDR = A3;
float ERST = A4;
int timereset=50; // tempo reset
int timeexpo=100; // tempo de exposição
float outg = A0; // sinal na saída do pixel
float s1; // leitura no reset
float s2; // leitura após exposição
float vph; // tensão foto-gerada (CDS)
float vph_ac; // vph acumulado (média)
float vph_media; // média final
int count;
int cmax= 1000; //número de execuções
int n; //dividendo da média
int m=0;
float m1;
float m2;

void set(){
    Serial.println();
    Serial.println("*****");
    Serial.println("LEITURA DA MATRIZ");
    Serial.print("VDD = "); //imprime VDD
    v_dd = analogRead(VDD);
    Serial.println(5*v_dd/1024 );
    e_rdr = analogRead(ERDR);
    Serial.print("ERDR = "); //imprime ERDR
    Serial.println(5*e_rdr/1024 );
    e_RST = analogRead(ERST);
    Serial.print("ERST = "); //imprime RST
    Serial.println(5*e_RST/1024 );
    Serial.print("tempo de exposição = ");
    Serial.print(timeexpo);
    Serial.println(" microsegundos");
    Serial.println("*****");
    delay(1000);
}
//função para leitura do pixel
void lerpixel(){
count = 1;
```

```

vph_ac = 0;
n=1;
while (count <= cmax) {
//reset
digitalWrite(8,0);
digitalWrite(9,0);
digitalWrite(10,0);
delayMicroseconds(timereset);
s1 = analogRead(outg);
//exposição
digitalWrite(8,1); //RST
delayMicroseconds(timeexpo);
s2 = analogRead(outg);
vph = (s1-s2)*5/1024;
/*if(vph < 0.05)
{
n=n;
}
else
{*/
vph_ac = vph_ac + vph;
/*n=n+1;
}*/
count++;
}
vph_media=vph_ac/cmax;
Serial.print(vph_media,3);
Serial.print (" ");
}

void lermax(){
count = 0;
vph_ac = 0;
while (count <= cmax) {
digitalWrite(8,0);
digitalWrite(9,0);
digitalWrite(10,0);
delayMicroseconds(timereset);
s1 = analogRead(outg);
digitalWrite(8,1);
delayMicroseconds(timeexpo);
s2 = analogRead(outg);
vph = (s1-s2)*5/1024;

if(vph > vph_ac)
{
vph_ac=vph;
}
count++;
}
Serial.print(vph_ac,3);
Serial.print (" ");
}

void lermin(){
count = 0;
vph_ac = vph;
while (count <= cmax) {
digitalWrite(8,0);
digitalWrite(9,0);
digitalWrite(10,0);
delayMicroseconds(timereset);
s1 = analogRead(outg);
digitalWrite(8,1);
delayMicroseconds(timeexpo);
s2 = analogRead(outg);
vph = (s1-s2)*5/1024;
if(vph <= vph_ac)
{
vph_ac=vph;
}
count++;
}
Serial.print(vph_ac,3);
Serial.print (" ");
}

void coluna(){
digitalWrite(7,1);

```

```

digitalWrite(6,1);
digitalWrite(5,1);
lerpixel();
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,1);
digitalWrite(5,0);
lerpixel();
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,1);
lerpixel();
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,0);
lerpixel();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,1);
digitalWrite(5,1);
lerpixel();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,0);
lerpixel();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,1);
digitalWrite(5,1);
lerpixel();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,0);
coluna();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,1);
coluna();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,0);
coluna();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,1);
coluna();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,0);
coluna();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,1);
coluna();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,0);
coluna();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,1);
coluna();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,0);
coluna();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,0);
coluna();
Serial.println();

```

```

digitalWrite(5,1);
lermax();
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,1);
digitalWrite(5,0);
lermax();
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,1);
lermax();
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,0);
lermax();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,1);
digitalWrite(5,1);
lermax();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,1);
lermax();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,1);
lermax();
}

void linhamax() {
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,1);
colunamax();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,0);
colunamax();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,1);
colunamax();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,0);
colunamax();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,1);
colunamax();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,0);
colunamax();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,1);
colunamax();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,0);
colunamax();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,0);
colunamax();
Serial.println();
}
}

void colunamin() {
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,1);
digitalWrite(5,1);

```

```

lermin();
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,1);
digitalWrite(5,0);
lermin();
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,1);
lermin();
digitalWrite(7,1);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,0);
lermin();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,1);
digitalWrite(5,1);
lermin();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,1);
lermin();
digitalWrite(7,0);
digitalWrite(6,0);
digitalWrite(5,1);
lermin();
}
}

void linhamin() {
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,1);
colunamin();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,0);
colunamin();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,1);
colunamin();
Serial.println();
digitalWrite(4,1);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,0);
colunamin();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,1);
colunamin();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,1);
digitalWrite(2,0);
colunamin();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,1);
colunamin();
Serial.println();
digitalWrite(4,0);
digitalWrite(3,0);
digitalWrite(2,0);
colunamin();
Serial.println();
}

void mediaRDR() {
m2=0;
count = 0;
vph_ac = 0;
while (count <= cmax) {

```

```

digitalWrite(8,0);
digitalWrite(9,0);
digitalWrite(10,0);
delayMicroseconds(timereset);
s1 = analogRead(outg);
digitalWrite(8,1);
delayMicroseconds(timeexpo);
s2 = analogRead(outg);
e_rdr = analogRead(ERDR);
m1=5*e_rdr/1024;
m2=m2+m1;
count++;
}
Serial.print("VRDR = ");
Serial.print(m2/cmax);
Serial.println();
}

