



Marcelo Gomes Rua

**Desenvolvimento e otimização de
fotodetectores de InGaAs-InP para detecção
no infravermelho de onda curta**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Guilherme Monteiro Torelly
Coorientadora: Prof. Patrícia Lustoza de Souza

Rio de Janeiro
Outubro de 2024



Marcelo Gomes Rua

**Desenvolvimento e otimização de
fotodetectores de InGaAs-InP para detecção
no infravermelho de onda curta**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Guilherme Monteiro Torelly

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Patrícia Lustoza de Souza

Coorientadora

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Prof. Gustavo Soares Vieira

Instituto de Estudos Avançados – IEAv

Prof. José Alexandre Diniz

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Prof. Paulo Sérgio Soares Guimarães

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Prof. Pedro Henrique Pereira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Rio de Janeiro, 07 de Outubro de 2024

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marcelo Gomes Rua

Mestrado em Engenharia Elétrica com ênfase em Nanotecnologia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2019), Bacharel em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Universidade Severino Sombra (2016) e Técnico em Informática pelo Colégio Estadual Theodorico Fonseca (2010). Trabalha na área de nanotecnologia, pesquisando novas técnicas para otimizar dispositivos semicondutores do grupo III-V.

Ficha Catalográfica

Rua, Marcelo Gomes

Desenvolvimento e otimização de fotodetectores de InGaAs-InP para detecção no infravermelho de onda curta / Marcelo Gomes Rua; orientador: Guilherme Monteiro Torelly; coorientadora: Patrícia Lustoza de Souza. – 2024.

77 f: il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Fotodetector. 3. SWIR. 4. InGaAs. 5. InGaAsP. 6. Antirreflexo. I. Torelly, Guilherme Monteiro. II. Souza, Patrícia Lustoza de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Agradeço,

primeiramente aos meus pais, Maria Alice, Marcos Vinicius e meu segundo pai, Paulo César, por todo apoio incondicional, pela motivação e pela educação ensinada ao longo da minha vida. Palavras não são suficientes para descrever a gratidão que sinto.

à Cristiani Hertel, minha companheira em todas as jornadas e empreitadas/furadas que eu escolho. Obrigado por sempre me apoiar (mesmo que contrariada) e caminhar junto comigo, nessa jornada e em muitas outras que viram pelo caminho.

à minha orientadora/coorientadora, profa. Patrícia Lustoza de Souza, há quem admire muito. Agradeço a confiança depositada em mim como orientando durante grande parte do curso de doutorado, a confiança depositada, os conhecimentos adquiridos em todas as reuniões, as correções sobre os diversos trabalhos realizados e o tratamento sempre gentil e atencioso não somente comigo, mas com todos.

ao meu orientador, prof. Guilherme Monteiro Torelly, por me aceitar como orientando, por toda disponibilidade, todos os ensinamentos, discussões e contribuições nos trabalhos. Obrigado por ajudar a organizar ainda mais o laboratório e reparar os equipamentos essenciais.

ao meu amigo Rudy Kawabata, pela gentileza, amizade, pela ajuda em todas as partes do trabalho e nos momentos difíceis. Agradeço por todo conhecimento compartilhado, pelas discussões sobre os mais diversos assuntos e por sempre esconder as minhas coisas, em especial meu celular. Sem sua participação, este trabalho não seria concluído.

ao prof. Maurício Pamplona Pires, da UFRJ, por todos os ensinamentos, discussões, pela persistência na solução dos muitos problemas experimentais enfrentados e principalmente pelo excelente senso de humor.

à Luciana Dornelas, pelos bons momentos no laboratório, pelas risadas, pelos crescimentos e pela energia de trabalho que contagia a todos.

ao Marcelo Lessa, nosso querido técnico, que luta dia-após-dia contra todos os problemas que surgem nessa área experimental e é claro pelas piadinhas marotas durante os momentos de descontração.

aos meus ex-companheiros de república: Pedro Henrique, Beatriz e Clarissa, por todos os momentos divertidos, as reuniões para lanche e os complicados momentos durante e após a pandemia. Muito obrigado pela ajuda e pelos conhecimentos acrescentados ao longo dessa jornada.

aos amigos do LabSem que sempre são solícitos em ajudar e que tornam o laboratório um lugar extremamente agradável de se trabalhar: William Machado, Jéssica Lorenzo, Graciana e Jailson.

ao prof. Gustavo Vieira, do Centro Técnico Aeroespacial, pelos conhecimentos compartilhados, pela grande ajuda com as máscaras de fotolitografia e por se mostrar sempre muito gentil e atencioso.

ao prof. Carlos Ferreira e a profa. Leila Rosa, do Instituto Militar de Engenharia, por disponibilizarem o uso dos equipamentos em seu laboratório e por sempre se mostrarem solícitos e atenciosos.

à PUC-Rio e ao Departamento de Engenharia Elétrica por ter me proporcionado realizar tanto o mestrado quanto o doutorado com bolsa e o suporte oferecido durante esses períodos.

às agências de fomento, CNPq, FAPERJ e FINEP, sem as quais este trabalho não seria possível.

o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigado!

Resumo

Rua, Marcelo Gomes; Torelly, Guilherme Monteiro; Souza, Patrícia Lustoza de. **Desenvolvimento e otimização de fotodetectores de InGaAs-InP para detecção no infravermelho de onda curta**. Rio de Janeiro, 2024. 77p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sensores de infravermelho possuem uma vasta gama de aplicações civis e militares. Exatamente pelo forte interesse militar, esses dispositivos são considerados tecnologia sensível e têm sua comercialização controlada pelos governos dos países produtores. Os fotodiodos de InGaAs construídos sobre substratos de InP são indicados para cobrir a faixa espectral conhecida como infravermelho de onda curta (SWIR, do inglês, *short-wave infrared*), que vai de 0,9 até 1,7 μm . Tal faixa espectral é útil no combate a incêndios florestais, na localização de pistas de pouso e decolagem clandestinas e na visualização em missões noturnas. Nesta tese foram investigadas duas inovações para otimizar o desempenho de diodos *pin* de InGaAs/InP na faixa do SWIR. A primeira otimização proposta foi a introdução do quaternário InGaAsP entre a camada ativa de InGaAs e o InP *n+*, visando reduzir o armadilhamento nessa interface. Com a introdução do quaternário, obtivemos um aumento integral de 12% na intensidade da fotocorrente para a faixa do comprimento de onda de 1000 a 1700 nm. A segunda otimização proposta foi a deposição de um revestimento antirreflexo formado por duas bicamadas de TiO_2 e SiO_2 . Esta otimização visa aumentar a fração dos fótons transmitidos que podem contribuir para a geração da fotocorrente. Com o revestimento antirreflexo, obtivemos um aumento aproximado de 25% na intensidade da fotocorrente para todos os dispositivos. Usando como referência o dispositivo com as duas modificações propostas, o aumento na responsividade foi aproximadamente 6 vezes superior à do dispositivo sem quaternário, de 2,62 mA/W contra 0,45 mA/W, respectivamente. Já a detectividade normalizada, teve um aumento aproximado de 24 vezes maior do que o dispositivo convencional, de $1,14 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ contra $4,83 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, respectivamente. Os resultados apresentados indicam que ambas as propostas de fato melhoraram o desempenho dos dispositivos convencionais na faixa do SWIR.

Palavras-chave

Fotodetector; SWIR; InGaAs; InGaAsP; Antirreflexo.

Abstract

Rua, Marcelo Gomes; Torelly, Guilherme Monteiro (Advisor); Souza, Patrícia Lustoza de (Co-Advisor). **Development and optimization in InGaAs-InP photodetectors for short-wave infrared detection.** Rio de Janeiro, 2024. 77p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Infrared sensors have a wide range of civil and military applications. Precisely because of the strong military interest, these devices are considered sensitive technology, and the governments of the producing countries control their commercialization. InGaAs photodiodes built on InP substrates are indicated to cover the spectral range known as short-wave infrared (SWIR), which goes from 0.9 to 1.7 μm . This spectral range is useful in fighting forest fires. This spectral range is very useful in fighting forest fires, locating clandestine landing and takeoff runways, and visualization in night missions. In this thesis, two innovations were investigated to improve the performance of diodes of the InGaAs/InP *pin* diodes in the SWIR range. The first approach proposed was the introduction of the InGaAsP quaternary between the InGaAs active layer and the InP *n+*, aiming to reduce trapping at this interface. With the introduction of the quaternary, we obtained an integral increase of 12% in the photocurrent intensity for the wavelength range from 1000 to 1700 nm. The second approach suggested optimization was the deposition of an antireflective coating formed by two bilayers of TiO_2 and SiO_2 . This optimization aims to increase the fraction of transmitted photons that can contribute to the generation of the photocurrent. With the anti-reflective coating, we obtained an approximate 25% increase in the photocurrent intensity for all devices. Using the device with the two proposed modifications as a reference, the responsivity increase was approximately 6 times higher than that of the device without quaternary, 2.62 mA/W versus 0.45 mA/W, respectively. The normalized detectivity had an increase of roughly 24 times greater than the conventional device, of $1.14 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ against $4.83 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, respectively. The results presented in this thesis indicate that both proposals improved the performance of conventional devices in the SWIR band.

Keywords

Photodetector; SWIR; InGaAs; InGaAsP; Anti-reflective.

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Fotodetectores e suas aplicações	17
1.2	Motivação	20
1.3	Objetivo	20
2	Fundamentos teóricos	21
2.1	Semicondutores	21
2.2	Corrente de escuro	26
2.3	Fotocorrente	27
2.4	Responsividade	28
2.5	Detectividade	29
3	Técnicas de fabricação e caracterização dos dispositivos	33
3.1	Crescimento epitaxial	33
3.2	Deposição por MOVPE	33
3.3	Difratometria de raios-x	34
3.4	Fotoluminescência	37
3.5	Pulverização Catódica	39
3.6	Elipsometria	40
3.7	Espectrofotometria	41
4	Primeira otimização - introdução do quaternário	43
4.1	Produção do dispositivo	43
4.2	Caracterizações	49
5	Segunda otimização - revestimento antirreflexo	53
5.1	Revestimento antirreflexo	53
5.2	Simulação do revestimento AR	53
5.3	Revestimento AR no dispositivo estudado	63
5.4	Fotocorrente	65
5.5	Responsividade	67
5.6	Detectividade normalizada	69
6	Considerações finais e projetos futuros	72
7	Referências bibliográficas	74

Lista de figuras

Figura 1.1	Primeiro transistor criado por William Shockley, Walter Brattain e John Bardeen no Bell Labs, imagem (a). Em (b) temos o esquemático detalhado do dispositivo.	16
Figura 1.2	Aplicação do SWIR para diferenciação química. Em (a) temos a faixa do visível e em (b) temos a faixa do SWIR.	18
Figura 1.3	Detecção dos traços originais de uma obra de arte. Comparativo entre faixa do visível (a) e do SWIR (b).	18
Figura 1.4	Detecção do foco de incêndios em floresta. Ambas as imagens foram feitas pelo mesmo satélite, porém com sensores de captura de imagens distintos. Em (a) temos a faixa do visível e em (b) temos a faixa do SWIR.	19
Figura 1.5	Nestas imagens temos uma estrada escura durante o período noturno. Com os faróis acessos (a) é possível observar a estrada, a divisão da pista e as árvores. Porém, usando sensores na faixa do SWIR, mesmo com os faróis apagados (d), é possível observar a via nitidamente.	19
Figura 2.1	Região de depleção em estado de equilíbrio.	22
Figura 2.2	Processo de criação do par elétron-buraco, sentido de deslocamento dos portadores e direção do campo elétrico.	23
Figura 2.3	Estrutura típica de fotodiodos de InGaAs do tipo pin (p-intrínseco-n). Em <i>a</i> observa-se a estrutura do dispositivo, com as ligas que compõem cada camada. Em <i>b</i> é mostrado o dispositivo metalizado, com os contatos elétricos e a representação de como é coletada a fotocorrente.	24
Figura 2.4	Curvas características de corrente por tensão de uma junção <i>p-n</i> no escuro (P_L) e sob uma potência luminosa (P_1). Destaque para área tracejada representativa da região de ótima operação do fotodiodo.	25
Figura 2.5	Coeficiente de absorção dos principais semicondutores e das ligas utilizadas nesta tese (InP, InGaAs e InGaAsP).	27
Figura 2.6	Lente antirreflexo ao meio mostrando o cancelamento das refletâncias através das interferências destrutivas.	32
Figura 3.1	Experimento de difração de raios-x utilizando-se um cristal de referência com intuito de estreitar a dispersão em comprimento de onda do feixe emitido pela fonte de raios-x.	35
Figura 3.2	Exemplo de um experimento de difração de raios-x. Normalmente o pico maior está relacionado com a difração do substrato, enquanto o segundo pico está relacionado com a camada depositada.	36
Figura 3.3	Diagrama das principais informações de ligas usadas nos semicondutores III-V. Cada ponto de uma determinada liga situada nas linhas possui somente uma composição, ex: O ternário InGaAs casado (mesmo parâmetro de rede) com InP possui uma única composição possível: 47% de Gálio para 53% de Índio, como indicada no gráfico. Para determinar a composição de ligas quaternárias é necessário obter o <i>gap</i> de energia da liga e o parâmetro de rede da mesma, pois como pode ser observado na figura, as ligas quaternárias possuem uma gama de possibilidades de composição nas áreas I, II e III.	37

Figura 3.4	Explicação gráfica de um experimento de fotoluminescência convencional.	38
Figura 3.5	Representação esquemática do experimento de fotoluminescência utilizado. O laser, em verde, é modulado e passa por um jogo de espelhos e de lentes para ser focado sobre a amostra. A emissão da amostra, em vermelho, também passa por um conjunto de lentes para ser focada na entrada do monocromador.	39
Figura 3.6	Esquema ótico detalhado de como é feita a obtenção da variação dos planos p e s para a medida de elipsometria.	41
Figura 3.7	Exemplo de uma medida típica de elipsometria. Onde temos o ângulo elíptico de interesse (ψ) e a defasagem angular (Δ) entre o ângulo linear de referência e o ângulo elíptico de interesse. Temos também o valor de MSE que relaciona as curvas experimentais com o modelo computacional, para obter a espessura do filme depositado.	42
Figura 4.1	Estrutura tipo mesa do fotodiodo de InGaAs, após a difusão uniforme do dopante Zn.	43
Figura 4.2	Diagrama de bandas da estrutura sem o quaternário.	44
Figura 4.3	Estrutura tipo mesa do fotodiodo de InGaAs, otimizada com a inclusão do quaternário InGaAsP.	45
Figura 4.4	Espectro de fotoluminescência do InGaAsP sobre substrato de InP em 300 K.	46
Figura 4.5	Difração de raios-x do InGaAsP sobre substrato de InP em 300 K.	46
Figura 4.6	Diagrama das amostras no espaço de busca dos parâmetros de difusão. Os pontos em vermelho representam as amostras produzidas e as linhas representam somente um guia.	48
Figura 4.7	Dispositivo preparado para caracterização. No círculo vermelho estão os contatos na camada $n+$ (InP) e fora do círculo estão os contatos da camada $p+$ (InGaAs).	49
Figura 4.8	Medidas de corrente de escuro com variação da temperatura de 78 a 300 K, para o dispositivo sem quaternário (DC).	50
Figura 4.9	Curvas de corrente de escuro dos dispositivos. Em preto tracejado e pontilhado temos a curva do dispositivo convencional (DC). Em marrom temos a curva pontilhada do dispositivo com quaternário InGaAsP (DQ). As curvas das correntes de escuro foram obtidas em temperatura ambiente (300 K).	51
Figura 4.10	Espectros de fotocorrente dos dispositivos. Em preto tracejado e pontilhado temos a curva do dispositivo sem o quaternário (DC) e em marrom temos a curva pontilhada do dispositivo com quaternário (DQ). Os espectros de fotocorrente foram obtidos em temperatura ambiente (300 K) e no modo fotovoltaico.	52
Figura 5.1	Resultados das curvas de refletância simuladas para diferente quantidades de camadas de dielétricos, usando o <i>software Essential Macleod</i> . Todas as curvas são baseadas nos dados presentes na base de dados do <i>software</i> .	54

Figura 5.2	Resultados das curvas simuladas de refletância para o revestimento AR proposto (vermelho pontilhado), o InP sem revestimento (rosa tracejado curto), o TiO ₂ (azul tracejado) e o SiO ₂ (cinza sólido). Todas as curvas são baseadas nos dados presentes na base de dados do <i>software</i> .	55
Figura 5.3	Resultado das medidas de elipsometria para o material TiO ₂ depositado por pulverização catódica sobre substrato de silício. O valor do erro quadrático médio (MSE) presente mostra a precisão do ajuste do modelo com a medida.	56
Figura 5.4	Resultado das medidas de elipsometria para o material SiO ₂ depositado por pulverização catódica sobre substrato de silício. O MSE mostra o quão preciso foi o modelo usado para prever a espessura.	57
Figura 5.5	Espessuras medidas por elipsometria de TiO ₂ , SiO ₂ e SiO ₂ /TiO ₂ depositados sobre Si e InP, e os valores esperados dessas espessuras segundo a calibração.	58
Figura 5.6	Resultado das medidas de elipsometria para o material SiO ₂ sobre TiO ₂ depositado por pulverização catódica sobre substrato de silício. O MSE mostra o quão preciso foi o modelo usado para prever a espessura.	59
Figura 5.7	Resultado das medidas de elipsometria para o material SiO ₂ sobre TiO ₂ depositado por pulverização catódica sobre substrato de fosfeto de índio. O MSE mostra o quão preciso foi o modelo usado para prever a espessura.	59
Figura 5.8	Curvas de refletância medidas (substrato e revestimento antirreflexo) contra as curvas obtidas por meio de simulação teórica. Em preto, traçado e pontilhado temos o espectro de refletância experimental do substrato de InP, em rosa tracejado curto o espectro teórico do InP, em linha sólida verde temos o espectro experimental do revestimento proposto e em pontilhado vermelho temos o espectro de refletância do projeto teórico.	60
Figura 5.9	Espectros de refletância produzidos anteriormente em comparação com o espectro ajustado pelos parâmetros obtidos por elipsometria. Em preto, traçado e pontilhado temos o espectro de refletância experimental do substrato de InP, em linha sólida e verde temos o espectro experimental do revestimento proposto, em laranja, tracejado, pontilhado e pontilhado temos o espectro de refletância teórico usando os parâmetros medidos por elipsometria e em vermelho pontilhado temos o espectro de refletância do primeiro projeto teórico.	61
Figura 5.10	Espectros de refletância produzidos anteriormente em comparação com o espectro ajustado por um novo banco de dados. Em preto, traçado e pontilhado temos o espectro de refletância experimental do substrato de InP, em linha sólida e verde temos o espectro experimental do revestimento proposto, em laranja, tracejado, pontilhado e pontilhado temos o espectro de refletância simulado usando os parâmetros medidos por elipsometria na PUC-Rio e em vermelho pontilhado temos o espectro de refletância simulado usando os parâmetros de um novo banco de dados.	62
Figura 5.11	Estrutura tipo mesa do fotodiodo de InGaAs, otimizada com a inclusão do quaternário InGaAsP e do revestimento AR.	63

Figura 5.12 Espectros de refletância teórico e experimental do dispositivo final. Em preto tracejado e pontilhado (1) temos o dispositivo DC e em verde contínuo (3) o dispositivo DC + AR. Em rosa tracejado curto temos a curva teórica (2) do dispositivo DC e em vermelho pontilhado (4) do dispositivo DC + AR.

64

Figura 5.13 Curvas de corrente de escuro dos dispositivos. Em marrom pontilhado temos a curva do dispositivo com quaternário InGaAsP (DQ) e em roxo tracejado curto temos a curva do dispositivo com quaternário InGaAsP com revestimento AR (DQ+AR). Em verde contínuo temos a curva do dispositivo convencional com revestimento AR (DC+AR) e em preto tracejado e pontilhado temos a curva do dispositivo convencional (DC). As curvas das correntes de escuro foram obtidas em temperatura ambiente (300 K).

65

Figura 5.14 Espectros de fotocorrente dos dispositivos. Em roxo tracejado curto temos a curva do dispositivo com quaternário InGaAsP com revestimento AR (DQ+AR) e em verde contínuo temos a curva do dispositivo convencional com revestimento AR (DC+AR). Em marrom pontilhado temos a curva do dispositivo com quaternário InGaAsP (DQ) e em preto tracejado e pontilhado temos a curva do dispositivo convencional (DC). Os espectros de fotocorrente foram obtidos em temperatura ambiente (300 K).