int nt=1;
void loop() {
while (m<nt){
set();
Serial.println();
Serial.println("Máximo");
linhamax();
Serial.println();
Serial.println("Média");
linha();
Serial.println();
Serial.println("Mínimo");
linhamin();
Serial.println();
Serial.println("VDD");
mediaRDR();
m++;
}
}

```

APÊNDICE C

RESULTADO DAS MEDIDAS DAS TENSÕES FOTO-GERADAS PARA OS COMPRIMENTOS DE ONDAS ADQUIRIDOS PARA O TESTE

457nm - Potência: 2,05 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,22V$, $t=100\mu s$.

1,09	1,10	1,07	1,08	1,12	1,06	1,05	1,09
1,07	0,38	1,07	1,05	1,08	1,02	1,05	1,08
1,07	1,05	1,06	1,07	1,10	1,03	0,98	0,91
1,09	1,08	1,05	1,07	1,07	1,04	0,86	0,71
1,06	1,09	1,07	1,09	1,10	1,05	0,99	0,93
1,08	1,10	1,10	1,09	1,10	1,07	1,06	1,11
1,05	0,52	1,08	1,07	1,11	1,07	1,08	1,10
1,08	1,08	1,09	1,09	1,08	1,08	1,06	1,12

488nm - Potência: 2,0 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,22V$, $t=100\mu s$.

0,80	0,84	0,85	0,75	0,57	0,82	0,82	0,82
0,80	0,42	0,85	0,74	0,56	0,81	0,82	0,82
0,79	0,82	0,85	0,74	0,56	0,81	0,80	0,80
0,80	0,83	0,85	0,75	0,55	0,81	0,78	0,78
0,80	0,83	0,85	0,75	0,56	0,81	0,79	0,79
0,81	0,85	0,87	0,77	0,57	0,84	0,84	0,83
0,79	0,57	0,85	0,75	0,56	0,81	0,82	0,82
0,81	0,85	0,87	0,77	0,56	0,84	0,83	0,83

514nm - Potência: 2,0 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,22V$, $t=100\mu s$.

0,81	0,85	0,86	0,76	0,57	0,83	0,83	0,83
0,81	0,34	0,87	0,76	0,56	0,82	0,83	0,83
0,81	0,83	0,86	0,76	0,57	0,82	0,77	0,77
0,81	0,84	0,86	0,76	0,56	0,83	0,72	0,72
0,81	0,85	0,87	0,77	0,57	0,83	0,79	0,79
0,82	0,86	0,90	0,78	0,57	0,85	0,85	0,85
0,81	0,48	0,87	0,76	0,57	0,83	0,84	0,84
0,82	0,86	0,89	0,78	0,57	0,85	0,85	0,84

532nm - Potência: 2,01 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,18V$, $t=100\mu s$.

0,73	0,79	0,82	0,84	0,83	0,90	0,93	0,93
0,73	0,35	0,83	0,85	0,82	0,90	0,95	0,95
0,73	0,78	0,83	0,85	0,82	0,90	0,75	0,76
0,75	0,80	0,83	0,86	0,82	0,91	0,70	0,71
0,73	0,80	0,85	0,87	0,83	0,92	0,78	0,78
0,75	0,81	0,86	0,88	0,83	0,94	0,97	0,97
0,76	0,44	0,86	0,88	0,84	0,93	0,97	0,96
0,80	0,87	0,91	0,91	0,84	0,96	0,98	0,98

633nm - Potência: 1,95 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,22V$, $t=100\mu s$.

0,73	0,80	0,83	0,81	0,62	0,88	0,88	0,88
0,76	0,45	0,86	0,82	0,62	0,88	0,89	0,89
0,79	0,85	0,89	0,83	0,62	0,89	0,76	0,76
0,82	0,88	0,91	0,83	0,61	0,89	0,73	0,70
0,83	0,89	0,92	0,84	0,62	0,89	0,77	0,77
0,85	0,91	0,95	0,85	0,63	0,92	0,91	0,91
0,84	0,57	0,93	0,84	0,62	0,91	0,90	0,90
0,88	0,93	0,97	0,86	0,62	0,94	0,92	0,92

658nm - Potência: 1 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,22V$, $t=100\mu s$.

0,375	0,405	0,363	0,356	0,273	0,412	0,443	0,435
0,405	0,286	0,388	0,382	0,288	0,433	0,468	0,447
0,431	0,470	0,415	0,401	0,293	0,455	0,423	0,398
0,455	0,500	0,439	0,431	0,302	0,478	0,427	0,386
0,482	0,518	0,461	0,443	0,311	0,500	0,457	0,417