66

Figura 5.15 Valores de responsividade das amostras obtidos em temperatura ambiente e no modo fotovoltaico. Em preto e verde temos os dispositivos sem adição do quaternário, DC e DC +AR, respectivamente. Em roxo temos o dispositivo com quaternário e revestimento AR. Os valores de responsividade foram obtidos em temperatura ambiente (300 K) e no modo fotovoltaico.

67

Figura 5.16 Valores de responsividade das amostras obtidos em temperatura ambiente (300 K) e com variação da tensão reversa aplicada (-500 mV até -50 mV). Ambos os dispositivos medidos possuem o revestimento AR, em roxo temos o dispositivo DQ e em verde temos o dispositivo DC. Destaque para os melhores valores obtidos pelos dispositivos.

68

Figura 5.17 Valores da corrente de ruído das amostras obtidos em temperatura ambiente (300 K), em função da tensão aplicada e no modo fotocondutivo. Em verde temos o dispositivo DC e em roxo temos o dispositivo DQ, ambos com revestimento AR.

69

Figura 5.18 Valores de detectividade normalizada das amostras obtidos em temperatura ambiente (300 K), em função da tensão aplicada e no modo fotocondutivo. Em roxo temos o dispositivo com DQ e em verde temos o dispositivo DC, ambos com revestimento AR. Destaque para os melhores valores obtidos pelos dispositivos.

70

Lista de tabelas

Tabela 5.1 Comparação entre os fotodetectores fabricados nesta tese e os comerciais para faixa do SWIR.

71

Lista de Abreviaturas

InP – Fosfeto de Índio

InGaAs – Arsenieto de Gálio e Índio

InGaAsP – Fosfeto Arsenieto de Gálio e Índio

SWIR – *Short-Wave Infrared*

FPA – *Focal Plane Array*

AR – Antirreflexo

DC – Dispositivo Convencional (sem Quaternário)

DQ – Dispositivo com Quaternário

MSE – *Mean Squared Error*

"Transportai um punhado de terra todos os dias e fareis uma montanha."

Confúcio.

1 Introdução

A revolução eletrônica, também conhecida como revolução digital, refere-se ao rápido avanço e à ampla adoção da tecnologia eletrônica baseada em materiais semicondutores a partir da metade do século XX e início do século XXI, do qual se originaram os computadores, a internet e os dispositivos móveis (CHIQUITO; JR, 1998; STEBER, 2019). Essa revolução tecnológica teve um impacto profundo na sociedade, transformando como nos comunicamos, acessamos informações e conduzimos negócios. A invenção do transistor em 1947 por William Shockley, Walter Brattain e John Bardeen no Bell Labs foi um grande avanço neste campo. O transistor é um dispositivo semicondutor do tipo diodo com três terminais elétricos, conforme mostra Figura 1.1, que pode ser usado como um interruptor ou amplificador de corrente elétrica.

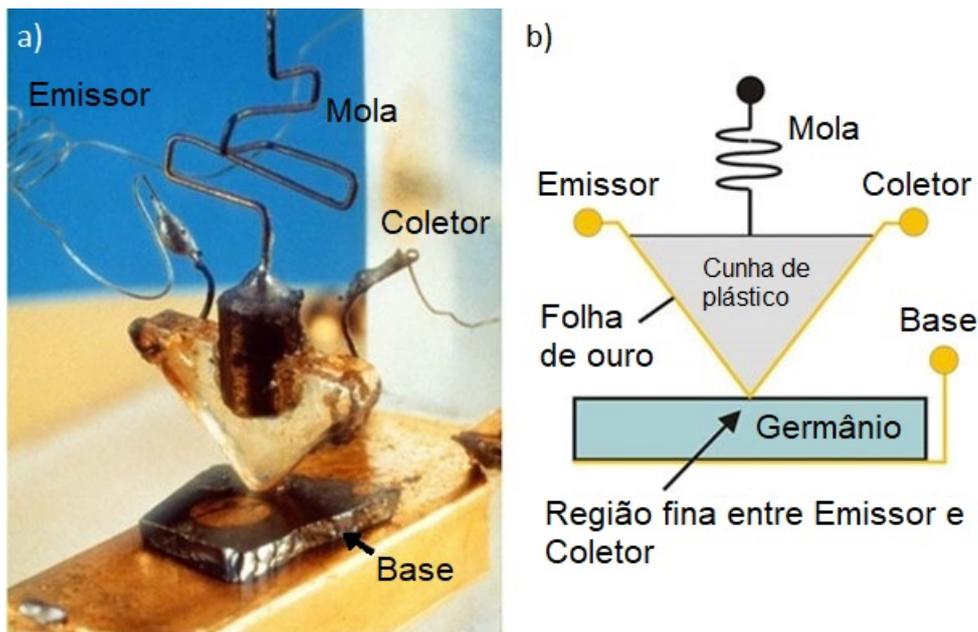


Figura 1.1: Primeiro transistor criado por William Shockley, Walter Brattain e John Bardeen no Bell Labs, imagem (a). Em (b) temos o esquemático detalhado do dispositivo.

Traduzido de: (STEBER, 2019)

Com o estímulo dado pela invenção do transistor, foi possível o avanço de diversas áreas da eletrônica e optoeletrônica, como o uso de dispositivos do tipo diodo capazes de interagir com radiação eletromagnética e funcionarem como fotodetectores para aplicações no infravermelho (CHIQUITO; JR, 1998; STEBER, 2019; HUGON et al., 1995). A estrutura de fotodiodos de arsenieto

de Gálio e Índio (InGaAs) casada (i.e., com o mesmo parâmetro de rede) com um substrato de Fosfeto de Índio (InP) ganhou grande importância na década de 1980. Nesta década, a principal aplicação do fotodiodo foi como sensor óptico para a comunicação por fibras ópticas, devido à atuação na faixa de comprimentos de onda de baixa atenuação e dispersão dentro da fibra óptica (1,3 e 1,55 μm) (HUGON et al., 1995; ROUVIÉ et al., 2012).

1.1

Fotodetectores e suas aplicações

Os fotodiodos de InGaAs construídos sobre substratos de InP funcionam na faixa espectral eletromagnética conhecida como SWIR (do inglês, *short-wave infrared*), que vai de 900 nm até 1700 nm. Os dispositivos que operam no infravermelho possuem uma ampla gama de aplicações, que vão desde civis até militares (HASHAGEN, 2014). Dentre essas diversas aplicações para fotodetectores no infravermelho, podemos destacar o uso em: detecção química (CHEMICAL...), combate a incêndios florestais (SHORT-WAVE...), autenticação de obras de arte (WHAT..., b), visão noturna ((SWIR)...), dentre outras. Para elucidar tais aplicações, a seguir serão apresentados alguns exemplos e um breve descritivo da forma como os sensores na faixa do SWIR podem auxiliar.

Um grande problema no campo da química está na forma de identificar os reagentes químicos. Em uma inspeção de segurança, nem sempre é possível distinguir visualmente líquidos que possuem as mesmas características ópticas por serem transparentes na faixa do visível. Porém, diferentes líquidos absorvem radiação em diferentes comprimentos de onda. Então, utilizando sensores com detecção na faixa do SWIR é possível diferenciar líquidos transparentes na faixa do visível. Na Figura 1.2 é possível, na faixa do SWIR, diferenciar o béquer que contém água, dos béqueres que contém solventes (tricloroetileno, acetona e isopropanol), e inclusive distinguir os solventes entre si.

Os sensores na faixa do SWIR também podem ser usados para certificar a autenticidade de documentos, cédulas monetárias e obras de arte valiosas. Para historiadores, o uso de sensores na faixa do SWIR possibilita visualizar traços existentes por baixo das tintas em pinturas, conforme podemos ver na Figura 1.3. Grande parte das tintas são opacas para a faixa do visível, mas são invisíveis para a faixa do SWIR (WHAT..., b). Também na faixa do SWIR, alguns anteparos do cotidiano se tornam invisíveis, como neblina, névoa, plásticos ou fumaça de incêndios. Na Figura 1.4(b) podemos ver claramente onde estão os focos de incêndio escondidos sob a fumaça.

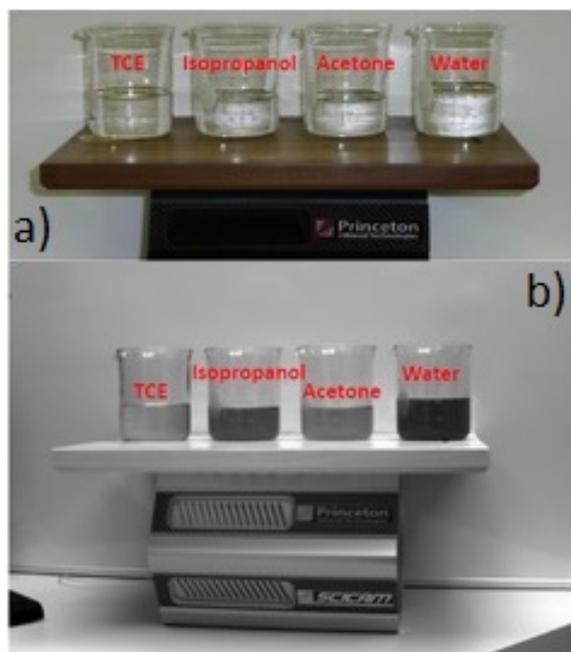


Figura 1.2: Aplicação do SWIR para diferenciação química. Em (a) temos a faixa do visível e em (b) temos a faixa do SWIR.

Fonte: (CHEMICAL...,)

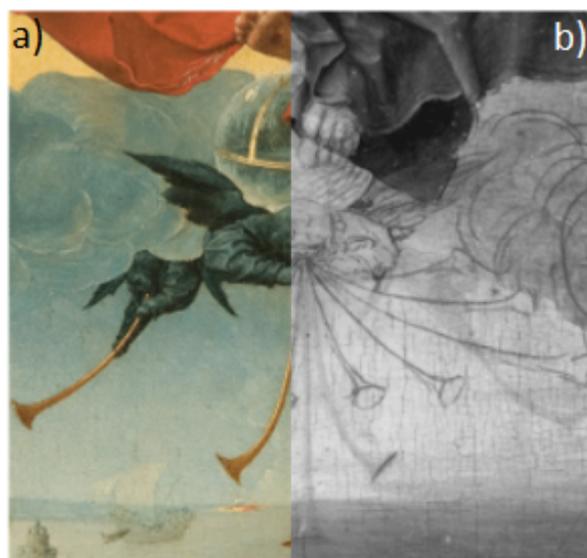


Figura 1.3: Detecção dos traços originais de uma obra de arte. Comparativo entre faixa do visível (a) e do SWIR (b).

Fonte: (WHAT..., b)



Figura 1.4: Detecção do foco de incêndios em floresta. Ambas as imagens foram feitas pelo mesmo satélite, porém com sensores de captura de imagens distintos. Em (a) temos a faixa do visível e em (b) temos a faixa do SWIR.

Adaptado de: (SHORT-WAVE... ,)

Nas aplicações militares podemos citar principalmente o uso dos sensores na faixa do SWIR para sistemas de imageamento noturno (visão noturna). Em ambientes com pouco ou nenhuma luminosidade (e.g., faróis apagados) na faixa do visível, se dificulta identificar obstáculos, alvos ou o simples percurso de uma estrada. Porém, na faixa do SWIR é possível contornar esse problema, como pode ser visto em 1.5(b).



Figura 1.5: Nestas imagens temos uma estrada escura durante o período noturno. Com os faróis acessos (a) é possível observar a estrada, a divisão da pista e as árvores. Porém, usando sensores na faixa do SWIR, mesmo com os faróis apagados (d), é possível observar a via nitidamente.

Adaptado de: ((SWIR)... ,)

1.2

Motivação

O estudo tem como principal motivação a nacionalização da produção de dispositivos fotodetectores de infravermelhos em solo brasileiro. Devido ao forte interesse militar, dispositivos na faixa do SWIR são considerados tecnologia sensível e têm sua comercialização controlada pelos governos dos países produtores. Dessa forma, devido às restrições significativas na aquisição desses sensores, o desenvolvimento e a produção desses dispositivos se tornam estratégicos para a pesquisa e a defesa do país. Vale destacar que os centros de pesquisa e desenvolvimento nacionais (PUC-Rio, UFRJ, IEAv, USP e outras instituições), são capacitados para competir com os demais países do globo e desenvolver tecnologia de ponta na área do infravermelho.

1.3

Objetivo

Este trabalho faz parte de um projeto amplo que visa produzir fotodetectores do tipo diodo de InGaAs com difusão seletiva de zinco (Zn, dopante $p+$) e em estrutura planar. O objetivo deste trabalho consiste na produção do fotodetector de InGaAs com difusão uniforme de Zn e com duas otimizações estruturais. A primeira otimização proposta é a inclusão de uma liga quaternária de fosfeto de arsenieto de gálio e índio (InGaAsP) para melhorar a extração de portadores e aumentar a corrente elétrica gerada. A segunda otimização proposta é a deposição de um revestimento antirreflexo para diminuir a refletância superficial e aumentar a transmissão de fótons para dentro do dispositivo, melhorando seu desempenho geral. Nas próximas seções estas otimizações serão apresentadas e discutidas em maior profundidade.

Essa tese está organizada para inicialmente apresentar alguns dos conceitos teóricos necessários sobre o funcionamento do dispositivo e as figuras de mérito do mesmo (Capítulo 2). Em seguida, com estes conceitos estabelecidos, serão detalhadas as técnicas experimentais de fabricação e caracterização do dispositivo (Capítulo 3). Na seção seguinte, serão apresentados os detalhes da produção do dispositivo e os resultados referentes à inclusão da liga quaternária de InGaAsP no dispositivo (Capítulo 4). A seguir, o estudo teórico e a deposição do sistema antirreflexo com seus respectivos resultados serão apresentados (Capítulo 5). E, por fim, serão discutidas as principais conquistas do projeto e as perspectivas de trabalhos futuros (Capítulo 6).

2

Fundamentos teóricos

Nesse capítulo serão apresentados os conceitos necessários para a compreensão e análise dos resultados dos fotodetectores de InGaAs/InP. Alguns parâmetros de desempenho, como as figuras de mérito, também serão apresentados. Esse capítulo foi baseado nos seguintes livros (REZENDE, 2004; CHUANG, 1995; STREETMAN; BANERJEE, 2006; SCHRODER, 2006; SZE; NG, 2007).

2.1

Semicondutores

Os semicondutores são materiais que possuem propriedades elétricas intermediárias entre os condutores e os isolantes. Esses materiais apresentam uma banda de energia proibida (*gap*) que separa a banda de valência (onde os elétrons estão ligados aos átomos da rede cristalina) da banda de condução (onde os elétrons podem se mover livremente pela rede cristalina). Os semicondutores comercialmente mais utilizados são o silício e o arsenieto de gálio.

Quando um semicondutor é dopado, ou seja, adiciona-se uma pequena quantidade de outro elemento na rede cristalina, a condutividade deste semicondutor é alterada. Por exemplo, se adicionarmos átomos de fósforo ao silício, que possui um elétron a mais em sua camada de valência, esses elétrons extras são liberados para a banda de condução, tornando o material mais condutivo, devido ao aumento da concentração de elétrons (portadores de carga negativa). Se adicionarmos átomos de boro ao silício, que possui um elétron a menos em sua camada de valência, isso cria um buraco na banda de valência, também aumentando a condutividade cujos portadores, no entanto, são buracos com carga elétrica positiva. A evolução dos processos de fabricação dos semicondutores tem sido constante nos últimos anos, resultando em dispositivos cada vez menores e mais eficientes.

2.1.1

Junção *p-n* e geração do par elétron-buraco

A junção *p-n* é formada pela união de duas camadas de material semicondutor dopadas com diferentes tipos de portadores majoritários, como, por exemplo, silício dopado tipo *p* e silício tipo *n*. Quando essas duas camadas semicondutoras são unidas para formar a junção *p-n*, ocorre uma difusão de portadores de carga (elétrons e buracos) da região onde estes portadores são

majoritários para onde são minoritários. Quando esta difusão entra em estado de equilíbrio, forma-se a chamada região de depleção, na qual há a formação de um campo elétrico intrínseco gerado pelas cargas fixas, conforme Figura 2.1.

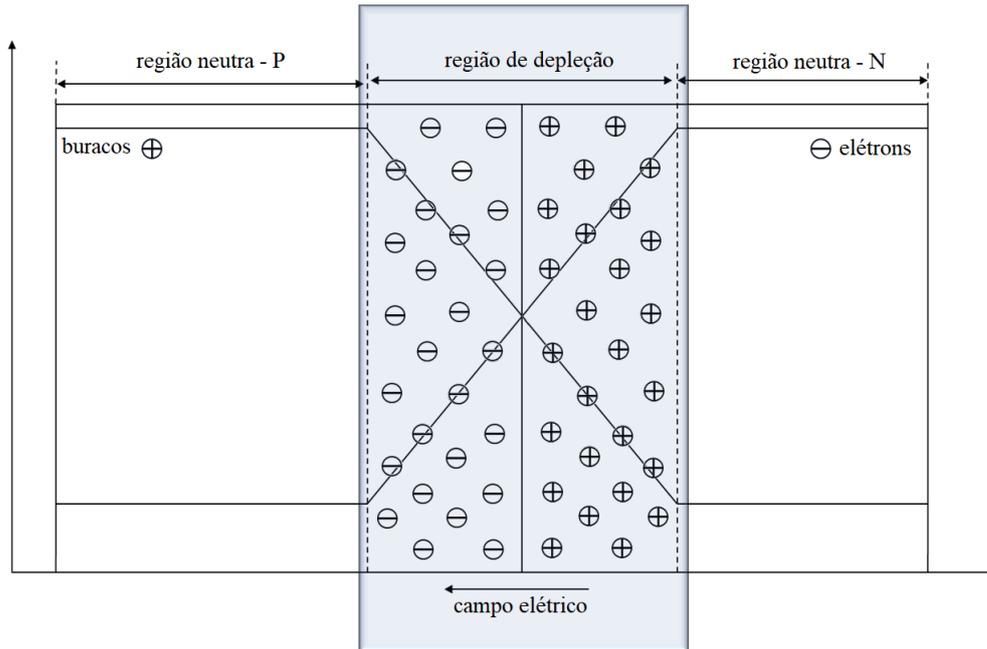


Figura 2.1: Região de depleção em estado de equilíbrio.

Conforme a Figura 2.2, o princípio de funcionamento dos fotodetectores com junção $p-n$ baseia-se na quebra deste equilíbrio de cargas através da incidência de luz. Com isto, os fótons com energia acima da energia de gap da junção são absorvidos pelos elétrons deste material semiconductor, criando pares elétron-buraco. Os elétrons e buracos gerados na região de depleção são então separados pelo campo elétrico interno criado pela diferença de potencial entre as regiões p e n . O campo elétrico realiza uma força, acelerando os elétrons para a região n e os buracos para a região p . Isso cria uma corrente elétrica através da junção $p-n$, que é proporcional à intensidade da luz incidente.

A eficiência da geração de pares elétron-buraco na junção $p-n$ é limitada por alguns fenômenos físicos, como o efeito de recombinação dos portadores de carga e a difusão dos portadores de carga na região de depleção. Esses fenômenos podem levar à redução da eficiência do dispositivo. Logo, para minimizar estes fenômenos, deve-se otimizar as camadas semiconductoras escolhidas tendo em vista a estrutura de bandas, a sua qualidade cristalina, espessura e nível de dopagem.

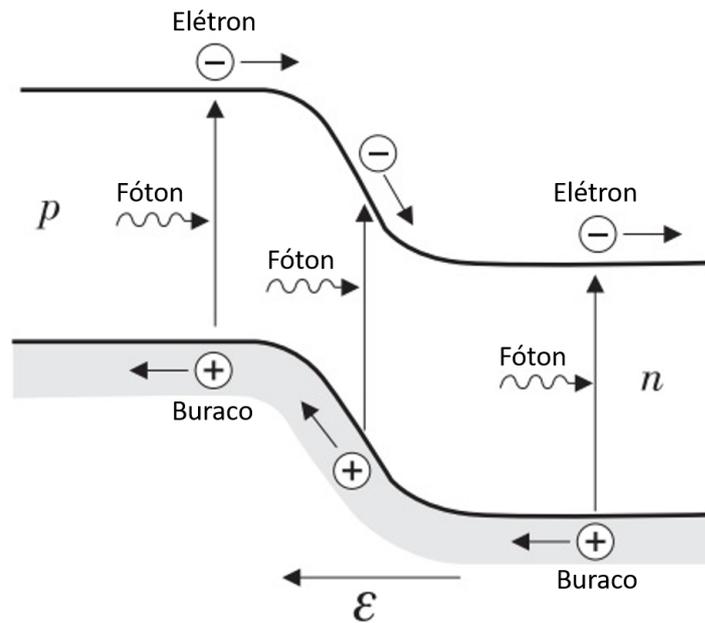


Figura 2.2: Processo de criação do par elétron-buraco, sentido de deslocamento dos portadores e direção do campo elétrico.