0,499	0,551	0,492	0,474	0,327	0,533	0,561	0,494
0,515	0,408	0,507	0,484	0,324	0,549	0,580	0,482
0,583	0,631	0,558	0,527	0,331	0,593	0,614	0,510

707nm - Potência: 2,0 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,09V$, $t=150\mu s$.

1,000	1,063	1,054	1,019	0,632	1,047	1,021	0,909
1,014	0,745	1,049	1,010	0,631	0,999	1,027	0,911
1,023	1,025	1,045	1,013	0,626	1,015	1,032	0,890
1,042	1,054	1,035	1,018	0,626	1,020	1,016	0,894
1,028	1,065	1,051	1,031	0,630	1,033	0,997	0,898
1,046	1,068	1,083	1,042	0,644	1,051	1,034	0,932
1,020	0,915	1,057	1,018	0,628	1,045	1,045	0,905
1,046	1,055	1,066	1,038	0,637	1,058	1,029	0,925

720nm - Potência: 1,85 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,09V$, $t=150\mu s$.

1,03	1,07	1,05	1,01	0,62	1,04	1,01	0,89
1,03	0,91	1,05	1,00	0,61	0,99	1,02	0,89
1,03	1,02	1,04	1,00	0,61	1,01	1,03	0,88
1,05	1,05	1,03	1,01	0,61	1,01	1,01	0,88
1,03	1,06	1,04	1,02	0,62	1,03	0,99	0,88
1,04	1,06	1,08	1,03	0,63	1,05	1,03	0,91
1,02	1,04	1,05	1,01	0,61	1,04	1,04	0,89
1,04	1,05	1,06	1,03	0,63	1,05	1,02	0,91

747nm - Potência: 2,0 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,10V$, $t=150\mu s$.

1,06	1,08	1,05	1,02	0,62	1,04	1,02	0,90
1,04	1,02	1,05	1,01	0,62	1,00	1,02	0,90
1,04	1,02	1,04	1,01	0,61	1,01	1,03	0,88
1,05	1,05	1,03	1,01	0,62	1,02	1,01	0,89
1,03	1,06	1,05	1,03	0,62	1,03	0,99	0,90
1,05	1,06	1,08	1,04	0,64	1,05	1,03	0,93
1,02	1,05	1,05	1,01	0,62	1,04	1,04	0,90
1,04	1,05	1,06	1,03	0,63	1,05	1,02	0,92

774nm - Potência: 2,2 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,10V$, $t=150\mu s$.

1,06	1,08	1,05	1,02	0,62	1,04	1,02	0,90
1,04	1,02	1,05	1,01	0,62	1,00	1,02	0,90
1,04	1,02	1,04	1,01	0,61	1,01	1,03	0,88
1,05	1,05	1,03	1,01	0,62	1,02	1,01	0,89
1,03	1,06	1,05	1,03	0,62	1,03	0,99	0,90
1,05	1,06	1,08	1,04	0,64	1,05	1,03	0,93
1,02	1,05	1,05	1,01	0,62	1,04	1,04	0,90
1,04	1,05	1,06	1,03	0,63	1,05	1,02	0,92

799nm - Potência: 2,0 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,02V$, $t=150\mu s$.

0,63	0,70	0,77	0,82	0,80	0,83	0,83	0,87
0,66	0,64	0,82	0,87	0,82	0,81	0,84	0,86
0,71	0,78	0,87	0,91	0,83	0,83	0,84	0,86
0,74	0,82	0,89	0,93	0,83	0,83	0,83	0,88
0,77	0,86	0,92	0,96	0,84	0,84	0,81	0,86
0,82	0,91	0,97	0,98	0,86	0,86	0,84	0,88
0,83	0,86	0,97	0,96	0,85	0,85	0,85	0,87
0,94	0,97	0,98	0,98	0,86	0,86	0,84	0,89

825nm - Potência: 2,07 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,02V$, $t=150\mu s$.

0,86	0,86	0,84	0,84	0,76	0,84	0,81	0,85
0,84	0,86	0,84	0,82	0,75	0,79	0,82	0,84
0,84	0,82	0,83	0,83	0,75	0,81	0,83	0,84
0,86	0,85	0,83	0,84	0,75	0,81	0,81	0,86
0,83	0,85	0,84	0,85	0,75	0,82	0,79	0,84
0,84	0,85	0,86	0,85	0,76	0,84	0,82	0,86
0,82	0,84	0,84	0,84	0,75	0,83	0,84	0,86
0,84	0,84	0,85	0,85	0,76	0,84	0,82	0,87

850nm - Potência: 2,04 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,02V$, $t=150\mu s$.

0,64	0,65	0,63	0,63	0,55	0,63	0,61	0,61