Fonte: (REZENDE, 2004)

2.1.2

Semicondutores dos grupos III e V

Nessa tese, os elementos utilizados para compor o dispositivo semicondutor são formados a partir da combinação de elementos dos grupos III e V da tabela periódica, como o arsenieto de gálio (GaAs), arsenieto de índio (InAs) e fosfeto de índio (InP). Diferente do silício, os semicondutores citados possuem energia de *gap* direto, aumentando a probabilidade das transições ópticas dos elétrons entre as bandas de condução e de valência. Esses materiais possuem propriedades ópticas superiores ao silício, o que os torna melhores para aplicações em eletrônica de alta frequência e dispositivos optoeletrônicos como as células solares.

As células solares de alta eficiência de semicondutores III-V podem atingir uma maior eficiência de conversão de energia solar em eletricidade, o que significa que elas podem produzir mais energia a partir da mesma quantidade de luz solar em comparação com células solares de silício. Devido também a estas propriedades ópticas, os fotodetectores de InGaAs possuem melhor desempenho para a detecção no infravermelho do que detectores de silício.

Conforme visto na Figura 2.3, os fotodiodos de InGaAs do tipo *pin* são dispositivos que consistem em uma junção *p-n* com uma camada intrínseca (baixa ou nenhuma dopagem) de InGaAs entre as regiões *p* e *n*. A camada

intrínseca é geralmente mais espessa do que as camadas p e n , e possui uma baixa densidade de portadores de cargas livres. Como a resistividade da camada com baixa dopagem é muito alta, a região de depleção se estende até o lado n fazendo com que a espessura útil do fotodiodo seja muito maior se comparada com a junção $p-n$ apresentada na Figura 2.1. O material InGaAs é escolhido para a fabricação de fotodetectores devido à alta mobilidade dos portadores de carga, que permite uma alta velocidade de resposta, e ao seu *gap* direto, resultando em uma alta eficiência quântica de absorção da luz. Como o InGaAs atua na faixa do SWIR, ele pode ser usado nas aplicações mencionadas anteriormente como: comunicações ópticas de alta velocidade, espectroscopia infravermelha e imagens térmicas (ROUVIÉ et al., 2012; ROUVIÉ et al., 2013). Além disso, os semicondutores III-V são altamente resistentes à degradação causada por raios ultravioleta, o que os torna adequados para aplicações espaciais (TAUZIEDE et al., 2017; JOSHI; HEINE; FEIFEL, 2006).

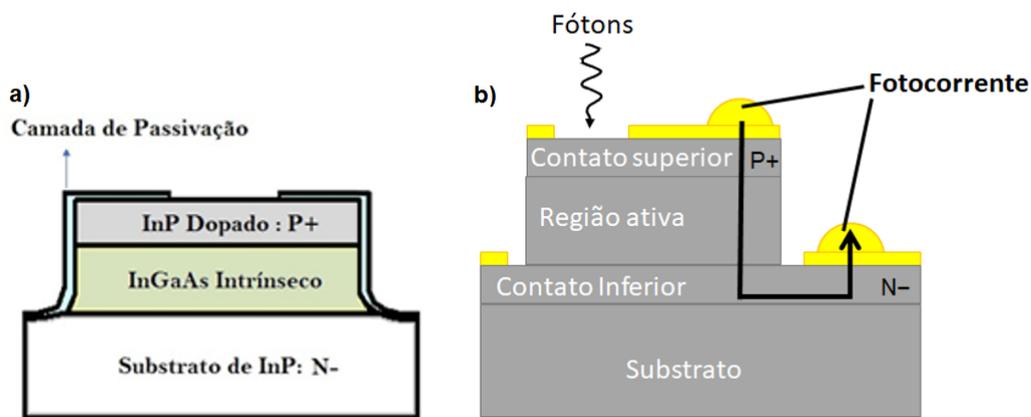


Figura 2.3: Estrutura típica de fotodiodos de InGaAs do tipo pin (p -intrínseco- n). Em a observa-se a estrutura do dispositivo, com as ligas que compõem cada camada. Em b é mostrado o dispositivo metalizado, com os contatos elétricos e a representação de como é coletada a fotocorrente.

2.1.3

Modos de operação do fotodiodo de InGaAs

Existem dois modos principais de operação para um fotodetector de InGaAs do tipo pin : modo fotovoltaico e fotocondutivo, conforme podemos observar nas curvas com incidência de luz e sem incidência de luz da Figura 2.4. Esses modos diferem em como a tensão e a corrente são manipuladas em resposta à luz incidente e a escolha entre ambos depende da aplicação prática do dispositivo.

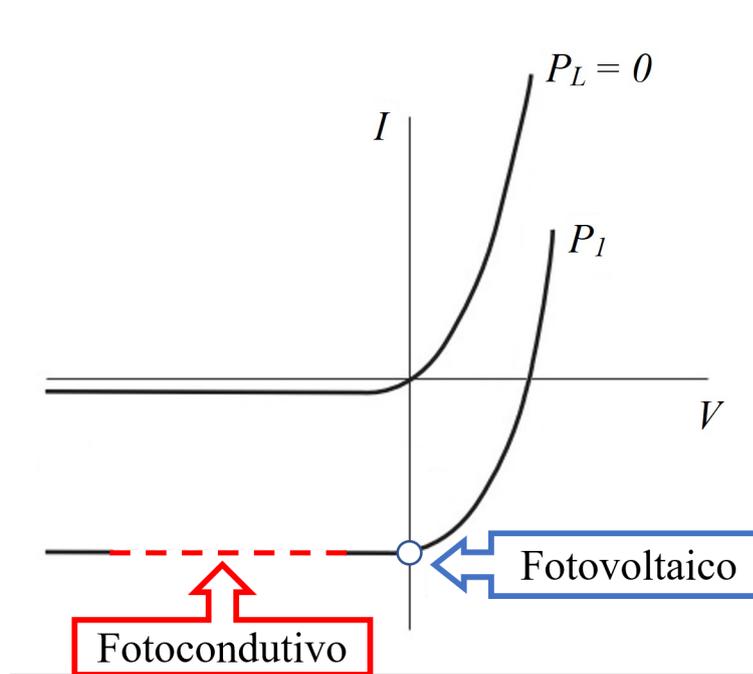


Figura 2.4: Curvas características de corrente por tensão de uma junção $p-n$ no escuro (P_L) e sob uma potência luminosa (P_1). Destaque para área tracejada representativa da região de ótima operação do fotodiodo.

Adaptado de: (REZENDE, 2004)

No modo fotovoltaico, o fotodetector é ligado eletricamente de forma direta, o que significa que o terminal p é conectado ao polo positivo da fonte de tensão, e o terminal n é conectado ao polo negativo. Quando os fótons incidem na camada intrínseca, eles geram pares elétron-buraco, que são separados na junção $p-n$ e criam uma diferença de potencial elétrico. Essa diferença de potencial elétrico pode ser calculada por:

$$V_{ca} = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right) \quad (2-1)$$

Onde k_B é a constante de Boltzmann, T a temperatura, I_L é a corrente fotogerada e I_s a corrente de saturação reversa. Esse modo é usado em aplicações que requerem operação em altas frequências, como em sistemas de comunicação óptica.

No modo fotocondutivo, o fotodetector é polarizado na polarização reversa, o que significa que o terminal p é conectado ao polo negativo da fonte de tensão, e o terminal n é conectado ao polo positivo. Quando os fótons incidem na camada intrínseca, eles geram elétrons e buracos que aumentam a condutividade da camada intrínseca. Nesta situação a fotocorrente flui no sentido reverso da junção e a corrente total que flui no dispositivo pode ser escrita por:

$$I = I_s(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1) - I_L \quad (2-2)$$

A I_s se torna desprezível quando a absorção de fótons for muito maior do que a taxa de geração térmica, sendo assim, a corrente no fotodiodo será proporcional à potência incidente na junção $p-n$. Esse modo é usado em aplicações que requerem alta sensibilidade, como em detecção de baixa intensidade de luz.

2.2

Corrente de escuro

A corrente de escuro (I_e) é gerada em um dispositivo sem radiação incidente, apenas pela aplicação de tensão de polarização e energia térmica. A corrente de escuro desempenha um papel crucial no projeto de detectores, por gerar ruído, aumentar o consumo de energia e impor maiores exigências de resfriamento e sensibilidade. Quando a corrente de escuro aumenta, a relação sinal-ruído diminui, tornando mais desafiador obter medições precisas. A corrente de escuro pode fluir pelo interior ou pela superfície do detector, sendo esta última especialmente significativa em dispositivos menores, que possuem uma maior relação superfície/volume. Detectores menores são preferíveis em sensores de imagem devido à redução de tamanho, peso, consumo de energia e aumento na resolução espacial.

Os principais mecanismos que explicam a corrente de escuro são as emissões termiônicas e os tunelamentos. O mecanismo térmico é responsável pelas correntes de difusão, geração-recombinação (G-R) e vazamento de superfície. Os mecanismos de tunelamento são responsáveis pelas correntes de: tunelamento assistido por armadilha (TAT, do inglês, *trap-assisted tunneling*) e tunelamento banda a banda (BtBT, do inglês, *band-to-band tunneling*).

Logo, os principais fatores que influenciam diretamente na corrente de escuro são: temperatura, qualidade do material, tensão de polarização e tamanho do fotodiodo. A corrente de escuro aumenta exponencialmente com a temperatura devido à maior geração térmica de portadores. A corrente de escuro total produzida por um dispositivo pode ser calculada por:

$$I_e = I_s(e^{\frac{eV}{k_B T}} - 1) \quad (2-3)$$

Também afetam a corrente de escuro, a quantidade de defeitos cristalinos, impurezas e qualidade do processo de fabricação. Além disso, quanto maior a tensão aplicada em polarização reversa, maior será a largura da região de depleção, o que pode aumentar a corrente de escuro se houver mais geração de portadores nessa região.

Um dos principais testes de qualidade após o processamento do dispositivo é a medição da corrente de escuro em função da tensão (I-V) e também da temperatura. As curvas I-V fornecem informações sobre a uniformidade do crescimento do material, a qualidade do processamento e a intensidade da corrente de escuro, eliminando interferências externas com o uso de um escudo térmico. Para garantir o bom funcionamento do fotodetector, a fotocorrente gerada pela radiação detectada precisa ser maior que a corrente de escuro.

2.3 Fotocorrente

Para materiais do tipo *bulk*, a fotocorrente está diretamente relacionada com o coeficiente de absorção dos materiais que compõem a região ativa do dispositivo. O coeficiente de absorção pode ser determinado experimentalmente através da lei de Beer-Lambert e na Figura 2.5 estão apresentados os coeficientes de absorção dos principais semicondutores. A lei de Beer-Lambert relaciona a intensidade do feixe I após passar por um material com largura L e com coeficiente de absorção α_0 . Essa lei é algebricamente representada por:

$$I = I_0 e^{-\alpha_0 L} \quad (2-4)$$

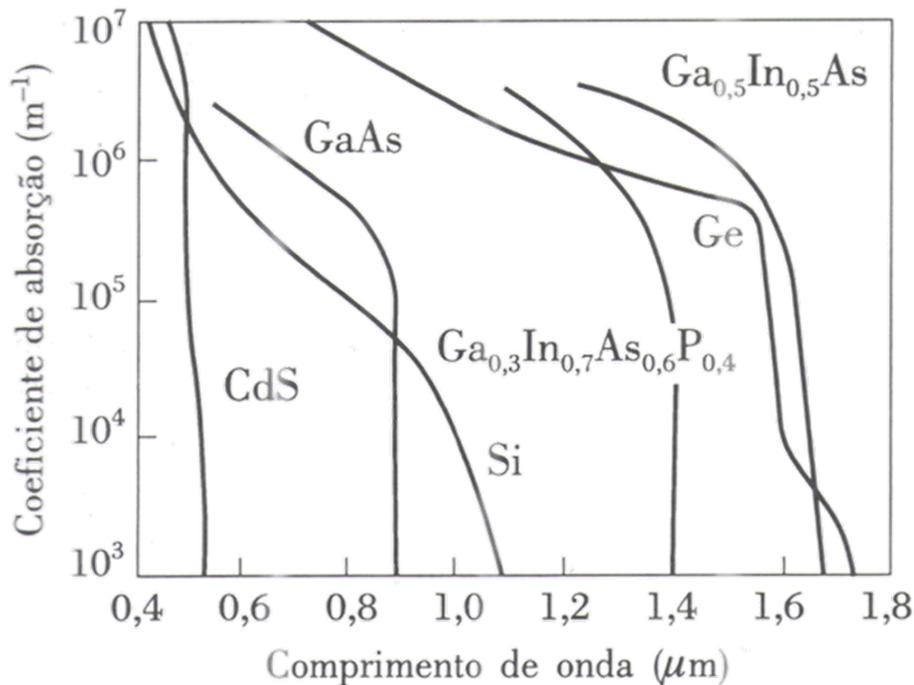


Figura 2.5: Coeficiente de absorção dos principais semicondutores e das ligas utilizadas nesta tese (InP, InGaAs e InGaAsP).

Fonte: (REZENDE, 2004)

Onde I_0 representa a intensidade do feixe incidente no dispositivo. Logo, a fotocorrente é a corrente foto gerada a partir da geração do par elétron-buraco após a absorção de fótons incidentes na junção $p-n$. O valor da fotocorrente também pode ser deduzido da equação 2-5, subtraindo o valor da corrente total do valor da corrente de escuro.

$$I_L = I_e - I \quad (2-5)$$

A medida do espectro da fotocorrente se mostra necessária para avaliar o comportamento da intensidade da fotocorrente em função do comprimento de onda. Esse espectro depende da estrutura de bandas do dispositivo e da eficiência de absorção de fótons para cada comprimento de onda. Desta forma, se pode comparar diferentes fotodetectores e identificar as melhorias alcançadas por estes dispositivos. A intensidade da fotocorrente pode ser aumentada com a introdução de camadas antirreflexo.

2.4 Responsividade

A responsividade é a grandeza física que relaciona a taxa de fotocorrente (I_f) gerada pelo detector com a potência de radiação incidente (P_{IR}). O equação da responsividade (\mathfrak{R}) pode ser dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{I_f}{P_{IR}} \quad (2-6)$$

Transcrevendo a equação 2-6 em função das características do fotodetector temos:

$$I_f = e\phi_s\eta g \quad (2-7)$$

$$P_{IR} = \frac{\phi_s ch}{\lambda} \quad (2-8)$$

Onde ϕ_s é o fluxo da radiação incidente, η a eficiência quântica interna, g o ganho fotocondutivo, c a velocidade da luz no vácuo, h a constante de Planck e λ o comprimento de onda da radiação. Substituindo 2-7 e 2-8 em 2-6 temos:

$$\mathfrak{R} = \frac{e\eta}{hc} \lambda g \quad (2-9)$$

A responsividade é empregada para comparar detectores de mesma área de detecção.

2.5

Detectividade

Para detectores, a detectividade é a figura de mérito mais importante. A detectividade é definida como sendo o inverso da potência de ruído (NEP, do inglês *noise-equivalent power*). A potência de ruído NEP é o fator que determina qual o menor sinal detectável pelo dispositivo e pode ser escrita como:

$$NEP = \frac{I_{ruído}}{\Re} \quad (2-10)$$

Onde $I_{ruído}$ é a corrente de ruído. É através da NEP que se relaciona responsividade com detectividade. O ponto mais importante que torna a detectividade a figura de mérito principal em fotodetectores está na sua forma normalizada (D^*). Pois normalizando a detectividade, se torna possível comparar o desempenho de detectores com diferentes tamanhos. A equação normalizada da detectividade pode ser dada por:

$$D^* = \frac{\Re \sqrt{A_d \Delta f}}{I_{ruído}} \quad (2-11)$$

Sendo A_d o valor da área ativa do dispositivo, Δf largura de banda da medida. A corrente de ruído estabelece o limite inferior para o funcionamento do dispositivo e pode ser decomposta em três principais mecanismos distintos de geração: o ruído térmico, o ruído de geração-recombinação e o ruído 1/f. Nos próximos tópicos serão explicados os ruídos apresentados e seus mecanismos de geração.

2.5.1

Ruído térmico

O ruído térmico ou branco, também chamado de ruído Johnson, está presente em todos os dispositivos resistivos. Seu nível de sinal não sofre nenhuma alteração com a variação da frequência de trabalho do dispositivo, ou seja, independe de f . Esse ruído é causado pela agitação térmica dos portadores de carga mesmo em equilíbrio térmico e só é nulo em 0 K (zero absoluto). A equação para calcular o ruído térmico é dada por:

$$i_T = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R}} \quad (2-12)$$

Sendo Δf a largura de banda da medida e R a resistência diferencial do dispositivo.

2.5.2

Ruído de geração-recombinação

O ruído de geração-recombinação (G-R) ocorre devido às flutuações na fotocorrente geradas pelo armadilhamento ou recombinação dos portadores de cargas (elétrons e buracos). Devido às oscilações no número de portadores disponíveis para o transporte de carga, a geração do ruído G-R está associada aos portadores de carga e pode ser calculada pela seguinte equação:

$$i_{ruído,G-R} = \sqrt{4eG_{ruído}I_e\Delta f} \quad (2-13)$$

Sendo, segundo Vincent, J. D. (1990)(VINCENT, 1990), o ganho de ruído ($G_{ruído}$) é calculado por:

$$G_{ruído} = \frac{\tau_c}{\tau_t} \quad (2-14)$$

Onde τ_c é o tempo de vida do portador excitado e τ_t é o tempo de trânsito do portador na região ativa.

2.5.3

Ruído 1/f

O ruído 1/f ou também conhecido como *flick noise*, é um tipo de ruído extrínseco, atribuído a fenômenos de superfície, defeitos na estrutura cristalina e ligado diretamente com a qualidade do processo de fabricação do dispositivo. É possível calcular a densidade espectral do ruído 1/f pela expressão (BAHREYNI, 2008):

$$S_{i,1/f} = \frac{I_e^\beta K}{f^\gamma} \quad (2-15)$$

Sendo β uma constante empírica relacionada ao perfil de dopagem (aproximadamente 2), f é a frequência, K e γ são coeficientes do fotodiodo que dependem do processo de fabricação (aproximadamente 1). A contribuição do ruído 1/f é mínima para a corrente de ruído e sua contribuição pode ser atenuada realizando a medição da corrente de ruído em altas frequências.

2.5.4

Lei de Fresnel e camada antirreflexo

A Lei de Fresnel, formulada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel no início do século XIX, aborda o comportamento da luz ao interagir com superfícies, como, por exemplo: o ar e água ou ar e vidro. Esta lei é essencial para entender fenômenos ópticos, como a formação de imagens em lentes e a reflexão em superfícies. Quando um feixe de luz incide sobre a interface entre dois meios, as duas superfícies são relevantes: a superfície de entrada e a superfície de saída. A Lei de Fresnel é expressa por duas equações principais para a fração da intensidade da luz refletida (R) e transmitida (ou refratada) (T):

$$R = \left(\frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \right)^2 \quad (2-16)$$

$$T = 1 - R \quad (2-17)$$

Onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios, θ_i é o ângulo de incidência e θ_t é o ângulo de refração, que pode ser calculado usando a Lei de Snell:

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t) \quad (2-18)$$

Quando a luz passa do ar para um substrato de vidro não revestido, devido à reflexão de Fresnel, cerca de 4% da luz é refletida em cada interface. Isso resulta em uma transmissão total de apenas 92% da luz incidente, o que pode ser um problema em diversas aplicações. Conforme a Figura 2.6, o problema mais comum em lentes são os reflexos que atrapalham tanto as pessoas que usam óculos quanto experimentos e equipamentos que dependem de conjuntos óticos.

Os revestimentos antirreflexo (AR) são desenvolvidos para provocar uma mudança de fase de 180° entre os feixes refletidos nas superfícies superior e inferior de uma camada fina. Essa diferença de fase gera uma interferência destrutiva, cancelando os feixes refletidos antes que eles deixem a superfície. Esse efeito de cancelamento mútuo entre picos e vales reduz a quantidade de luz refletida, aumentando a transmissão. O segredo para projetar revestimentos antirreflexos eficazes é selecionar o material e a espessura da camada dielétrica de modo que os picos e vales se cancelem nos comprimentos de onda desejados.



Figura 2.6: Lente antirreflexo ao meio mostrando o cancelamento das refletâncias através das interferências destrutivas.

3

Técnicas de fabricação e caracterização dos dispositivos

3.1

Crescimento epitaxial

O crescimento epitaxial de semicondutores é uma técnica essencial na produção de dispositivos optoeletrônicos avançados, como lasers, LEDs e células solares. Esse processo proporciona que camadas uniformes e cristalinas de semicondutores sejam depositadas sobre substratos previamente preparados, resultando em estruturas de alta qualidade cristalina visando dispositivos com alta eficiência.

Diversos estudos têm explorado diferentes métodos de crescimento epitaxial, como a epitaxia por feixe molecular (MBE do inglês, *molecular beam epitaxy*), epitaxia por deposição de vapor químico (CVD do inglês, *chemical vapor deposition*) e epitaxia em fase líquida (LPE do inglês, *liquid phase epitaxy*). Por exemplo, um estudo realizado por Yusuke Ota (1983) (OTA, 1983b; OTA, 1983a), investigou o crescimento epitaxial de silício e germânio usando a técnica de MBE. Os pesquisadores demonstraram que o controle das condições de crescimento, como temperatura e fluxo de feixe atômico, é crucial para a obtenção de camadas epitaxiais de alta qualidade.

Além disso, a tecnologia de crescimento epitaxial tem sido continuamente aprimorada e otimizada para atender às demandas de qualidade da indústria eletrônica. Um exemplo é o desenvolvimento na epitaxia de materiais como arsenieto de gálio (GaAs) e fosfeto de índio (InP), que apresentam melhores propriedades elétricas e ópticas em relação ao silício (Si) (CHIQUITO; JR, 1998).

3.2

Deposição por MOVPE

A epitaxia de metalorgânicos em fase vapor (MOVPE, do inglês *metal organic vapor phase epitaxy*) é uma importante técnica de crescimento de estruturas cristalinas semicondutoras de alta qualidade e baixa dimensionalidade (RAZEGUI, 1989). Esta técnica possibilita muita versatilidade na escolha das composições dos semicondutores de forma que as ligas crescidas por esta técnica podem ser compostas pela junção dos elementos das famílias A da tabela periódica, e.g., grupo IV, grupos III e V, grupos II e VI entre outras combinações (LOVERGINE, 2001).

Tipicamente os reatores de MOVPE do tipo linear possuem um tubo de quartzo (*liner*) como câmara de reação química, por onde passam os fluxos dos gases. No interior do *liner* se encontra uma base de grafite (*susceptor*) que serve de apoio para um disco chanfrado também de grafite sobre o qual é colocado o substrato no qual ocorre a deposição epitaxial. O *susceptor* e o disco são feitos de grafite dispondo de uma inércia térmica alta, contribuindo para um controle mais preciso da temperatura do substrato, sendo o aquecimento feito por um conjunto de lâmpadas de infravermelho de alta potência. O *susceptor* é então responsável pela transferência do calor gerado pelas lâmpadas para o substrato, favorecendo a pirólise e a catálise da decomposição dos gases precursores (PIRES, 1998).

As principais vantagens da técnica de MOVPE são: a capacidade de produzir camadas uniformes, com baixa dopagem residual e com interfaces abruptas. Consequentemente, esta técnica consegue produzir dispositivos baseados em heteroestruturas, poços quânticos, nanofios e pontos quânticos. A principal desvantagem no uso desta técnica é a utilização de gases altamente tóxicos como arsina (AsH_3) e fosfina (PH_3).

3.3

Difratometria de raios-x

A Difratometria de raios-x é uma técnica analítica amplamente utilizada na determinação da estrutura cristalina dos materiais. Essa é uma técnica não destrutiva e pode ser utilizada para analisar tanto materiais cristalinos quanto amorfos. Além disso, é uma técnica muito útil para a caracterização de materiais em diversas áreas, incluindo a ciência de materiais, a geologia, a biologia e a medicina. A difração de raios-x é baseada na interação dos raios-x com a rede cristalina dos materiais, que produz um padrão característico de difração (CAPANO, 1989). A partir desse padrão, é possível determinar a estrutura atômica dos materiais, como a posição dos átomos no cristal e a distância entre eles (parâmetro de rede).

O princípio básico da medida de difração de raios-x é a lei de Bragg, que ocorre quando os raios-x incidentes interagem com a rede cristalina e sofrem espalhamento em diferentes direções. O padrão de difração surge por meio de interferências construtivas e destrutivas dos feixes de raios-x e dependem das características da estrutura cristalina do material (CAPANO, 1989). O feixe de raios-x difratado é registrado em um detector de raios-x, como um filme fotográfico ou um fotodetector eletrônico, cujo ângulo em relação à superfície do semiconductor determina as informações sobre a estrutura deste. A lei de Bragg é descrita pela seguinte equação:

$$n\lambda = 2d\sin\theta; n \in \mathbb{Z} \quad (3-1)$$

Onde n é um número inteiro, λ é o comprimento de onda do raio-x incidente, d é a distância entre os planos de difração e θ é o ângulo de incidência do feixe de raio-x. Para melhorar a resolução do feixe incidente e garantir mais precisão da medida, um sistema de duplo cristal de GaAs é usado (CAPANO, 1989). Na Figura 3.1 temos uma esquematização do experimento.

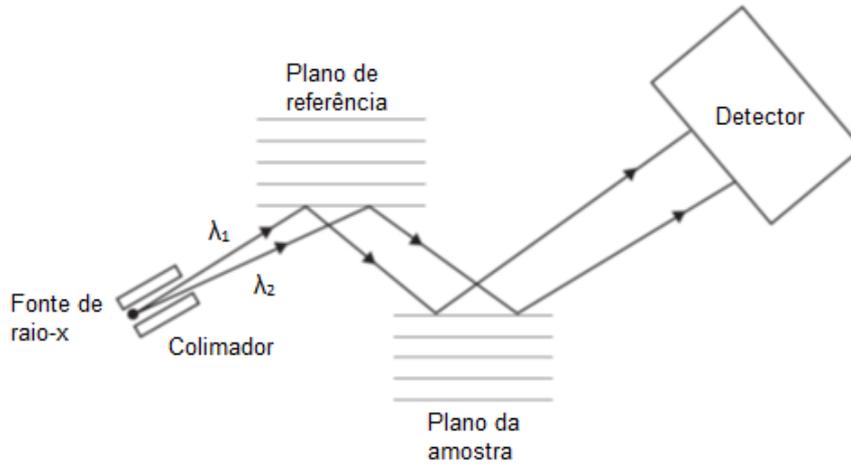


Figura 3.1: Experimento de difração de raios-x utilizando-se um cristal de referência com intuito de estreitar a dispersão em comprimento de onda do feixe emitido pela fonte de raios-x.

Traduzido de: (KAWABATA, 2011)

A difração de raio-x em materiais III-V é particularmente importante para a determinação da orientação, espessura e qualidade cristalina das camadas epitaxiais. Esta medida também fornece informações sobre a presença de defeitos na rede cristalina, como discordâncias, deformações (tensões internas), e de impurezas. Para análise de filmes finos semicondutores, o modo *rocking curve* (RC) é usado para medir o parâmetro de rede e as espessuras das camadas (Figura 3.2). O RC é uma medida de alta resolução angular e consiste em fixar o detector no ângulo de Bragg referente à difração do substrato e sondar ângulos próximos (variação de menos de 1°) (HALLIWELL; LYONS; HILL, 1984). É possível, dessa forma, enxergar a difração de um filme fino ligeiramente descasado com o substrato mesmo que a diferença angular seja da ordem de poucos segundos de arco (arcseg). A diferença em ângulo entre a difração do substrato e do filme fino está relacionada à diferença entre os respectivos parâmetros de rede. O parâmetro de rede em um composto ternário como o InGaAs é diretamente proporcional à sua composição (porcentagem de índio, gálio e arsênio). A medida de RC também apresenta franjas em torno do

pico de difração do filme fino que estão relacionadas à espessura total do filme. Para ligas quaternárias, como o InGaAsP, a difração de raios-x não é suficiente para obter a composição da liga. Como podemos ver na área I da Figura 3.3, existem diversas combinações possíveis dos elementos da liga quaternária que estão casadas com o InP. Por esse motivo, a informação complementar da energia de *gap* da liga se torna necessária para definir a sua composição. As informações obtidas por meio da difração de raios-x são utilizadas para calibrar os parâmetros de crescimento dos semicondutores III-V.

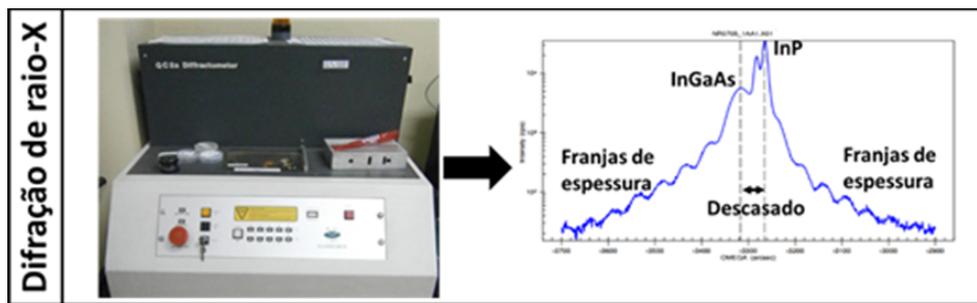


Figura 3.2: Exemplo de um experimento de difração de raios-x. Normalmente o pico maior está relacionado com a difração do substrato, enquanto o segundo pico está relacionado com a camada depositada.

Para a tese apresentada, as medidas foram feitas usando um difratômetro modelo QC2a Diffractometer da empresa Bede Scientific Instruments Ltd. Segundo o programa de análise do equipamento, uma variação em ângulo de difração de 1 arcseg corresponde a uma variação aproximada de 4 ppm de descasamento ou menos de 0,1% de variação na composição do quaternário. Em relação às espessuras, 1 arcseg de variação corresponde à diferença em espessura do quaternário entre 2 e 8 nm.

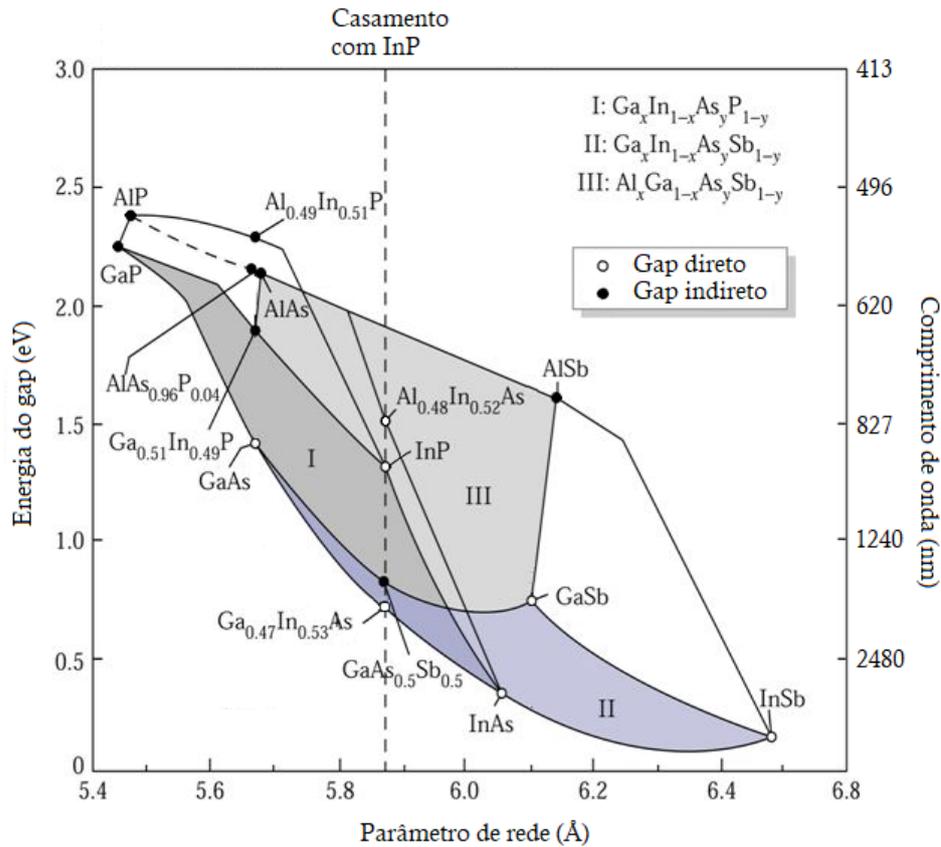


Figura 3.3: Diagrama das principais informações de ligas usadas nos semicondutores III-V. Cada ponto de uma determinada liga situada nas linhas possui somente uma composição, ex: O ternário InGaAs casado (mesmo parâmetro de rede) com InP possui uma única composição possível: 47% de Gálio para 53% de Índio, como indicada no gráfico. Para determinar a composição de ligas quaternárias é necessário obter o *gap* de energia da liga e o parâmetro de rede da mesma, pois como pode ser observado na figura, as ligas quaternárias possuem uma gama de possibilidades de composição nas áreas I, II e III.

3.4

Fotoluminescência

A fotoluminescência é um experimento óptico amplamente utilizado na pesquisa em semicondutores. Esta técnica explora um fenômeno no qual um material emite fótons após ser excitado por um feixe de luz. Os elétrons são excitados para níveis de energia mais altos pela absorção de fótons e relaxam de volta para seus estados de energia iniciais, emitindo fótons com energia igual à diferença de energia entre o estado excitado e o inicial, conforme Figura 3.4.

A intensidade da fotoluminescência é proporcional à taxa de decaimento dos elétrons para seus estados de energia iniciais (banda de condução para

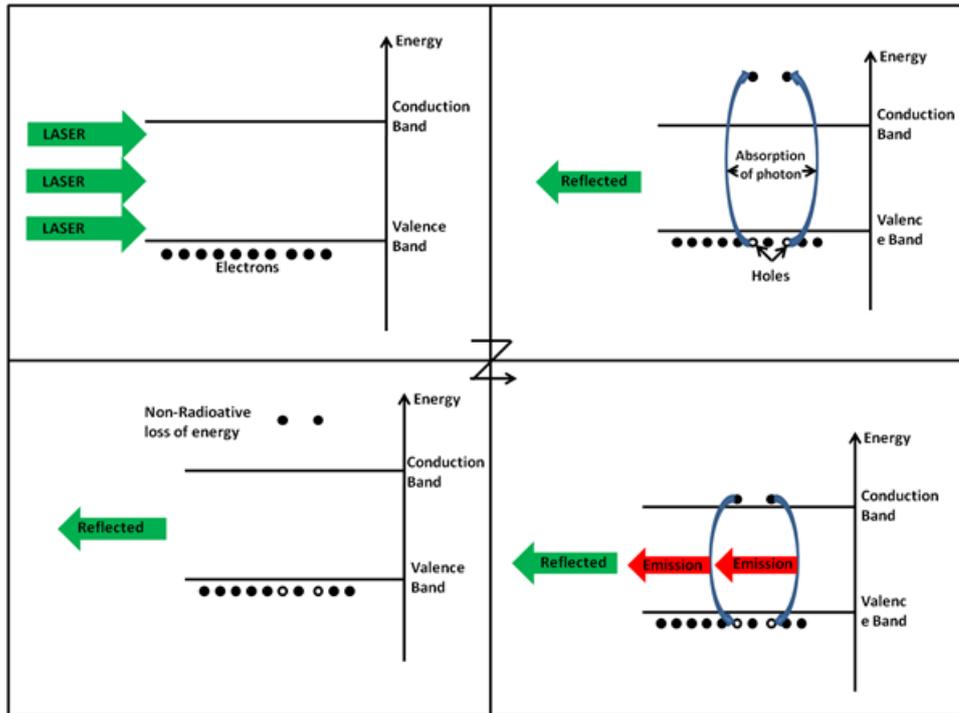


Figura 3.4: Explicação gráfica de um experimento de fotoluminescência convencional.

Fonte: (KAWABATA, 2011)

banda de valência) e depende da densidade de estados disponíveis de energia. O comprimento de onda emitido depende da energia de *gap* do material ou do nível de defeito/impureza envolvido na transição óptica (CHUANG, 1995). Esta técnica é particularmente útil para estudar estruturas com tamanho nanométrico, como os pontos quânticos, que exibem propriedades ópticas únicas devido às suas dimensões reduzidas.

Para ligas ternárias, o espectro de fotoluminescência é suficiente para determinar as composições da liga como pode mostrado na Figura 3.3. No caso da liga de InGaAs, podemos estimar sua composição baseados na equação empírica polinomial dada por (CHUANG, 1995):

$$Eg[In_{(1-x)}Ga_xAs] \approx 0,324 + 0,7x + 0,4x^2 \quad (3-2)$$

Os resultados utilizados nessa tese foram obtidos a partir da montagem experimental apresentada na Figura 3.5. Nesta, foi utilizado um laser de argônio, um monocromador e um detector de germânio.

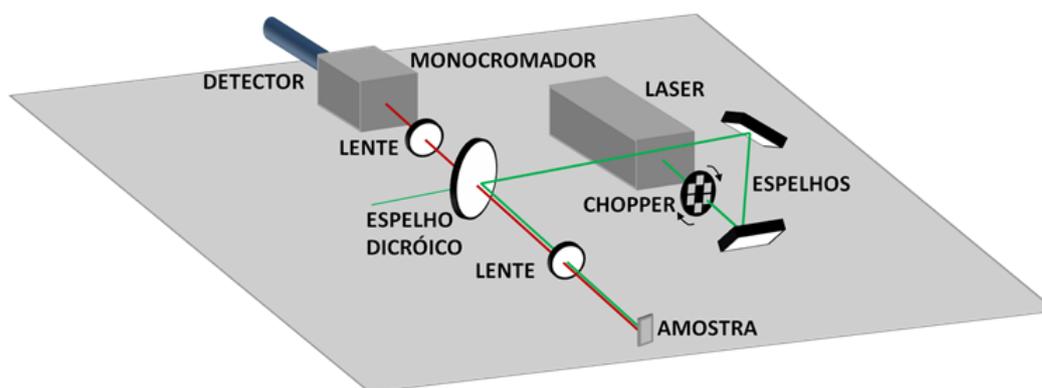


Figura 3.5: Representação esquemática do experimento de fotoluminescência utilizado. O laser, em verde, é modulado e passa por um jogo de espelhos e de lentes para ser focado sobre a amostra. A emissão da amostra, em vermelho, também passa por um conjunto de lentes para ser focada na entrada do monocromador.

Fonte: (KAWABATA, 2011)

3.5 Pulverização Catódica

A pulverização catódica é uma técnica de deposição de filmes finos, amplamente utilizada na indústria de semicondutores e em outras áreas para a fabricação de dispositivos eletrônicos, revestimentos de superfícies e a produção de materiais avançados (OHRING, 2002; KELLY; ARNELL, 2000). O processo de pulverização catódica envolve o bombardeamento de um material-alvo com íons que levam à ejeção de átomos do material-alvo e estes são então depositados na superfície do substrato. O processo é geralmente realizado em uma câmara a vácuo para evitar contaminação e para garantir a uniformidade do filme fino depositado.

A pulverização catódica é uma técnica em baixa temperatura, o que a torna adequada para a deposição de materiais sensíveis ao calor e para a produção de dispositivos eletrônicos baseados em materiais orgânicos. Além disso, a técnica de pulverização catódica permite a produção de filmes com alta aderência, uniformidade e resistência mecânica, o que a torna ideal para aplicações que requeiram resistência a ambientes adversos como o caso de revestimento de superfícies (OHRING, 2002).

A técnica de pulverização catódica é considerada uma das técnicas de deposição mais versáteis e eficazes para a produção de filmes finos com alta qualidade e pureza (OHRING, 2002; KELLY; ARNELL, 2000). Ela permite a deposição de uma ampla gama de materiais, incluindo metais, óxidos, nitretos e outros materiais inorgânicos. Além disso, a técnica é relativamente fácil de ser implementada em larga escala e pode ser adaptada para a produção de

filmes com diferentes espessuras e características. Por esta razão, a pulverização catódica tem sido usada em áreas como produção de painéis solares, displays de cristal líquido, sensores diversos, microchips, peças automotivas, dentre outras.

3.6

Elipsometria

A elipsometria é uma técnica que mede a mudança da polarização da luz, a qual é refletida ou transmitida por um material. Esta mudança de polarização representa a razão de amplitude e a diferença de fase. A técnica de elipsometria é muito utilizada para determinar a espessura de um filme fino, mas também pode ser usada para determinar as constantes ópticas, composição, cristalinidade, rugosidade, concentração de dopagem e outras propriedades do material (AZZAM; BASHARA, 1988).

Com os avanços tecnológicos desde a década de 60, a elipsometria conseguiu aprimorar sua resolução de medida para a escala de nanômetros. Sendo extremamente útil para diversos campos da pesquisa, sua principal vantagem é sua versatilidade no trabalho com diversos tipos de materiais, desde dielétricos, semicondutores, metais, até materiais orgânicos (AZZAM; BASHARA, 1988).