0,63	0,64	0,63	0,62	0,55	0,60	0,61	0,61
0,63	0,62	0,63	0,62	0,55	0,61	0,62	0,62
0,64	0,63	0,62	0,63	0,55	0,61	0,61	0,60
0,62	0,64	0,63	0,64	0,55	0,62	0,60	0,60
0,63	0,64	0,65	0,64	0,56	0,63	0,62	0,62
0,62	0,63	0,63	0,63	0,55	0,62	0,62	0,62
0,63	0,63	0,64	0,64	0,56	0,63	0,61	0,61

875nm - Potência: 2,07 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,02V$, $t=150\mu s$.

0,52	0,52	0,51	0,51	0,44	0,50	0,49	0,49
0,50	0,52	0,50	0,49	0,44	0,48	0,49	0,49
0,51	0,49	0,50	0,50	0,44	0,48	0,49	0,49
0,51	0,51	0,49	0,50	0,44	0,49	0,49	0,48
0,50	0,51	0,50	0,51	0,44	0,49	0,48	0,48
0,51	0,51	0,52	0,51	0,45	0,50	0,49	0,49
0,49	0,50	0,51	0,50	0,44	0,50	0,50	0,50
0,50	0,50	0,51	0,51	0,45	0,51	0,49	0,49

900nm - Potência: 2,0 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,01V$, $t=150\mu s$.

0,25	0,29	0,32	0,31	0,31	0,35	0,32	0,39
0,26	0,27	0,33	0,33	0,33	0,37	0,33	0,41
0,27	0,31	0,35	0,34	0,34	0,38	0,33	0,41
0,29	0,33	0,37	0,35	0,35	0,40	0,35	0,40
0,30	0,34	0,38	0,37	0,37	0,41	0,34	0,42
0,32	0,36	0,40	0,38	0,38	0,43	0,40	0,48
0,33	0,36	0,42	0,39	0,39	0,44	0,42	0,49
0,37	0,42	0,46	0,42	0,42	0,47	0,46	0,52

925nm - Potência: 2,0 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,01V$, $t=150\mu s$.

0,22	0,26	0,28	0,31	0,22	0,24	0,26	0,28
0,23	0,25	0,30	0,33	0,23	0,25	0,27	0,29
0,24	0,28	0,32	0,34	0,24	0,27	0,27	0,30
0,26	0,30	0,33	0,36	0,25	0,28	0,28	0,30
0,27	0,31	0,34	0,38	0,26	0,28	0,29	0,32
0,28	0,32	0,36	0,39	0,26	0,30	0,31	0,34
0,29	0,32	0,38	0,41	0,28	0,31	0,33	0,35
0,32	0,37	0,41	0,44	0,31	0,33	0,35	0,37

950nm - Potência: 2,0 mW, diâmetro: 8,0 mm e $V_{RDR}=3,01V$, $t=150\mu s$.

0,13	0,15	0,16	0,18	0,13	0,14	0,15	0,17
0,14	0,14	0,17	0,19	0,13	0,15	0,16	0,16
0,14	0,16	0,18	0,20	0,14	0,15	0,16	0,16
0,15	0,17	0,19	0,21	0,15	0,16	0,16	0,15
0,15	0,18	0,20	0,22	0,15	0,17	0,17	0,17
0,16	0,19	0,21	0,23	0,15	0,17	0,18	0,19
0,17	0,18	0,22	0,24	0,17	0,18	0,19	0,20
0,19	0,21	0,24	0,25	0,18	0,19	0,20	0,22

APÊNDICE D

PROPRIEDADES ÓPTICAS DO SILÍCIO ABSORÇÃO DE ACORDO COM O COMPRIMENTO DE ONDA

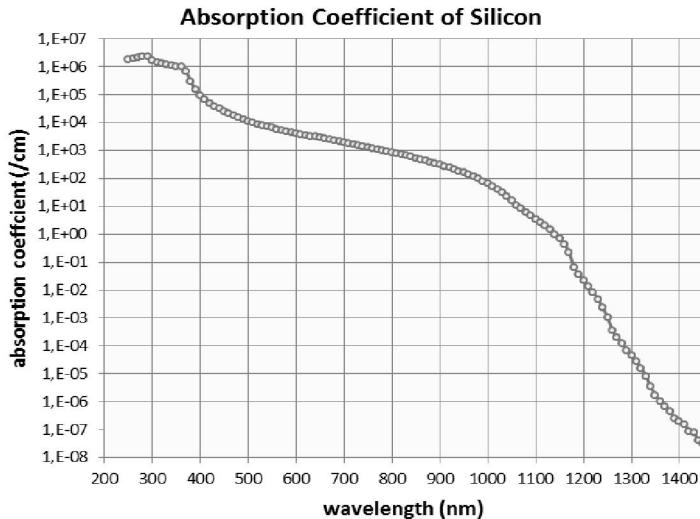


Figura D. 1 – Coeficiente de absorção do silício [50].

ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO SILÍCIO DE ACORDO COM O COMPRIMENTO DE ONDA

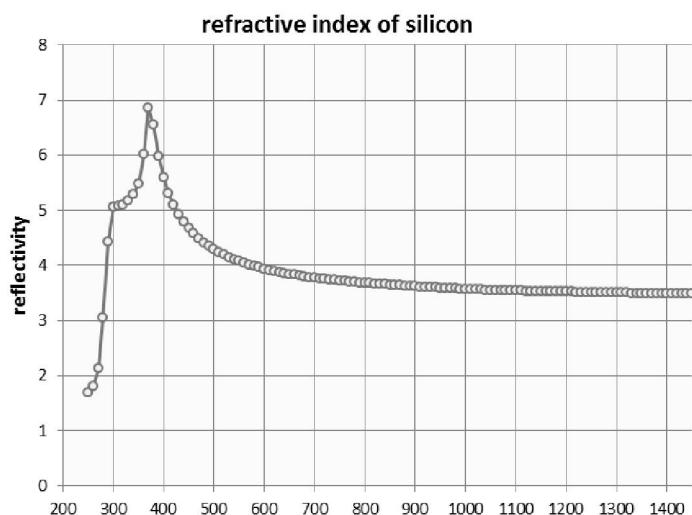


Figura D. 2 - Índice de refração do silício [50].

ÍNDICE DE REFRAÇÃO PARA O DIÓXIDO DE SILÍCIO.

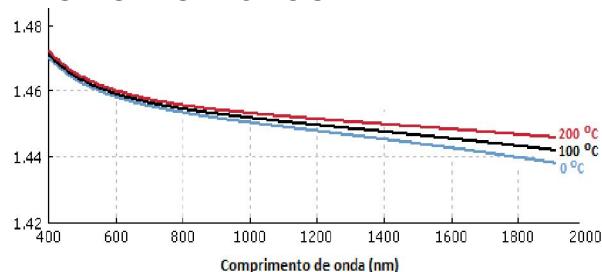


Figura D. 3 – Índice de refração do dióxido de silício [adaptado de 48].

VALORES QUANTIFICADOS PARA CADA COMPRIMENTO DE ONDA [50].

Tabela D. 1

Comprimento de Onda (nm)	Coeficiente de Absorção (cm ⁻¹)	Índice de Refração	Comprimento de Onda (nm)	Coeficiente de Abs (cm ⁻¹)	Índice de Refração
250	1,84E+06	1,694	750	1,30E+03	3,723
260	1,97E+06	1,8	760	1,19E+03	3,714
270	2,18E+06	2,129	770	1,10E+03	3,705
280	2,36E+06	3,052	780	1,01E+03	3,696
290	2,24E+06	4,426	790	9,28E+02	3,688
300	1,73E+06	5,055	800	8,50E+02	3,681
310	1,44E+06	5,074	810	7,75E+02	3,674
320	1,28E+06	5,102	820	7,07E+02	3,668
330	1,17E+06	5,179	830	6,47E+02	3,662
340	1,09E+06	5,293	840	5,91E+02	3,656
350	1,04E+06	5,483	850	5,35E+02	3,65
360	1,02E+06	6,014	860	4,80E+02	3,644
370	6,97E+05	6,863	870	4,32E+02	3,638
380	2,93E+05	6,548	880	3,83E+02	3,632
390	1,50E+05	5,976	890	3,43E+02	3,626
400	9,52E+04	5,587	900	3,06E+02	3,62
410	6,74E+04	5,305	910	2,72E+02	3,614
420	5,00E+04	5,091	920	2,40E+02	3,608
430	3,92E+04	4,925	930	2,10E+02	3,602
440	3,11E+04	4,793	940	1,83E+02	3,597
450	2,55E+04	4,676	950	1,57E+02	3,592
460	2,10E+04	4,577	960	1,34E+02	3,587
470	1,72E+04	4,491	970	1,14E+02	3,582
480	1,48E+04	4,416	980	9,59E+01	3,578
490	1,27E+04	4,348	990	7,92E+01	3,574
500	1,11E+04	4,293	1000	6,40E+01	3,57
510	9,70E+03	4,239	1010	5,11E+01	3,566
520	8,80E+03	4,192	1020	3,99E+01	3,563
530	7,85E+03	4,15	1030	3,02E+01	3,56
540	7,05E+03	4,11	1040	2,26E+01	3,557
550	6,39E+03	4,077	1050	1,63E+01	3,554
560	5,78E+03	4,044	1060	1,11E+01	3,551
570	5,32E+03	4,015	1070	8,00E+00	3,548
580	4,88E+03	3,986	1080	6,20E+00	3,546
590	4,49E+03	3,962	1090	4,70E+00	3,544
600	4,14E+03	3,939	1100	3,50E+00	3,541
610	3,81E+03	3,916	1110	2,70E+00	3,539
620	3,52E+03	3,895	1120	2,00E+00	3,537
630	3,27E+03	3,879	1130	1,50E+00	3,534
640	3,04E+03	3,861	1140	1,00E+00	3,532
650	2,81E+03	3,844	1150	6,80E-01	3,53
660	2,58E+03	3,83	1160	4,20E-01	3,528
670	2,38E+03	3,815	1170	2,20E-01	3,526
680	2,21E+03	3,8	1180	6,50E-02	3,524
690	2,05E+03	3,787	1190	3,60E-02	3,522
700	1,90E+03	3,774	1200	2,20E-02	3,52
710	1,77E+03	3,762	1210	1,30E-02	3,528
720	1,66E+03	3,751	750	1,30E+03	3,723

Comprimento de Onda (nm)	Coeficiente de Absorção (cm ⁻¹)	Índice de Refração	Comprimento de Onda (nm)	Coeficiente de Abs (cm ⁻¹)	Índice de Refração
730	1,54E+03	3,741	1250	1,00E-03	3,511
740	1,42E+03	3,732	1260	3,60E-04	3,51
750	1,30E+03	3,723	760	1,19E+03	3,714
760	1,19E+03	3,714	770	1,10E+03	3,705
770	1,10E+03	3,705	1270	2,00E-04	3,508
780	1,01E+03	3,696	1280	1,20E-04	3,507
790	9,28E+02	3,688	1290	7,10E-05	3,506
800	8,50E+02	3,681	1300	4,50E-05	3,504
810	7,75E+02	3,674	1310	2,70E-05	3,503
820	7,07E+02	3,668	1320	1,60E-05	3,501
830	6,47E+02	3,662	1330	8,00E-06	3,5
840	5,91E+02	3,656	1340	3,50E-06	3,498
850	5,35E+02	3,65	1350	1,70E-06	3,497
860	4,80E+02	3,644	1360	1,00E-06	3,496
870	4,32E+02	3,638	1370	6,70E-07	3,495
880	3,83E+02	3,632	1380	4,50E-07	3,493
890	3,43E+02	3,626	1390	2,50E-07	3,492
900	3,06E+02	3,62	1400	2,00E-07	3,491
910	2,72E+02	3,614	1410	1,50E-07	3,49
920	2,40E+02	3,608	1420	8,50E-08	3,489
930	2,10E+02	3,602	1430	7,70E-08	3,488
940	1,83E+02	3,597	1440	4,20E-08	3,487
950	1,57E+02	3,592	1450	3,20E-08	3,486
960	1,34E+02	3,587			
970	1,14E+02	3,582			
980	9,59E+01	3,578			