A curva de elipsometria é obtida quando há uma mudança da luz linearmente polarizada (emitida) para uma luz elípticamente polarizada (detectada). Isso ocorre, pois quando a luz linearmente polarizada incide sobre a superfície do material, temos interações da luz com o material (AZZAM; BASHARA, 1988). Estas interações fazem com que as ondas de luz ortogonais (que formam ângulos retos) que antes estavam em fase, sofram uma variação angular e apresentem amplitudes e fases aleatórias, conforme podemos ver na Figura 3.6.

Devido a essa diferença entre o feixe linear e o elíptico, temos uma variação dos planos s e p em relação a um feixe de incidência. Essa mudança na polarização é a medida de elipsometria, que pode ser dada por:

$$\tan(\psi)e^{i\Delta} = \frac{r_p}{r_s} \quad (3-3)$$

Onde ψ representa a razão de amplitude, Δ a diferença de fase, r_p e r_s são os coeficientes de reflexão de Fresnel para a luz polarizada nos planos p e s , respectivamente.

Os componentes deste sistema de medida são: fonte de luz, polarizador, analisador de polarização e detector. Os elipsômetros possuem 4 configurações típicas: analisador rotativo (RAE, do inglês *rotating analyzer*), polarizador

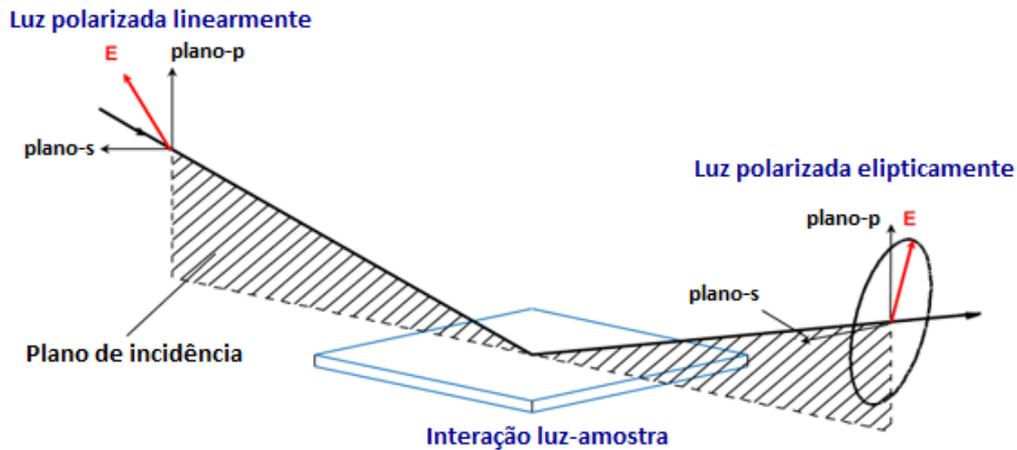


Figura 3.6: Esquema óptico detalhado de como é feita a obtenção da variação dos planos p e s para a medida de elipsometria.

Traduzido de: (WHAT..., a)

rotativo (RPE, do inglês *rotating polarizer*), compensador rotativo (RCE, do inglês *rotating compensator*) e modulação de fase (PME, do inglês *phase modulation*) (WHAT..., a). Para esse trabalho será utilizado o elipsômetro com a configuração RAE.

Para determinar a espessura de um material, o *software* compara os valores obtidos de ψ e Δ com seu banco de dados e gera um modelo teórico. O *software* encontra a melhor correspondência entre o modelo teórico e o experimento por meio de um ajuste, usando o erro quadrático médio (MSE, do inglês *Mean Squared Error*). Conforme o manual do equipamento, valores de MSE menores do que 1 para camada simples e menores do que 10 para múltiplas camadas são considerados bons ajustes do modelo teórico com o experimento. A Figura 3.7 mostra uma medida típica de elipsometria para determinar a espessura de um filme fino de dióxido de silício (SiO_2) sobre um substrato de silício (Si).

3.7

Espectrofotometria

A espectrofotometria é um conjunto de técnicas analíticas usadas para medir a intensidade da luz em diferentes comprimentos de onda e é amplamente empregada na química, biologia e física. O princípio básico da espectrofotometria é baseado na interação da luz com a matéria, que pode resultar em absorção, reflexão ou transmissão da luz. Nesta tese, usamos um espectrofotômetro para medir a refletância espectral, visando determinar a fração

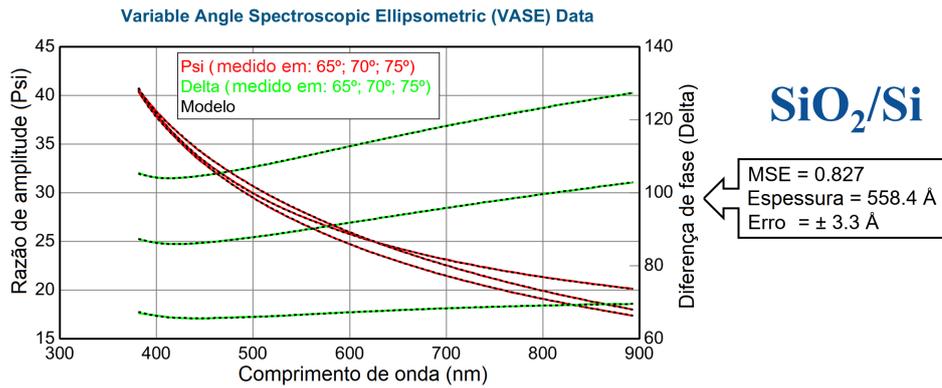


Figura 3.7: Exemplo de uma medida típica de elipsometria. Onde temos o ângulo elíptico de interesse (ψ) e a defasagem angular (Δ) entre o ângulo linear de referência e o ângulo elíptico de interesse. Temos também o valor de MSE que relaciona as curvas experimentais com o modelo computacional, para obter a espessura do filme depositado.

da luz refletida por uma superfície, em relação à luz incidente com diferentes comprimentos de onda. A fórmula utilizada para o cálculo pode ser dada por:

$$R(\lambda) = \frac{I_{refletido}(\lambda)}{I_{incidente}(\lambda)} \quad (3-4)$$

Onde $I_{refletido}(\lambda)$ é a intensidade da luz refletida e $I_{incidente}(\lambda)$ é a intensidade da luz incidente, ambos para um comprimento de onda específico (λ). O espectro de refletância pode ser usado para caracterizar propriedades ópticas da superfície e comparar com padrões ou amostras conhecidas. Os espectros de refletância dos dispositivos com e sem o revestimento AR foram medidos na faixa de comprimento de onda entre 900 e 1700 nm, usando um espectrofotômetro modelo Cary 5000 UV-Vis-NIR da empresa Agilent.

4

Primeira otimização - introdução do quaternário

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes ao crescimento do quaternário InGaAsP e à caracterização do dispositivo, além do comparativo das estruturas sem e com o quaternário.

4.1

Produção do dispositivo

A estrutura inicial estudada nesse trabalho pode ser encontrada na literatura (ROUVIÉ et al., 2012; LI et al., 2022; BOISVERT et al., 2008), e está apresentada na Figura 4.1. Esta estrutura consiste em uma camada para contato elétrico superior de InGaAs com 70 nm de espessura e nível de dopagem do tipo $p+$ de $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. A região ativa $p-i-n$ consiste em uma camada $p+$ de InP, uma camada "intrínseca" $n-$ de InGaAs e uma camada $n+$ de InP. A camada $p+$ de InP possui 1000 nm de espessura e nível de dopagem $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

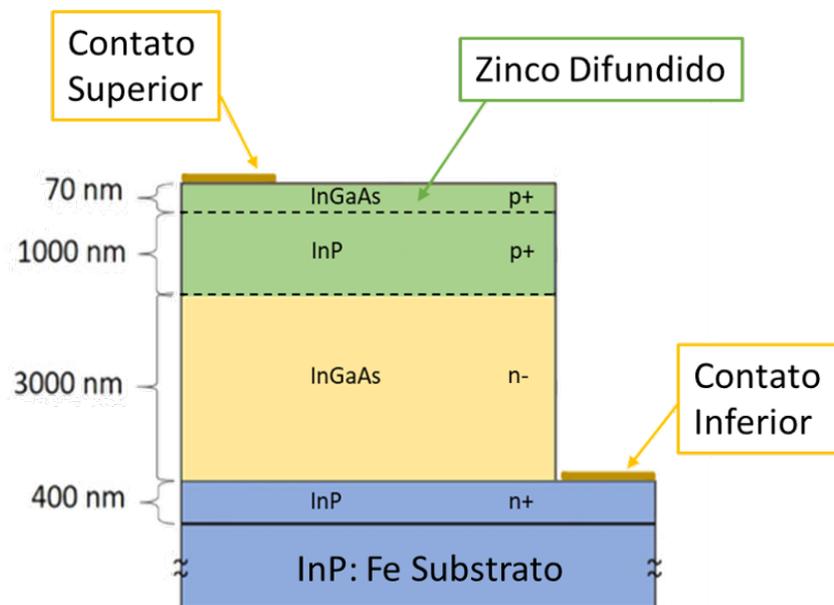


Figura 4.1: Estrutura tipo mesa do fotodiodo de InGaAs, após a difusão uniforme do dopante Zn.

A camada absorvedora de InGaAs possui 3000 nm de espessura e nível de dopagem tipo $n-$ de $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (dopagem intencional), para garantir a

reprodutibilidade da dopagem na fabricação dos dispositivos. Já a camada $n+$ de InP possui 400 nm de espessura e nível de dopagem $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. O elemento para dopagem n é o Si depositado conjuntamente com as camadas. Por sua vez, as camadas com dopagem do tipo $p+$ são produzidas pelo método de difusão do dopante Zn em momento posterior ao crescimento das camadas, para comprovar o funcionamento do método de dopagem e posteriormente aplicar em dispositivos com estrutura planar. Estas camadas foram depositadas sobre um substrato de InP (100) semi-isolante (dopante ferro).

Ao analisarmos o diagrama de bandas desta estrutura (Figura 4.2) percebemos haver um potencial problema nela relativo à diferença entre os *bandgaps* do InGaAs (0,74 eV) e do InP (1,34 eV). A interface entre o InGaAs $n-$ e o InP $n+$ é um ponto de armadilhamento de portadores que pode reduzir o desempenho do dispositivo.

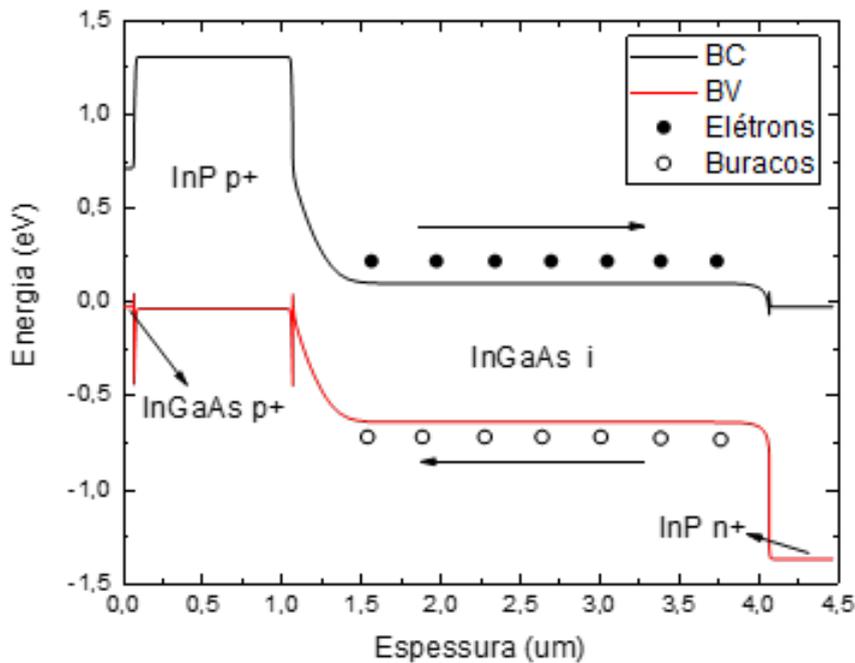


Figura 4.2: Diagrama de bandas da estrutura sem o quaternário.

O InGaAsP é utilizado em fotodiodos do tipo avalanche (APD, do inglês "*avalanche photodiode*") para reduzir o armadilhamento de buracos, auxiliando no processo de extração dos mesmos (LIANG et al., 2023). A modificação proposta por essa tese para reduzir o armadilhamento dessa estrutura de fotodiodo foi a adição de uma camada do quaternário InGaAsP entre a camada de InGaAs $n-$ e a camada $n+$ de InP, conforme apresentado em Figura 4.3. A introdução do quaternário nesta posição foi escolhida para priorizar a extração dos portadores armadilhados nesta interface.

O crescimento de todas as camadas que compõem o dispositivo foram calibradas, tal qual o processo de difusão do dopante Zn para a difusão uniforme. Na seção a seguir serão expostos os resultados quanto à calibração da camada quaternária. As informações sobre as calibrações das demais camadas que compõem a estrutura e do processo de difusão do dopante foram feitas em trabalho anterior e podem ser encontradas em (RUA, 2019). Os dispositivos apresentados foram crescidos utilizando um reator do tipo MOVPE localizado na PUC-Rio.

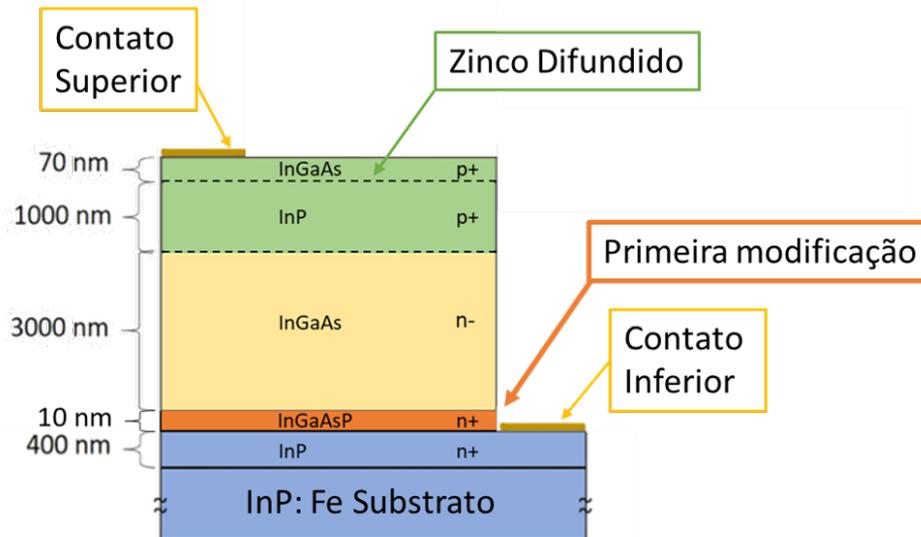


Figura 4.3: Estrutura tipo mesa do fotodiodo de InGaAs, otimizada com a inclusão do quaternário InGaAsP.

4.1.1 Calibração do crescimento

Para a calibração de um quaternário é importante a definição dos parâmetros de energia de *gap* e de rede. Esses dois parâmetros são necessários para calcular a composição dos materiais presentes na liga. Para o InGaAsP proposto, foram definidos os parâmetros como: energia de *gap* de 1 eV (1240 nm) e parâmetro de rede do InP, 5,86 Å (para o casamento com o substrato de InP). A camada também deveria ser crescida com a dopagem de $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Como já explicado anteriormente, o processo de calibração do crescimento das ligas quaternárias demanda diversas amostras para definir os fluxos corretos dos precursores e demais variáveis do processo. Para exemplificar esse processo de calibração, serão apresentados resultados da fotoluminescência e de raio-x de algumas amostras, conforme Figura 4.4 e Figura 4.5, respectivamente.

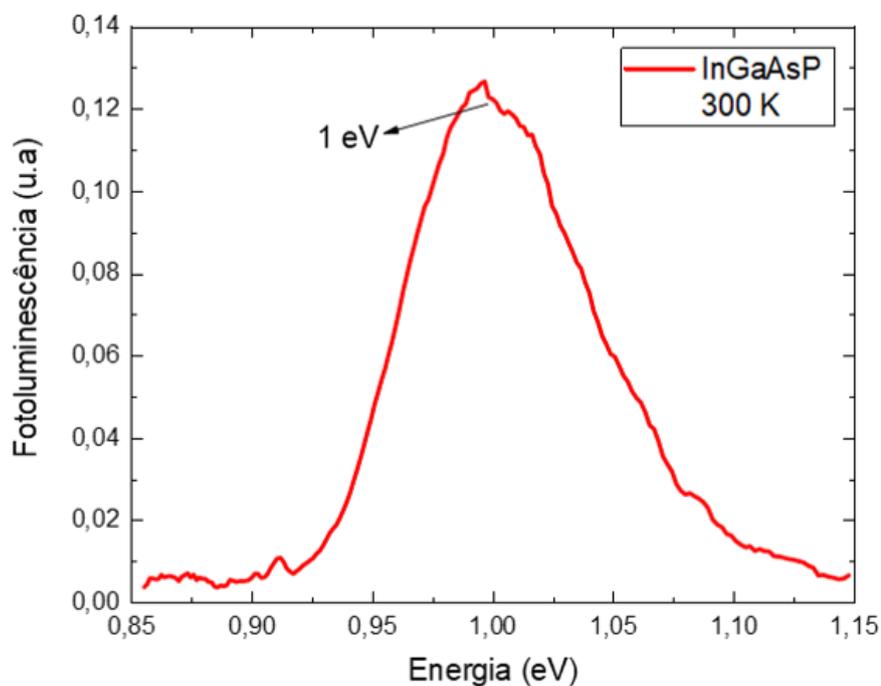


Figura 4.4: Espectro de fotoluminescência do InGaAsP sobre substrato de InP em 300 K.

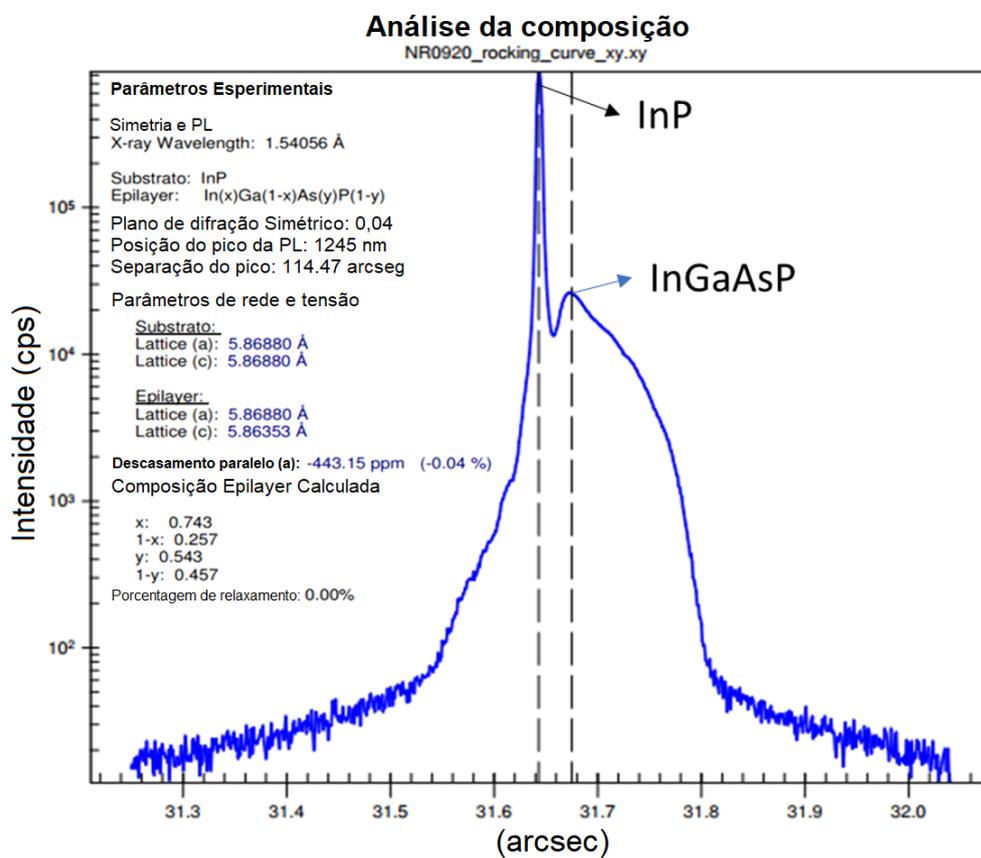


Figura 4.5: Difração de raios-x do InGaAsP sobre substrato de InP em 300 K.