990	7,92E+01	3,574			
1000	6,40E+01	3,57			
1010	5,11E+01	3,566			
1020	3,99E+01	3,563			
1030	3,02E+01	3,56			
1040	2,26E+01	3,557			
1050	1,63E+01	3,554			
1060	1,11E+01	3,551			
1070	8,00E+00	3,548			
1080	6,20E+00	3,546			
1090	4,70E+00	3,544			
1100	3,50E+00	3,541			
1110	2,70E+00	3,539			
1120	2,00E+00	3,537			
1130	1,50E+00	3,534			
1140	1,00E+00	3,532			
1150	6,80E-01	3,53			
1160	4,20E-01	3,528			
1170	2,20E-01	3,526			
1180	6,50E-02	3,524			
1190	3,60E-02	3,522			
1200	2,20E-02	3,52			
1210	1,30E-02	3,528			
1220	8,20E-03	3,516			
1230	4,70E-03	3,515			
1240	2,40E-03	3,513			

APÊNDICE E

PROPRIEDADES DA JUNÇÃO P-N

A figura E.1a mostra uma junção P-N que é a junção metalúrgica de um semicondutor do tipo P (dopado com aceitadores) e um do tipo N (dopado com doadores) em que há difusão de lacunas do lado N para o P e de elétrons do lado P para o N quando polarizada.

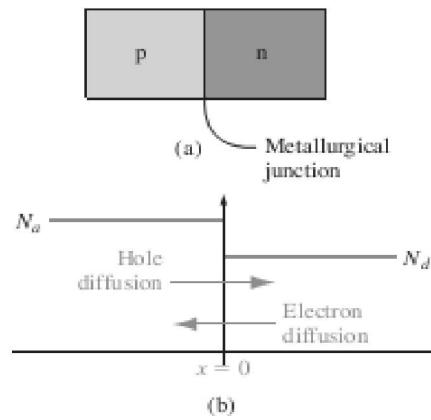


Figura E. 1 – Junção P-N [2]

As cargas positivas e negativas próximas à junção induzem um campo elétrico na direção positivo-negativo (N para P) essa região em que são concentradas as cargas é chamada de região carregada ou região de depleção, a figura E.2 mostra o sentido das forças e do campo elétrico na região.

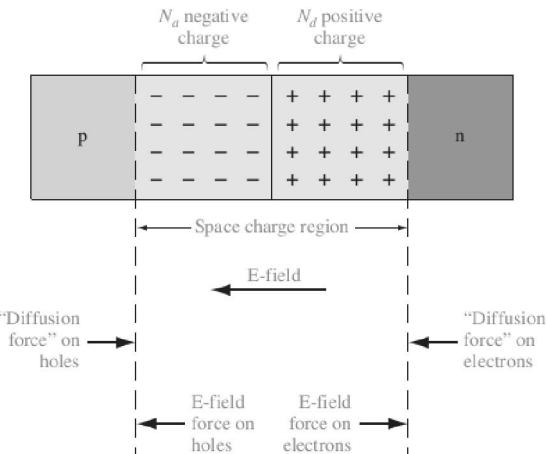


Figura E. 2

Para a junção P-N têm-se as seguintes caracterizações: Sem polarização, com polarização direta e com polarização reversa, para esse trabalho será necessário à compreensão da polarização reversa que depende da compreensão da junção sem polarização, os dois casos estão descritos neste trabalho.

JUNÇÃO P-N SEM POLARIZAÇÃO

Aqui serão descritas as fórmulas para caracterização da junção sem corrente circulando, ou seja, sem nenhuma tensão aplicada sobre a junção fazendo com esteja em equilíbrio térmico des-

sa forma o nível de energia de Fermi é constante em todo o sistema, a figura E.3 mostra o nível de Fermi para esse sistema em que V_{bi} é chamado de potencial interno ou barreira de potencial.

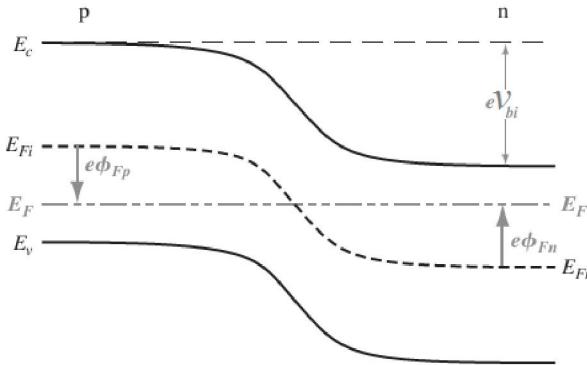


Figura E. 3 – Energia de Fermi sem polarização [2].

A barreira potência é uma barreira que deve ser superada para que os elétrons do lado N atravessem para o lado P, esse potencial interno é dado por,

$$V_{bi} = |\phi F_n| + |\phi F_p|. \quad (\text{E.1})$$

Na região N a concentração de elétrons é dada por,

$$n_o = N_c \exp \left[\frac{-(E_c - E_F)}{k_b T} \right]. \quad (\text{E.2})$$

Que também pode ser escrita como,

$$n_o = n_i \exp \left[\frac{-(e\phi_{Fn})}{k_b T} \right]. \quad (\text{E.3})$$

Sendo,

$$e\phi F_n = E_F - E_{Fi}. \quad (\text{E.4})$$

Resolvendo a equação na condição de equilíbrio térmico, $n_o = N_d$, tem-se:

$$\phi_{Fn} = \frac{-k_b T}{e} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right). \quad (\text{E.5})$$

Analogamente para região P tem-se,

$$\phi_{Fp} = \frac{+k_b T}{e} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right). \quad (\text{E.6})$$

Com isso,

$$V_{bi} = \frac{k_b T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right). \quad (\text{E.7})$$

Sendo $k_b T/e$ definida como tensão térmica.

CAMPO ELÉTRICO NA REGIÃO DE DEPLEÇÃO

O campo elétrico na região de depleção é criado devido às cargas positivas e negativas cujas densidades estão expostas na figura E.4 e a equação matemática que o descreve é estabelecida através da equação de Poisson dada por,

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{dE(x)}{dx}. \quad (\text{E.8})$$

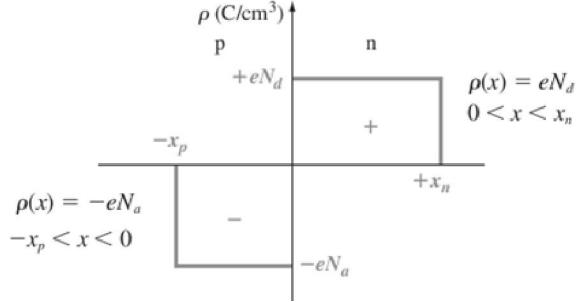


Figura E. 4 – Densidade de cargas para ambos os lados assumindo distribuição uniforme aproximação abrupta entre as partes [2].

O campo elétrico é obtido através da integração de E.8 e o resultado é dado por,

$$E = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx = - \int \frac{eN_a}{\epsilon_s} dx = -\frac{eN_a}{\epsilon_s} x + C_1. \quad (\text{E.9})$$

Assumindo que o campo elétrico é nulo em $x = -x_p$ e $x = x_n$, tem-se que,

$$E = -\frac{eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) \quad (-x_p \leq x \leq 0). \quad (\text{E.10})$$

$$E = -\frac{eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad (0 \leq x \leq x_n). \quad (\text{E.11})$$

Para $x = 0$ tem-se a seguinte solução:

$$N_a x_p = N_d x_n. \quad (\text{E.12})$$

Unindo as informações tem-se o gráfico do campo elétrico na região de depleção,

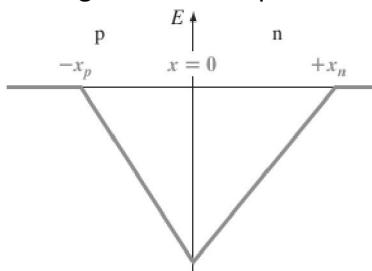


Figura E. 5 – campo elétrico sem aplicação de tensão [2].

O potencial pode ser obtido através da integração do campo elétrico cujo resultado é,

$$\phi(x) = - \int E(x) dx = \int \frac{eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) dx. \quad (\text{E.13})$$

$$\phi(x) = \frac{eN_a}{\epsilon_s} \left(\frac{x^2}{2} + x_p \cdot x \right) + C_1. \quad (\text{E.14})$$

Fazendo a mesma análise para ambos os lados tem-se:

$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2 \quad (0 \leq x \leq x_n). \quad (\text{E.15})$$

Dessa forma,

$$v_{bi} = \phi(x = x_n) = \frac{e}{2\epsilon_s}(N_d x_n^2 + N_a x_p^2). \quad (\text{E.16})$$

O gráfico para o potencial na região de depleção está exposto na figura E.6.

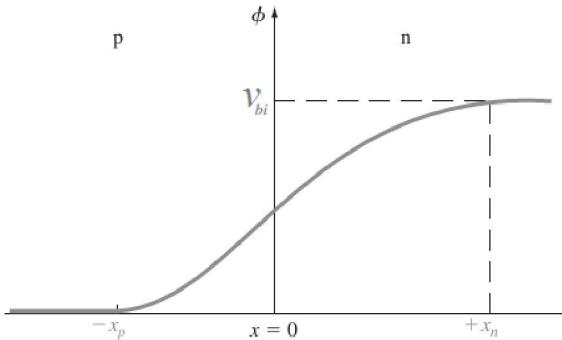


Figura E. 6 – Potencial na camada de depleção [2].

LARGURA DA CAMADA DE DEPLEÇÃO

A largura da camada de depleção na região P pode ser determinada por,

$$x_p = \frac{N_d x_n}{N_a}. \quad (\text{E.17})$$

Aplicando essa equação na equação do potencial interno e resolvendo vem,

$$x_n = \left[\frac{2\epsilon_s \cdot v_{bi}}{e} \left(\frac{N_a}{N_d} \right) \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2}. \quad (\text{E.18})$$

Similarmente tem-se que,