No espectro de fotoluminescência (Figura 4.4) podemos observar um pico de intensidade em torno da energia de 1 eV (1240 nm), que representa a energia de *gap* do InGaAsP crescido. Consideramos esta energia de *gap* ideal para a redução do armadilhamento dos elétrons, uma vez que está aproximadamente na metade da diferença entre as energias de *gap* do InGaAs e do InP. Conforme podemos ver na Figura 4.5, o parâmetro de rede obtido pela medida de difração de raios-x foi de 5,86353 Å, com um pequeno descasamento de 443,15 ppm (0,04%) com o substrato de InP. Com as informações da energia de *gap* e do parâmetro de rede do InGaAsP crescido, é possível calcular empiricamente a sua composição. O *software* para análise de difração de raios-x associado ao equipamento usado para essa medida possui um banco de dados para este material. Ao inserir os resultados da energia de *gap* e do parâmetro de rede o programa fornece a composição baseada neste banco de dados, e no caso desta amostra foi de $\text{In}_{0,743}\text{Ga}_{0,257}\text{As}_{0,543}\text{P}_{0,457}$. Para o InGaAsP da amostra final, foi feito um pequeno ajuste no fluxo dos gases (alteração sutil, que não interfere no *gap* da liga) para acertar o casamento.

4.1.2

Difusão do dopante

Conforme mencionado no Cap. 1, nesse trabalho optamos por dopar a camada *p* do dispositivo após o crescimento da estrutura através do processo de difusão uniforme com o dopante Zn. Assim como o crescimento do dispositivo, a difusão também foi realizada no MOVPE da PUC-Rio. Os parâmetros para a difusão do dopante já haviam sido calibrados em trabalho prévio (RUA, 2019) e na ocasião não foi possível atingir os valores mais altos do fluxo do precursor de dopante (DMZn, dimetilzinco) encontrado na literatura (DAVIES; PARROTT; WILLIAMS, 1986). Contudo, nas caracterizações dos níveis de dopagem e das profundidades de difusão atingidas, essa limitação não impediu de alcançar os valores requisitados para o fotodiodo.

O fluxo do gás precursor (DMZn) e o tempo de difusão estão relacionados diretamente ao transporte de massa do elemento de dopagem Zn ao qual as camadas de InGaAs e InP superiores foram expostas. Já a temperatura de difusão está relacionada à cinética, termodinâmica e física de superfície do processo, ou seja, ela atua sobre a pirólise do precursor DMZn, a adsorção do adátomo de Zn na superfície e a difusão desse elemento para dentro das camadas crescidas de InGaAs e InP. Segundo Davies et al. (1986) (DAVIES; PARROTT; WILLIAMS, 1986), a pirólise de DMZn em ambiente rico em hidrogênio se inicia em torno de 200 °C e atinge 100% de decomposição em temperaturas entre 340 e 530 °C. Para o fotodiodo proposto, com o intuito

de dopar toda a camada de InGaAs e InP do topo (Figura 4.3), os resultados almejados para a difusão do Zn são: **profundidade de 1 μm** e **dopagem próxima de $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$** . Na Figura 4.6 estão apresentados os parâmetros analisados durante esta etapa de calibração da difusão de Zn em uma camada de InP. Dentre todas as amostras produzidas, os parâmetros do resultado mais satisfatório frente ao objetivo são: 100 mbar, 520 °C, 11 minutos de difusão do dopante, fluxo efetivo de 5,78 sccm e fluxo molar de 148,2 $\mu\text{mol}/\text{min}$.

Uma vez calibrados os parâmetros para o InGaAsP e para a difusão de Zn, os fotodetectores foram crescidos e posteriormente preparados para serem realizadas as medidas de caracterização (corrente de escuro e fotocorrente). Os fotodetectores foram acoplados a um *chip* de leitura e os contatos elétricos foram feitos com a adesão de índio metálico à superfície das camadas de contato InGaAs *p+* e InP *n+* para a formação de um contato do tipo ôhmico na interface metal-semicondutor. Fios de ouro com diâmetro de 18 μm foram usados para conectar o índio metálico ao *chip* de leitura, conforme Figura 4.7.

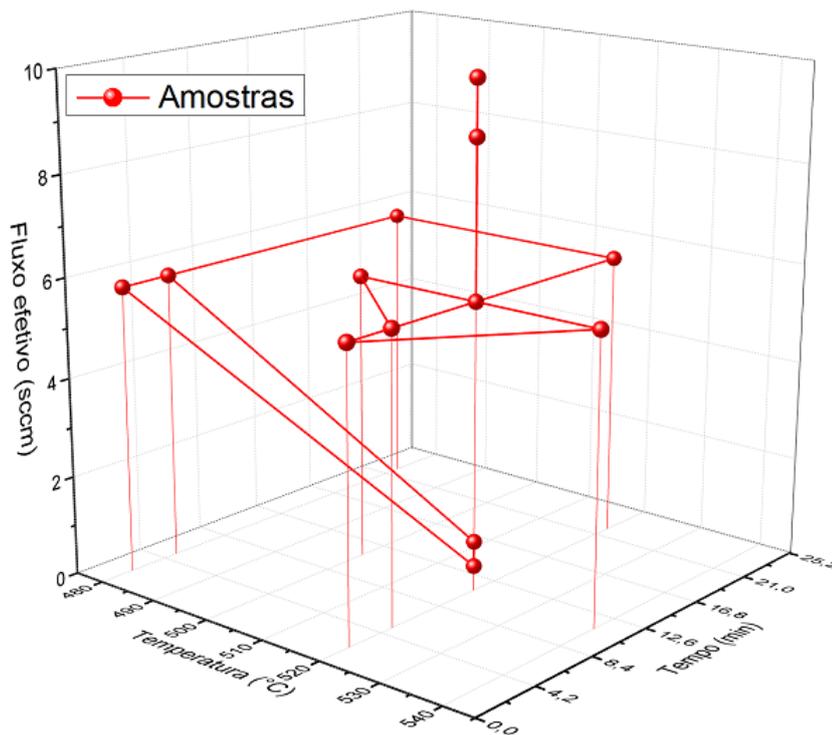


Figura 4.6: Diagrama das amostras no espaço de busca dos parâmetros de difusão. Os pontos em vermelho representam as amostras produzidas e as linhas representam somente um guia.



Figura 4.7: Dispositivo preparado para caracterização. No círculo vermelho estão os contatos na camada $n+$ (InP) e fora do círculo estão os contatos da camada $p+$ (InGaAs).

4.2

Caracterizações

Nesta seção serão apresentados os resultados comparativos da corrente de escuro e da fotocorrente dos fotodetectores com a inserção da camada de InGaAsP e da difusão do Zn.

4.2.1

Corrente de escuro

As medidas apresentadas foram conduzidas em um criostato para nitrogênio líquido da Janis Research Company modelo VPF-100 equipado com um escudo térmico e com um controlador de temperatura Lakeshore Cryotronics Inc. modelo 325. As curvas I-V foram obtidas utilizando um analisador de parâmetros de semicondutores da HP modelo 4145b.

Para facilitar a discussão dos resultados, a amostra que não possui o quaternário terá legenda DC (dispositivo convencional) e a amostra que possui o quaternário terá legenda DQ (dispositivo com quaternário). As correntes de escuro do dispositivo DC em função das polarizações elétricas aplicadas para temperaturas entre 78 e 300 K, estão mostradas na Figura 4.8. Como a área do fotodetector é grande, cerca de $13,5 \text{ mm}^2$, é esperado que a intensidade da corrente de escuro seja elevada se comparada aos fotodetectores reportados na literatura (BRAGA et al., 2023; ROUVIÉ et al., 2013).

Como a variação da temperatura pouco influenciou na corrente de escuro do dispositivo, o comparativo apresentado a seguir é realizado em temperatura

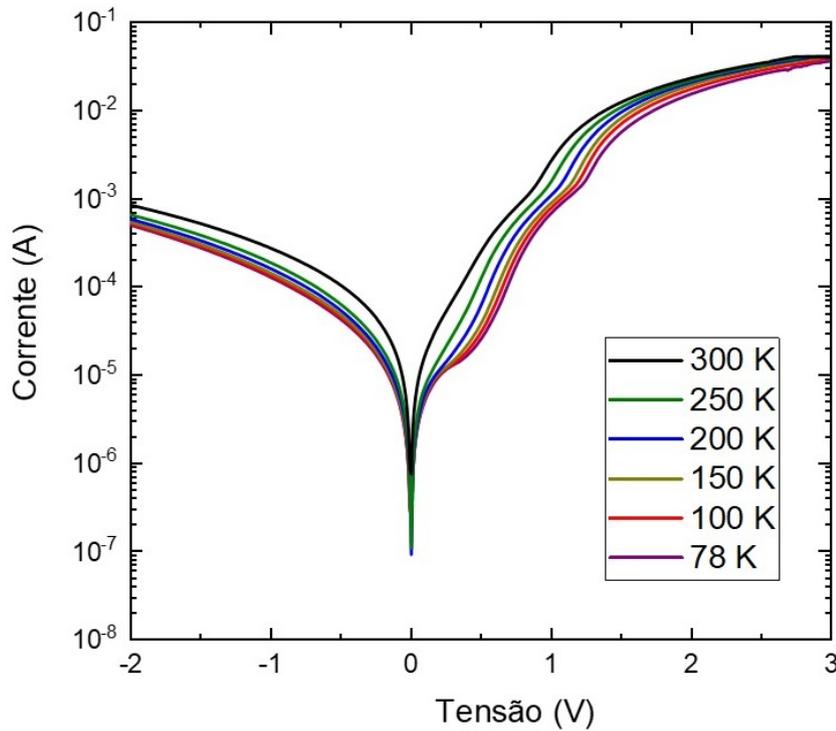


Figura 4.8: Medidas de corrente de escuro com variação da temperatura de 78 a 300 K, para o dispositivo sem quaternário (DC).

ambiente. Na Figura 4.9 apresenta-se um comparativo entre a amostra DQ (curva sólida em preto) e DC (curva pontilhada em vermelho). A corrente de escuro do DQ foi superior à corrente de escuro do DC. Mesmo se considerada a área efetiva dos fotodiodos (no DQ é 5% menor que do DC), o dispositivo DQ mantém esse desempenho pior em comparação com o dispositivo DC. Uma hipótese é que a adição do InGaAsP na estrutura reduz a densidade de armadilhas na interface InGaAs/InP, e aumenta, conseqüentemente, a extração dos portadores armadilhados.

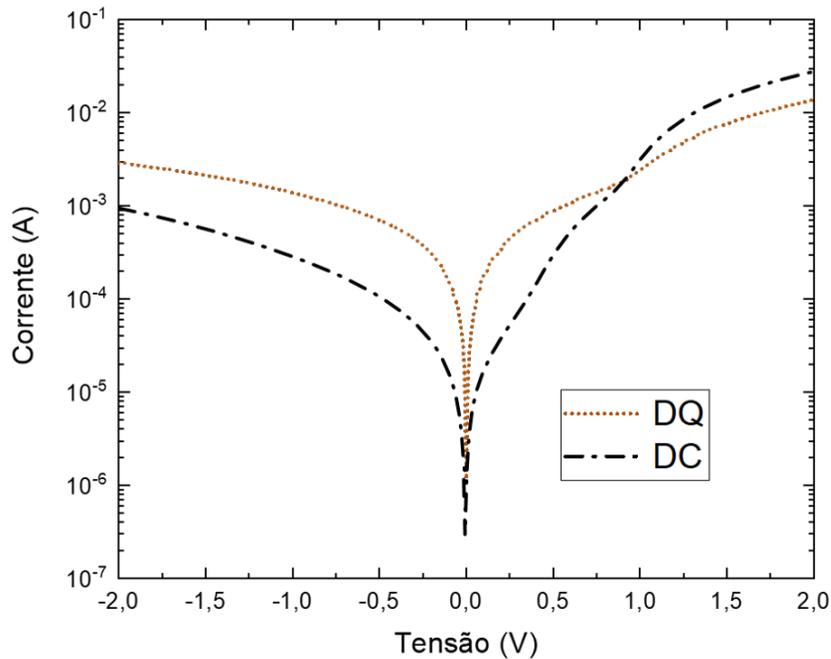


Figura 4.9: Curvas de corrente de escuro dos dispositivos. Em preto tracejado e pontilhado temos a curva do dispositivo convencional (DC). Em marrom temos a curva pontilhada do dispositivo com quaternário InGaAsP (DQ). As curvas das correntes de escuro foram obtidas em temperatura ambiente (300 K).

4.2.2

Espectro de fotocorrente

Para obter o espectro de fotocorrente, utilizamos uma lâmpada da Oriel Instruments modelo 66881, um monocromador da Oriel Instruments modelo 74100, uma lente convexa, um filtro ótico passa-alta de Si, um amplificador de corrente da Stanford Research Systems modelo SR570 e um amplificador *lock-in* da Stanford Research Systems modelo SR530. Na Figura 4.10 estão apresentados os espectros de fotocorrente entre 1000 nm e 2000 nm para amostras DQ e DC. Todos os espectros foram obtidos em temperatura ambiente (300K) e com a mesma montagem experimental. Foi utilizado para a obtenção dos espectros da Figura 4.10 um filtro de Si, bloqueando a radiação de comprimento de onda abaixo de 1000 nm, visando eliminar o espectro harmônico de segunda ordem.

Podemos perceber que no dispositivo com InGaAsP há fotocorrente em comprimentos de onda maiores do que os comprimentos de onda de absorção dos materiais envolvidos, ou seja, para comprimentos de onda maiores do que 1650 nm. Esse fenômeno está sendo investigado para entender exatamente

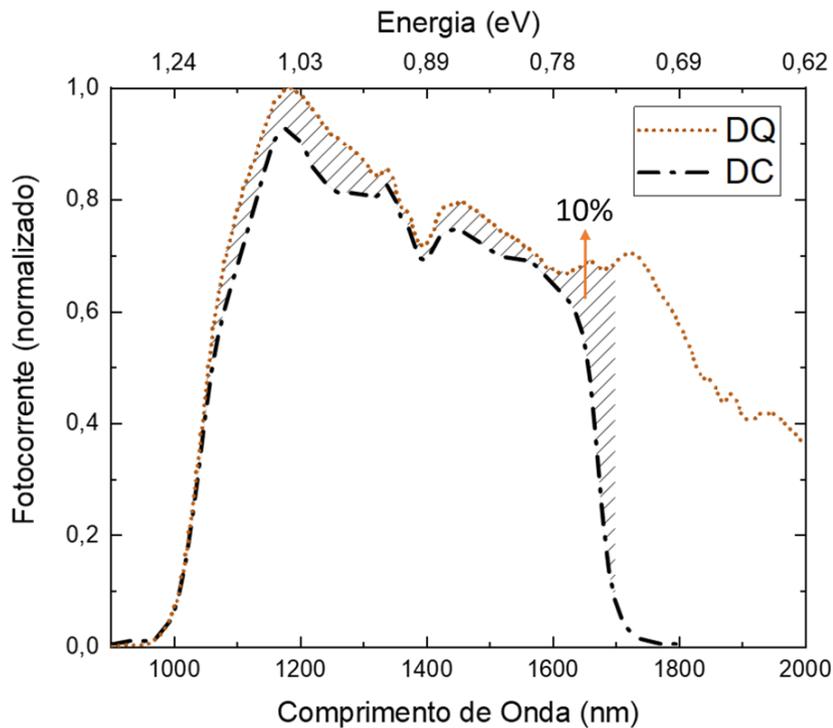


Figura 4.10: Espectros de fotocorrente dos dispositivos. Em preto tracejado e pontilhado temos a curva do dispositivo sem o quaternário (DC) e em marrom temos a curva pontilhada do dispositivo com quaternário (DQ). Os espectros de fotocorrente foram obtidos em temperatura ambiente (300 K) e no modo fotovoltaico.

quais transições eletrônicas estão envolvidas na geração de fotocorrente em comprimentos de onda maiores do que 1700 nm. Analisando a integral dos espectros entre 1000 nm e 1700 nm, percebemos que o DQ apresenta um aumento na intensidade da fotocorrente em torno de 10% em relação ao dispositivo DC. Esse aumento na integral da fotocorrente é atribuído à melhora na extração dos portadores fotogerados em acordo com a engenharia de bandas proposta com a inclusão da camada de InGaAsP.

5

Segunda otimização - revestimento antirreflexo

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes ao revestimento antirreflexo (AR). Serão detalhadas as etapas de modelagem teórica, fabricação e caracterização do revestimento. Também serão apresentados os resultados de caracterização dos dispositivos revestidos com o revestimento antirreflexo proposto.

5.1

Revestimento antirreflexo

Baseado na teoria da lei de Fresnel, apresentada no Cap. 2, o revestimento AR consiste no empilhamento de diversas camadas, tipicamente dielétricos, para reduzir a refletância da superfície do seu dispositivo ao mínimo possível. Neste trabalho, com base no fotodiodo de InGaAs, buscou-se desenvolver um revestimento antirreflexo otimizado para comprimentos de onda entre 900 nm e 1700 nm. Na literatura já existem diversos estudos para uma camada antirreflexo simples, i.e., formada por apenas uma camada (e.g. dióxido de titânio (TiO_2) ou dióxido de silício (SiO_2) ou alumina (Al_2O_3) ou outros dielétricos). Porém, é possível encontrar combinações de materiais (número de camadas e espessuras) para formar um revestimento antirreflexo mais promissor do que os formados por uma única camada. De forma geral, o conceito teórico de um revestimento antirreflexo prevê que quanto maior for o número de camadas, menor será a refletância na superfície. Contudo, deve haver um limite superior na quantidade de camadas, pois a partir de n camadas a transmitância dos fótons para dentro do fotodiodo decai. Na prática, quanto maior o número de camadas, mais da radiação pode ser absorvida na própria camada AR e maior a dificuldade na sua fabricação. Por este motivo, é necessário ponderar o custo-benefício entre a complexidade de fabricação do AR e a diminuição efetiva da refletância.

5.2

Simulação do revestimento AR

Para calcular os espectros de refletância das camadas antirreflexo foi utilizado o *software Essential Macleod*, que possui um vasto banco de dados com os parâmetros dos materiais testados na simulação. Como são os materiais mais comuns para camadas AR, escolhemos o TiO_2 e o SiO_2 para compor o AR. Conforme podemos observar na Figura 5.1, revestimentos AR de TiO_2

e SiO_2 acima de 4 camadas conseguem atenuar a refletância da superfície até menos de 1%, não havendo, para a faixa de comprimentos de onda considerada, ganhos substanciais com o possível aumento do número de camadas. Com base nos resultados apresentados na Figura 5.1, foi escolhido um revestimento AR composto por no máximo 4 camadas de dielétricos.

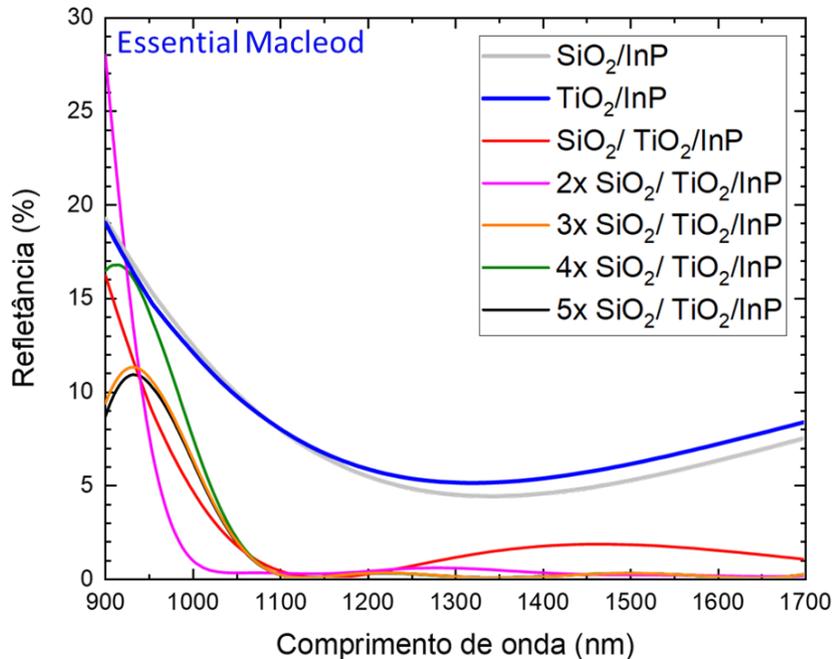


Figura 5.1: Resultados das curvas de refletância simuladas para diferente quantidades de camadas de dielétricos, usando o *software Essential Macleod*. Todas as curvas são baseadas nos dados presentes na base de dados do *software*.

Foram realizadas simulações teóricas de combinações de dielétricos de composições e espessuras diversas a fim de obter uma estrutura que apresentasse a menor refletância possível na faixa de comprimentos de onda entre 900 e 1700 nm, conforme mostrado na Figura 5.2. Além de três exemplos de revestimentos AR (dois de camadas simples e outro de múltiplas camadas), neste gráfico acrescenta-se a refletância da superfície do InP sem revestimento como referência. O revestimento otimizado encontrado consiste em uma sequência de quatro filmes finos alternados entre TiO_2 e SiO_2 com espessuras de 64,88 nm e 39,53 nm para o TiO_2 , e 25,24 nm e 196,86 nm para o SiO_2 . Com esta estrutura, a refletância sobre o AR em InP foi abaixo de 2% em toda a faixa de comprimentos de onda de interesse.

A escolha por desenvolver o revestimento AR sobre InP se dá pela projeção futura no qual a radiação incidirá pelo substrato de InP e não pela camada de InGaAs na superfície do fotodiodo, em um formato do tipo matriz de detectores planares. Experimentalmente, cada um dos materiais formadores

do revestimento AR foi calibrado individualmente e em sistemas de bicamadas, sobre substratos tanto de silício quanto de InP.

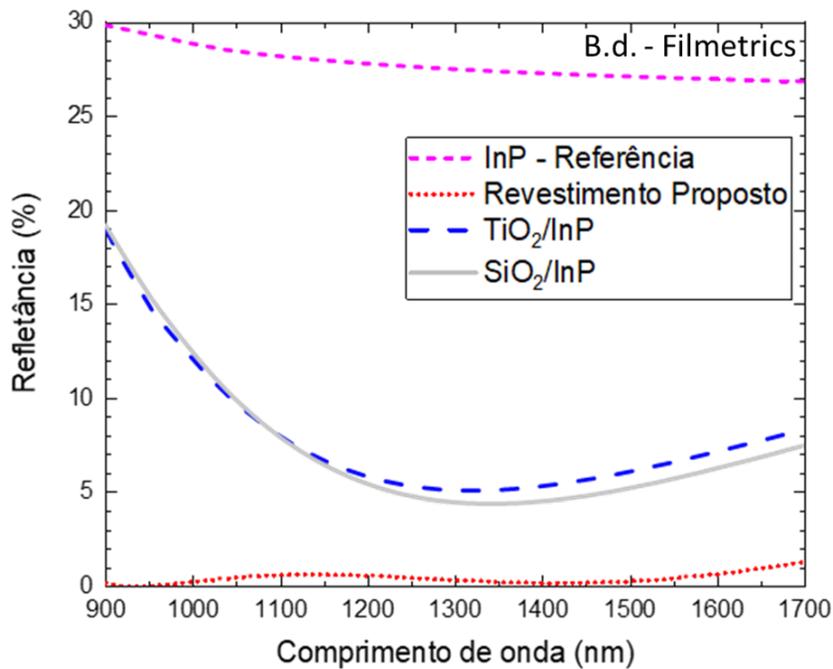


Figura 5.2: Resultados das curvas simuladas de refletância para o revestimento AR proposto (vermelho pontilhado), o InP sem revestimento (rosa tracejado curto), o TiO₂ (azul tracejado) e o SiO₂ (cinza sólido). Todas as curvas são baseadas nos dados presentes na base de dados do *software*.

5.2.1 Calibração do revestimento AR

Existem duas formas mais comuns de se calibrar a taxa de deposição em um sistema de pulverização catódica. A primeira é via caracterizações pós-deposição para calibrar a espessura da camada em função do tempo de deposição. Porém, caso ocorram imprevistos durante a deposição, como: instabilidade na rede elétrica, pequenas variações da pressão do argônio ou do plasma formado na câmara, as espessuras das camadas do AR poderão ter uma incerteza elevada, quando utilizado a deposição em função do tempo. A alternativa possível para equipamentos de pulverização catódica com canhões confocais é a utilização de uma micro balança de cristal de quartzo para monitoramento em tempo real da deposição como uma forma mais confiável de se obter a espessura desejada do AR. Este controle funciona medindo-se a mudança de frequência de vibração do cristal de quartzo que está associada à quantidade de material depositado sobre sua superfície. Esse método garante

uma precisão de cerca de 10 Å para a espessura de material depositado em sua superfície.

As deposições dos dielétricos foram realizadas no Instituto Militar de Engenharia (IME) e no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), com equipamentos de deposição por pulverização catódica. O equipamento disponível do IME (fabricação própria) possui 3 canhões confocais posicionados com espaçamento angular de aproximadamente 120° uns dos outros. O suporte de substrato fica na parte inferior da câmara com possibilidade de rotação para homogeneizar a deposição e de aquecimento necessário para alguns materiais específicos. Durante o processo, a pressão na câmara do equipamento foi da ordem de 1 mTorr, com temperatura do substrato de 18,5 °C e pressão efetiva de Argônio de 1 mTorr. A potência elétrica sobre o alvo de SiO₂ foi de 130 W para atingir uma taxa de deposição foi 0,9 Å/s. A potência elétrica sobre o alvo de TiO₂ foi de 150 W com uma taxa de deposição de 0,4 Å/s. Ambos os alvos foram alimentados por uma fonte de radiofrequência (RF).

Optou-se por começar a calibrar os materiais em camadas individuais sobre substratos de silício ou vidro, e caracterizá-los por elipsometria e refletância espectral. Para a medida de espessura, foi utilizado um elipsômetro modelo Alpha-Se da empresa J.A. Woollam. Nas Figuras 5.3 e 5.4 temos os principais resultados das calibrações de TiO₂ e SiO₂, respectivamente. Para uma maior precisão na determinação da espessura, foram feitas medidas em 3 ângulos de incidência da radiação sobre a superfície: 65°, 70° e 75°.

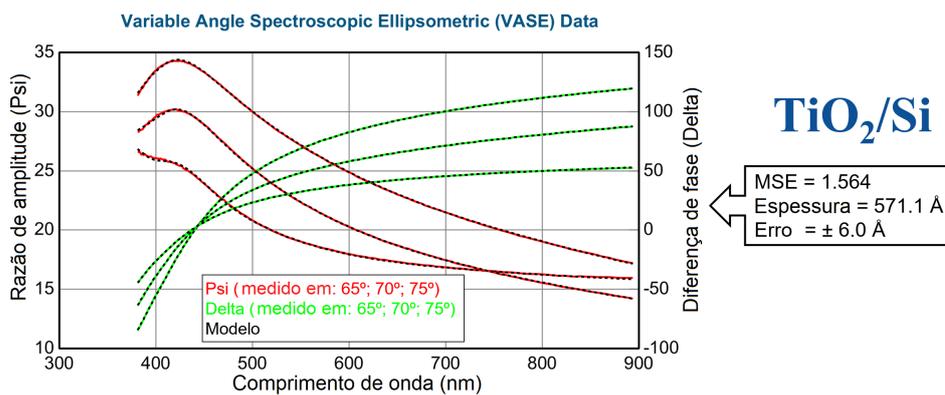


Figura 5.3: Resultado das medidas de elipsometria para o material TiO₂ depositado por pulverização catódica sobre substrato de silício. O valor do erro quadrático médio (MSE) presente mostra a precisão do ajuste do modelo com a medida.

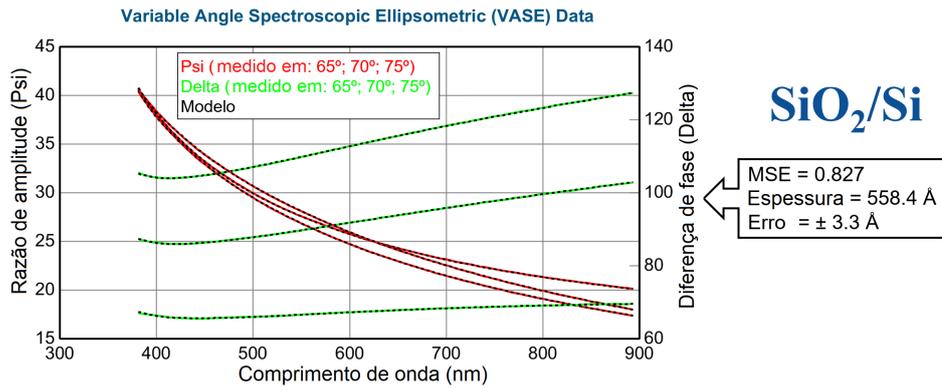


Figura 5.4: Resultado das medidas de elipsometria para o material SiO₂ depositado por pulverização catódica sobre substrato de silício. O MSE mostra o quão preciso foi o modelo usado para prever a espessura.

Observou-se que em ambos os resultados de elipsometria o modelo (linha tracejada) usado para determinar as espessuras segue próximo do perfil das medidas. Nos dois casos, o valor de MSE está abaixo de 2, representando boa correspondência do ajuste teórico com as curvas medidas.

Nestas amostras, o valor alvo de espessura era de 50 nm. Os resultados obtidos de espessura foram: 57,1 nm ± 0,6 nm para TiO₂ e 55,8 nm ± 0,3 nm para o SiO₂ sobre substratos de Si. Com base nesses resultados, foi feito um ajuste corretivo no parâmetro de *tooling factor* do cristal.

Também usou-se a elipsometria para averiguar possíveis variações na taxa de deposição quando realizadas sobre substrato de silício ou de InP. Outro ponto investigado foi a taxa de deposição dos materiais em bicamadas de SiO₂/TiO₂ sobre substratos de silício e InP para averiguar possíveis variações quando a deposição ocorre sobre um dielétrico para formar múltiplas camadas.

Nestas amostras, como podemos observar na Figura 5.5, há diferença na espessura das camadas depositadas para os 3 casos citados, e essa diferença mostra, por exemplo, que a taxa de deposição tanto do TiO₂ quanto do SiO₂ sobre silício é maior do que sobre InP. Para esta calibração da taxa de deposição do TiO₂ e do SiO₂, os substratos de Si e InP foram inseridos na câmara ao mesmo tempo. Isso indica que o uso de substratos de Si não é a melhor opção como substituto de menor custo do InP para calibração da deposição dos dielétricos.

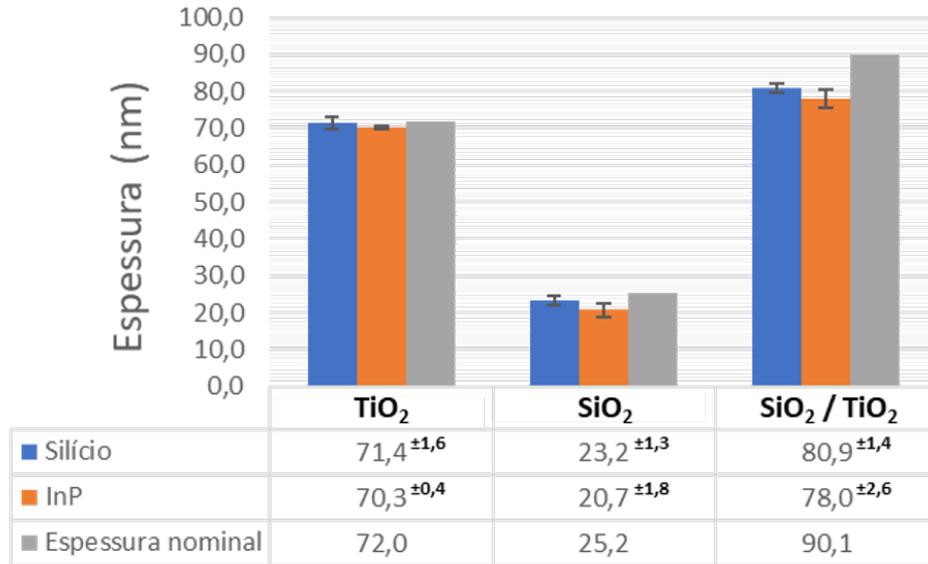


Figura 5.5: Espessuras medidas por elipsometria de TiO₂, SiO₂ e SiO₂/ TiO₂ depositados sobre Si e InP, e os valores esperados dessas espessuras segundo a calibração.

Durante a deposição da bicamada de SiO₂ sobre TiO₂ (ordem e espessuras do projeto proposto), Figuras 5.6 (Si) e 5.7 (InP), a espessura medida pelo cristal de quartzo foi de 64,9 nm para TiO₂ e 25,2 nm para o SiO₂, somando um total de 90,1 nm. Há uma diferença considerável entre as medidas de espessura por elipsometria e o valor medido pelo cristal (em torno de 10,6 nm de média entre as duas amostras). Seguindo o pensamento que o TiO₂ estava previamente calibrado, esta diferença entre o valor nominal esperado e o valor obtido pode ser atribuída a uma menor taxa de deposição do SiO₂ sobre o TiO₂. Mostrando ser necessário ajustar o *tooling factor* do cristal conforme as camadas do projeto. Também observa-se com os resultados das Figuras 5.6 e 5.7, que o valor do MSE aumentou com a adição de outra camada, juntamente com o valor do erro, que aumentou para 2,8 nm de média (entre as duas amostra). Porém, mesmo com os aumentos de MSE e do erro, o modelo conseguiu seguir de forma satisfatória as curvas medidas como podemos observar nas Figuras 5.6 (Si) e 5.7 (InP).

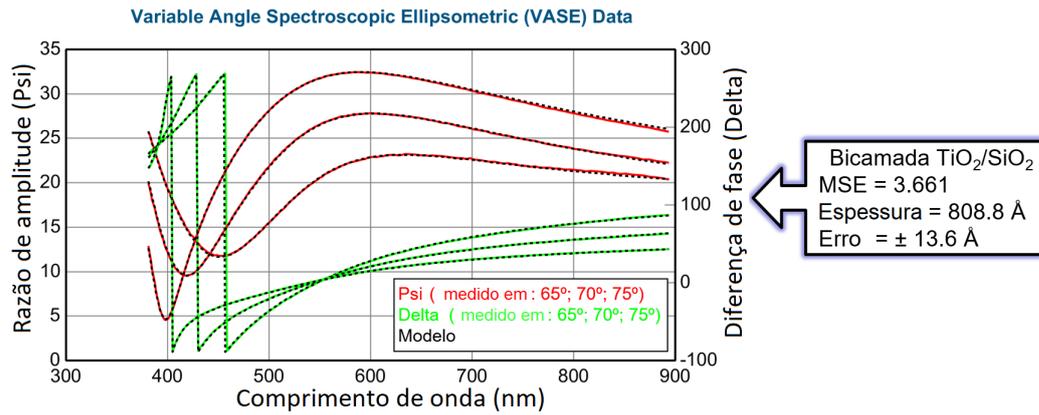


Figura 5.6: Resultado das medidas de elipsometria para o material SiO_2 sobre TiO_2 depositado por pulverização catódica sobre substrato de silício. O MSE mostra o quão preciso foi o modelo usado para prever a espessura.

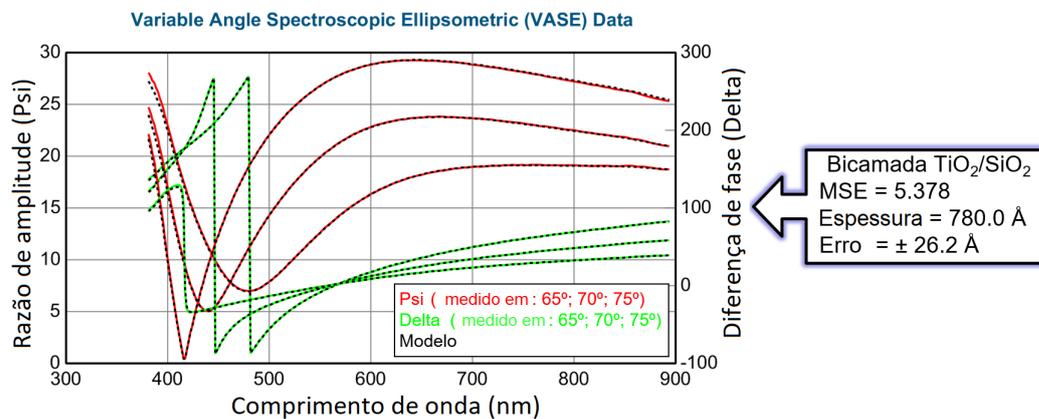


Figura 5.7: Resultado das medidas de elipsometria para o material SiO_2 sobre TiO_2 depositado por pulverização catódica sobre substrato de fosfeto de índio. O MSE mostra o quão preciso foi o modelo usado para prever a espessura.

5.2.2

Resultados experimentais do revestimento proposto

Com a etapa de calibrações finalizada e com base na estrutura apresentada na Figura 5.2, foram depositadas todas as quatro camadas de TiO_2 e SiO_2 (196,9nm SiO_2 / 39,5 nm TiO_2 / 25,2 nm SiO_2 / 64,9 nm TiO_2) que compõem o sistema AR, tanto sobre substratos de InP quanto de Si. O resultado da refletância deste sistema AR pode ser observado na Figura 5.8. Neste gráfico estão incluídos os resultados experimentais de refletância assim como a curva de refletância teórica simulada para um substrato de InP com e sem o sistema AR.

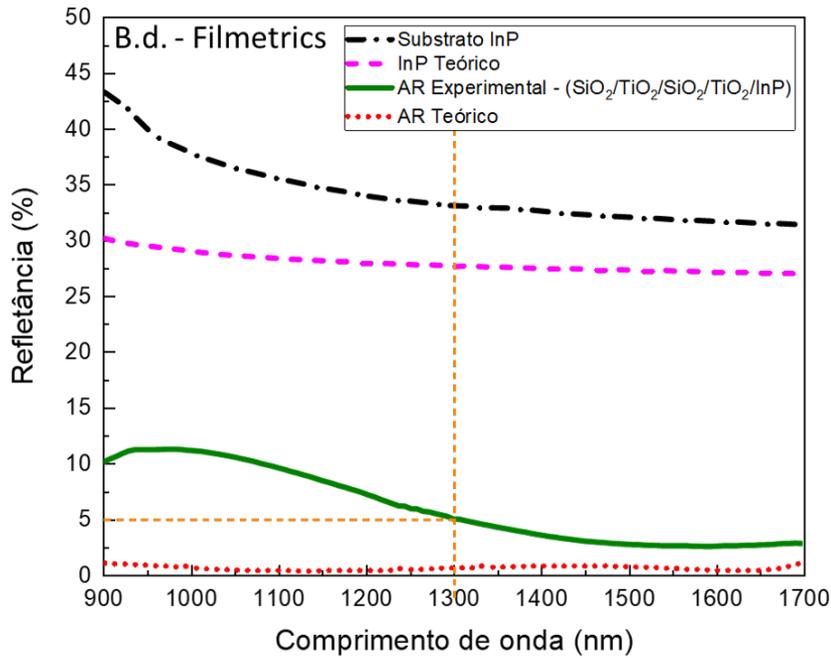


Figura 5.8: Curvas de refletância medidas (substrato e revestimento antirreflexo) contra as curvas obtidas por meio de simulação teórica. Em preto, traçado e pontilhado temos o espectro de refletância experimental do substrato de InP, em rosa tracejado curto o espectro teórico do InP, em linha sólida verde temos o espectro experimental do revestimento proposto e em pontilhado vermelho temos o espectro de refletância do projeto teórico.

Observa-se que na faixa de comprimentos de onda de interesse há uma diferença em torno de 5% entre as refletâncias do InP medido experimentalmente e modelado teoricamente. Também observa-se para a refletância medida do InP que entre 900 e 1300 nm há um decaimento de 40% até 33%, e entre 1300 e 1700 nm o comportamento da curva estabiliza em torno de 33% e se aproxima da curva simulada. Esta diferença pode ser explicada por uma divergência entre as características específicas do substrato de InP medido, em comparação com os parâmetros presentes na base de dados do *software*. Variações de nível de impurezas, nível de dopagem, orientação cristalina, entre outras, podem causar estas diferenças. Esta diferença de refletância presente para o substrato de InP pode ter se propagado e provocado uma discrepância também nas refletâncias do sistema AR experimental e simulado. Analisando ambas as curvas experimentais, tem-se que o decaimento inicial visto na medida do substrato de InP coincide com uma região com um pico em 10% na refletância medida do sistema AR depositado. Este pico se estende até 1400 nm e a partir desse comprimento de onda o valor da refletância do sistema AR medido se estabiliza em 2,5%, demonstrando um comportamento similar à refletância medida do substrato de InP. Outras hipóteses para esta diferença no caso do sistema AR

são: diferença nos índices de refração reais dos dielétricos medidos em comparação com os presentes no banco de dados do *software*, ou divergência entre as espessuras depositadas e as espessuras nominais usadas na simulação.