$$x_p = \left[\frac{2\epsilon_s \cdot v_{bi}}{e} \left(\frac{N_d}{N_a} \right) \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2}. \quad (\text{E.19})$$

A largura total da camada de depleção será dada por, $W = x_n + x_p$, com resultado,

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s \cdot v_{bi}}{e} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2}. \quad (\text{E.20})$$

JUNÇÃO P-N COM POLARIZAÇÃO REVERSA

Ao se aplicar uma tensão reversa sobre a junção P-N, figura E.7, o nível de energia de Fermi não será mais constante ao longo do sistema e a tensão total do sistema será acrescentada da tensão Reversa aplicada, dessa forma,

$$v_{total} = v_{bi} + V_R = |\phi F_n| + |\phi F_p| + V_R. \quad (\text{E.21})$$

Sendo o potencial interno é o mesmo do definido em condições de equilíbrio térmico e V_R é a tensão reversa aplicada.

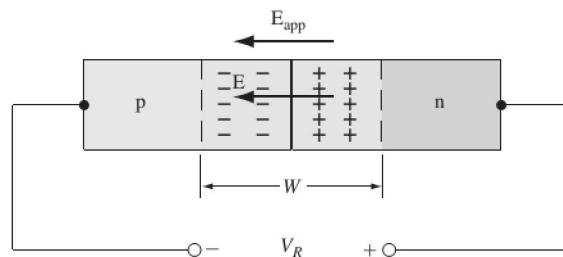


Figura E. 7 – Polarização reversa da junção P-N [2].

Com isso teremos um aumento da largura da camada de depleção e uma mudança no campo, a figura E.8 mostra o nível de Fermi para uma tensão reversa aplicada.

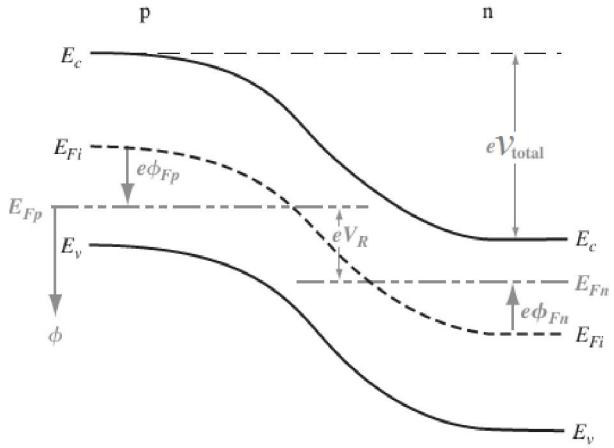


Figura E. 8 – Nível de Fermi para tensão reversa aplicada [2].

Considerando a análise para o caso sem polarização, a camada de depleção pode ser obtida através da substituição da tensão de potencial interno pela tensão total, tendo como resultado,

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s \cdot (v_{bi} + V_R)}{e} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2}. \quad (\text{E.22})$$

De forma análoga o campo elétrico será acrescido da tensão reversa, dessa forma, o campo elétrico máximo na junção será de,

$$E_{\max} = \frac{-eN_d x_n}{\epsilon_s} = \frac{-eN_a x_p}{\epsilon_s}. \quad (\text{E.23})$$

Cuja solução é,

$$E_{\max} = - \left[\frac{2e(v_{bi} + V_R)}{\epsilon_s} \left(\frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2}. \quad (\text{E.24})$$

Que também pode ser escrita por,

$$E_{\max} = - \frac{2(v_{bi} + V_R)}{W}. \quad (\text{E.25})$$

CAPACITÂNCIA DE JUNÇÃO

Uma capacidade está associada à separação entre duas regiões carregadas, a figura E.9 mostra a densidade de carga para a tensão reversa aplicada,

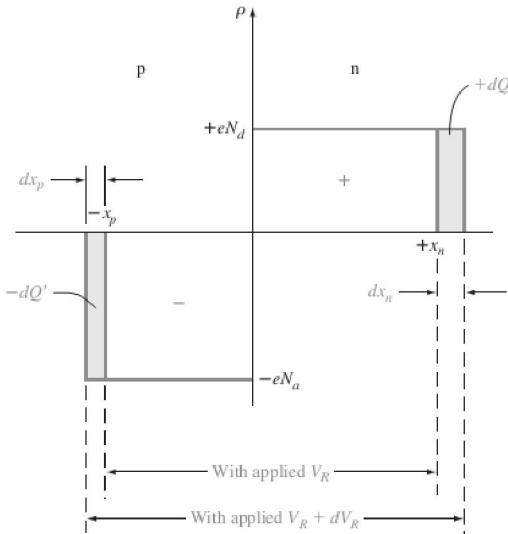


Figura E. 9 – Densidade de Carga para V_R e $V_R + dV_R$ [2].

Essa capacitância é definida por,

$$C = \frac{dQ'}{sV_R}. \quad (\text{E.26})$$

Sendo,

$$dQ' = eN_d dx_n = eN_a dx_p. \quad (\text{E.27})$$

Logo,

$$C = \frac{dQ'}{sV_R} = eN_d \frac{dx_n}{dV_R}. \quad (\text{E.28})$$

Cuja solução é,

$$C = \left[\frac{e\epsilon_s N_a N_d}{2(v_{bi} + V_R)(N_a + N_d)} \right]^{1/2}. \quad (\text{E.29})$$

As informações contidas neste apêndice foram obtidas através do resumo da seguinte Biблиографia: D. A. Neamen; “Semiconductor physics and devices”, McGraw-Hill Higher Education, (2003).