Apesar dos comparativos entre a refletância experimental e a teórica usando o *software* serem próximas na região do espectro de interesse, é possível buscar uma nova modelagem. Assim, visando aprimorar a modelagem empregada para aproximar melhor a reflexão teórica da reflexão experimental, foi realizada uma simulação semi-empírica da reflexão. O elemento empírico da modelagem é obter experimentalmente o índice de refração dos dielétricos envolvidos. É possível obter o índice de refração por comprimento de onda das camadas dielétricas através da medida de elipsometria. Com esses valores dos índices de refração obtidos experimentalmente na faixa de comprimentos de onda de 400 nm a 900 nm, e usando as equações de Sellmeier para estender os valores até os comprimentos de onda de 900 nm até 1700 nm, foi feita uma nova modelagem para a refletância sobre InP e o resultado pode ser visto na Figura 5.9.

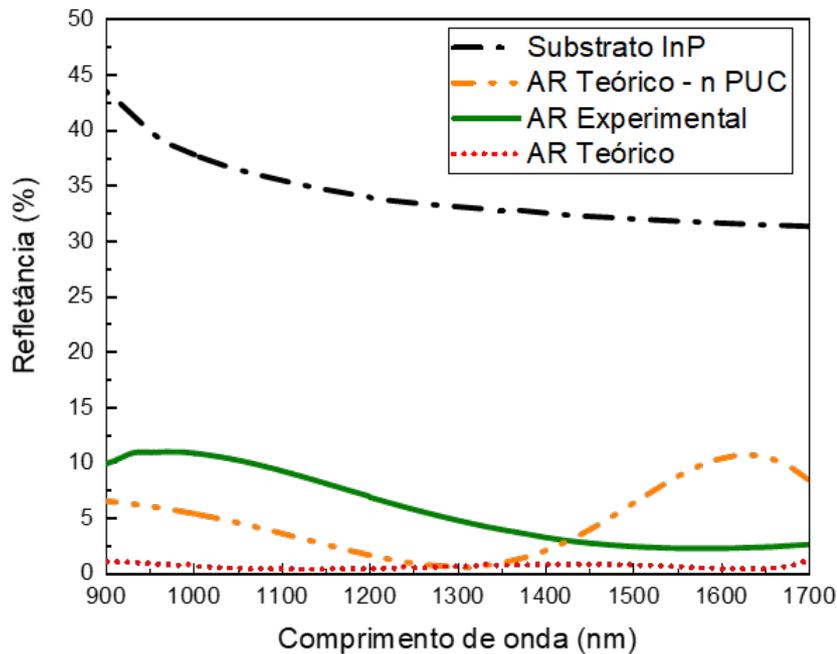


Figura 5.9: Espectros de refletância produzidos anteriormente em comparação com o espectro ajustado pelos parâmetros obtidos por elipsometria. Em preto, traçado e pontilhado temos o espectro de refletância experimental do substrato de InP, em linha sólida e verde temos o espectro experimental do revestimento proposto, em laranja, tracejado, pontilhado e pontilhado temos o espectro de refletância teórico usando os parâmetros medidos por elipsometria e em vermelho pontilhado temos o espectro de refletância do primeiro projeto teórico.

Na Figura 5.9 estão representadas as refletâncias teóricas do sistema AR usando a modelagem do *software* e a nova modelagem proposta. Também estão representadas as medidas de refletância do substrato de InP com e sem o sistema AR. Conforme pode ser visto, ainda há diferenças entre simulação e experimento. Porém, o novo projeto teórico em comparação com o resultado experimental apresenta maior proximidade no comportamento das curvas entre 900 e 1300 nm. Entre 1300 e 1700 nm este novo projeto teórico diverge do resultado experimental mais do que a modelagem teórica anterior. Diante dos resultados divergentes, alguns testes variando índices de refração e espessuras dos materiais (TiO_2 , SiO_2 e InP) foram realizados, com valores baseados em artigos acadêmicos. Foi percebido que a variação no índice de refração do TiO_2 baseado em (ZHOU et al., 2006) apresentou um melhor ajuste teórico e o resultado pode ser visto na Figura 5.10.

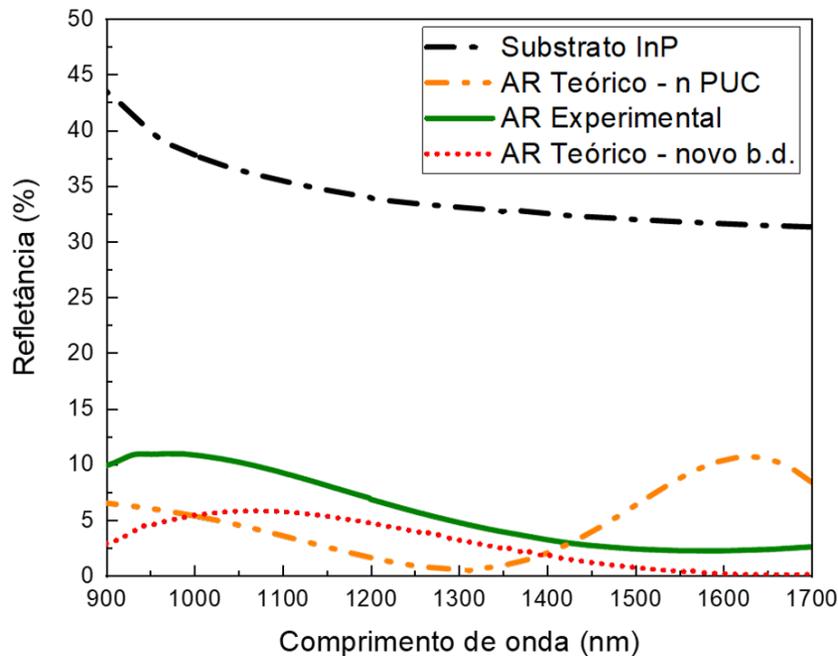


Figura 5.10: Espectros de refletância produzidos anteriormente em comparação com o espectro ajustado por um novo banco de dados. Em preto, traçado e pontilhado temos o espectro de refletância experimental do substrato de InP, em linha sólida e verde temos o espectro experimental do revestimento proposto, em laranja, tracejado, pontilhado e pontilhado temos o espectro de refletância simulado usando os parâmetros medidos por elipsometria na PUC-Rio e em vermelho pontilhado temos o espectro de refletância simulado usando os parâmetros de um novo banco de dados.

Podemos observar que o formato da curva de refletância com uso dos novos parâmetros do TiO_2 consegue se aproximar melhor do formato da

curva de refletância do revestimento experimental. Esse resultado mostra que estender os parâmetros obtidos por elipsometria pode não ser uma boa escolha para trabalhar em comprimentos de onda fora da faixa medida. Para corrigir as divergências dos modelos simulados em relação ao projeto experimental, novas amostras de dielétricos serão produzidas para averiguar os parâmetros obtidos por elipsometria e calibrar de forma mais assertiva os projetos teóricos.

5.3

Revestimento AR no dispositivo estudado

Com base na relevante redução na refletância da superfície do InP apresentada na seção anterior, foi feita a deposição do revestimento AR proposto sobre o dispositivo apresentado nessa tese. As deposições desta etapa foram realizadas no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), usando um sistema de pulverização catódica modelo ATC 2200-V da empresa Aja International. O processo de deposição foi conduzido a uma pressão de câmara de 5 mTorr e com uma vazão de argônio de 50 sccm. A amostra não foi aquecida durante o processo. Os alvos de SiO_2 e TiO_2 foram alimentados usando fontes RF ajustadas em 100 W, atingindo uma taxa de deposição de 0,44 Å/s e 0,37 Å/s, respectivamente. Conforme mencionado, a princípio o revestimento AR foi adicionado sobre o topo da estrutura do dispositivo, conforme Figura 5.11. Também na Figura 5.11 estão apresentadas ambas as modificações propostas nessa tese, a introdução do quaternário InGaAsP e o revestimento AR.

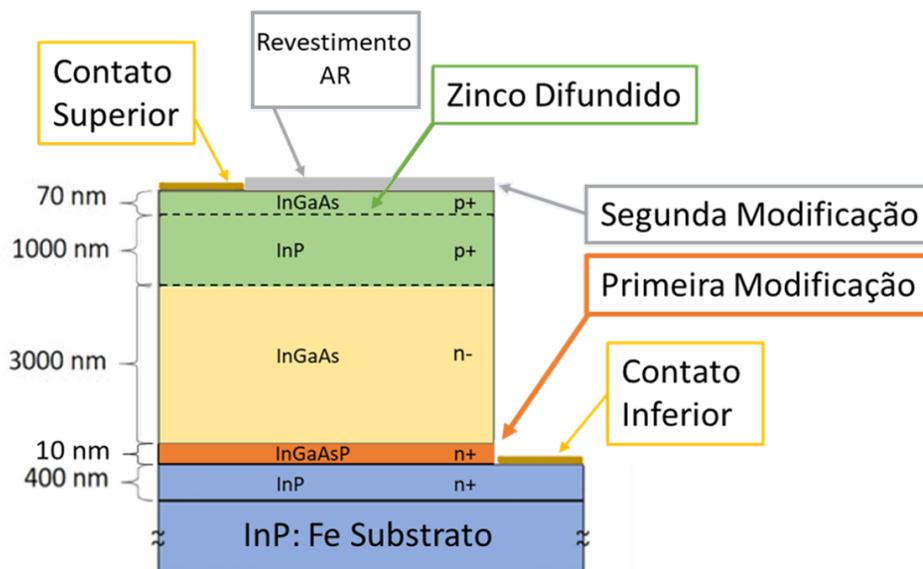


Figura 5.11: Estrutura tipo mesa do fotodiodo de InGaAs, otimizada com a inclusão do quaternário InGaAsP e do revestimento AR.

Como podemos observar na Figura 5.12, as reduções teóricas conseguem apresentar um bom resultado, em torno de $28,9 \pm 5\%$. Também conforme a Figura 5.12, o resultado experimental do revestimento obteve $29,7 \pm 4,6\%$ de redução na refletância, em torno do mesmo valor de redução apresentado pelo modelo teórico. A refletância experimental reduziu de $43,2 \pm 3,7\%$ para $13,5 \pm 2,8\%$, representando uma redução total de 70% na refletância. As oscilações observadas são devidas à interferência, dado que as espessuras das camadas semicondutoras são comparáveis à faixa de comprimento de onda incidente. A diferença na periodicidade das oscilações das curvas de reflectância experimental e teóricas mostra que as espessuras nominais dos semicondutores não foram exatamente atingidas.

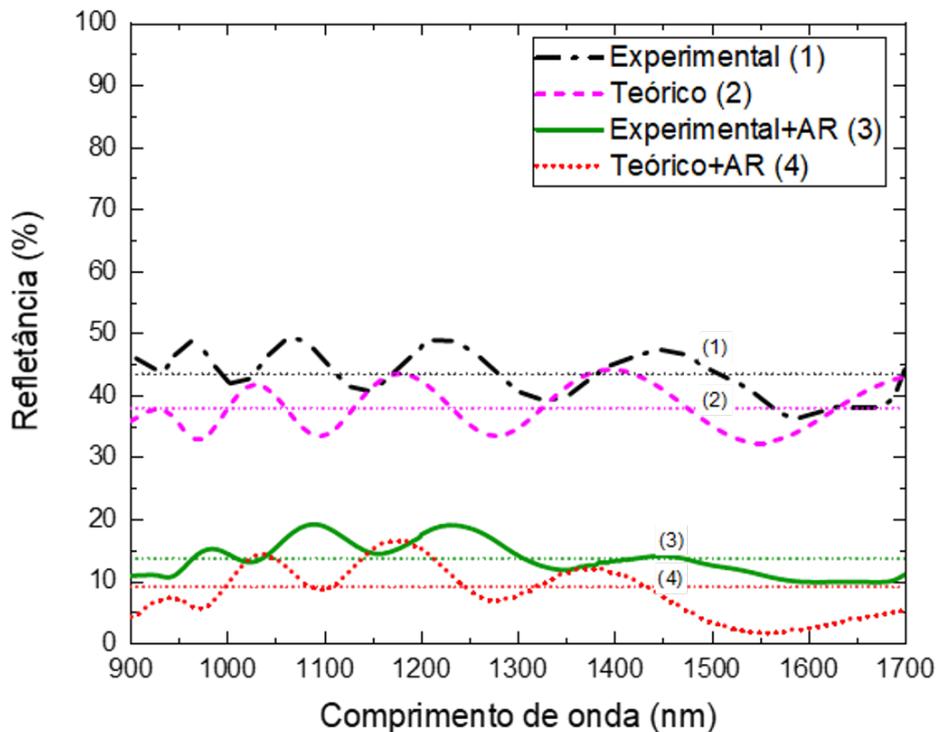


Figura 5.12: Espectros de refletância teórico e experimental do dispositivo final. Em preto tracejado e pontilhado (1) temos o dispositivo DC e em verde contínuo (3) o dispositivo DC + AR. Em rosa tracejado curto temos a curva teórica (2) do dispositivo DC e em vermelho pontilhado (4) do dispositivo DC + AR.

Conforme esperado, a deposição do revestimento AR não alterou os valores ou formato da curva de corrente de escuro, conforme Figura 5.13. Como a corrente de escuro é relacionada a fatores intrínsecos do material e do processamento, a deposição do revestimento AR não tem por finalidade passar o dispositivo, de modo a reduzir as correntes de fuga. A pequena

variação nas curvas de corrente de escuro entre os dispositivos sem e com AR podem ser consideradas no erro da medida.

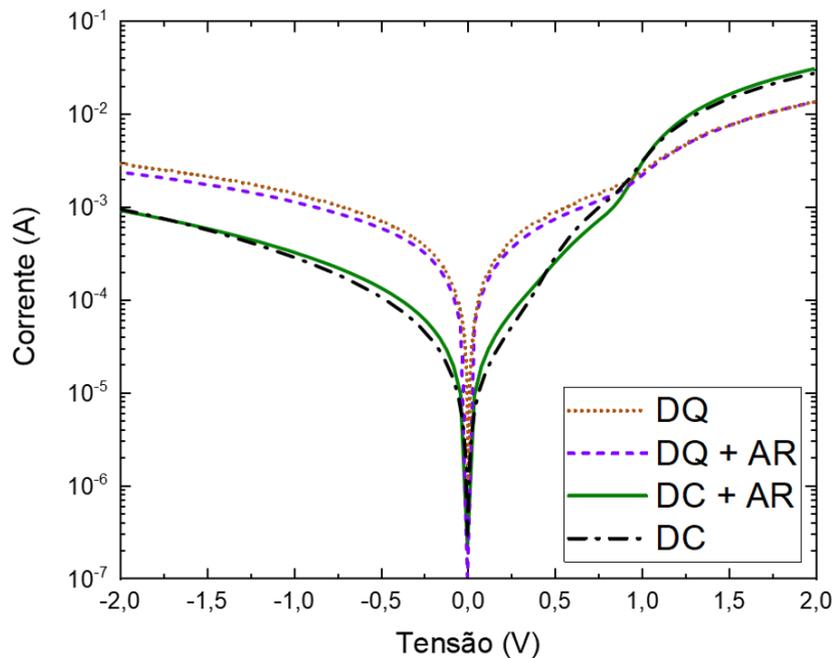


Figura 5.13: Curvas de corrente de escuro dos dispositivos. Em marrom pontilhado temos a curva do dispositivo com quaternário InGaAsP (DQ) e em roxo tracejado curto temos a curva do dispositivo com quaternário InGaAsP com revestimento AR (DQ+AR). Em verde contínuo temos a curva do dispositivo convencional com revestimento AR (DC+AR) e em preto tracejado e pontilhado temos a curva do dispositivo convencional (DC). As curvas das correntes de escuro foram obtidas em temperatura ambiente (300 K).

5.4 Fotocorrente

Na Figura 5.14 estão apresentadas as medidas de espectro de fotocorrente para os fotodiodos DC e DQ com e sem o revestimento AR. Comparando os espectros de fotocorrente medidos nas mesmas condições experimentais, podemos perceber que há um aumento consistente de intensidade da fotocorrente entre as amostras com e sem o AR, tanto no caso do fotodiodo DC quanto DQ. Este é um aumento esperado, pois sem o revestimento AR, e conforme a Figura 5.14, 43% dos fótons incidentes nos dispositivos são perdidos por refletância. Comparando os dispositivos DC após a deposição do revestimento AR, tivemos um aumento integral médio de 25% na intensidade do espectro de fotocorrente. O ganho na transmissão dos fótons para os fotodiodos promovido pelo AR foi de 30%, mas as perdas de eficiência referentes às absorções internas acabam

por reduzir o ganho na fotocorrente. Na amostra DQ com AR, o aumento na intensidade também foi de 25%, se comparado com a fotocorrente do dispositivo DQ sem revestimento. Essa similaridade nos aumentos de intensidade de fotocorrente para dois dispositivos produzidos separadamente demonstra o quão homogêneo e reproduzível foi o processo de deposição do revestimento AR. Também é importante observar que como o revestimento AR foi otimizado para a faixa de 900 nm até 1700 nm, acima desses comprimentos de onda não houve aumento na intensidade da fotocorrente entre os fotodiodos com e sem AR.

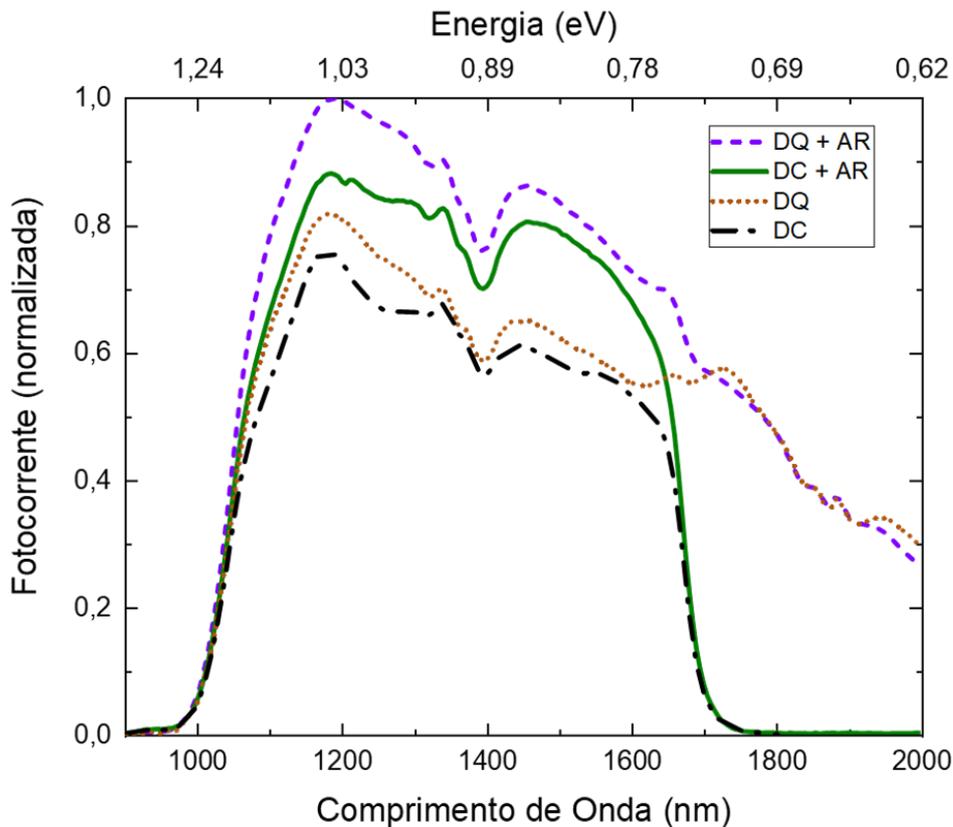


Figura 5.14: Espectros de fotocorrente dos dispositivos. Em roxo tracejado curto temos a curva do dispositivo com quaternário InGaAsP com revestimento AR (DQ+AR) e em verde contínuo temos a curva do dispositivo convencional com revestimento AR (DC+AR). Em marrom pontilhado temos a curva do dispositivo com quaternário InGaAsP (DQ) e em preto tracejado e pontilhado temos a curva do dispositivo convencional (DC). Os espectros de fotocorrente foram obtidos em temperatura ambiente (300 K).

5.5 Responsividade

A responsividade de um fotodetector é uma medida da eficiência do dispositivo em converter a potência óptica incidente em uma resposta elétrica. As medidas de responsividade foram feitas usando um amplificador de corrente da *Stanford Research Systems* modelo SR570, um amplificador *lock-in* da *Stanford Research Systems* modelo SR530, um modulador mecânico *chopper* e um corpo negro a 800 K da marca CI modelo SR-2-23. As medidas de responsividade integral foram feitas com o fotodetector em temperatura ambiente e trabalhando tanto no modo fotovoltaico (sem aplicação de polarização) quanto no modo fotocondutivo (até -500 mV). O comparativo apresentado na Figura 5.15 mostra os valores de responsividade para os fotodetectores DC com e sem AR, e DQ com AR.

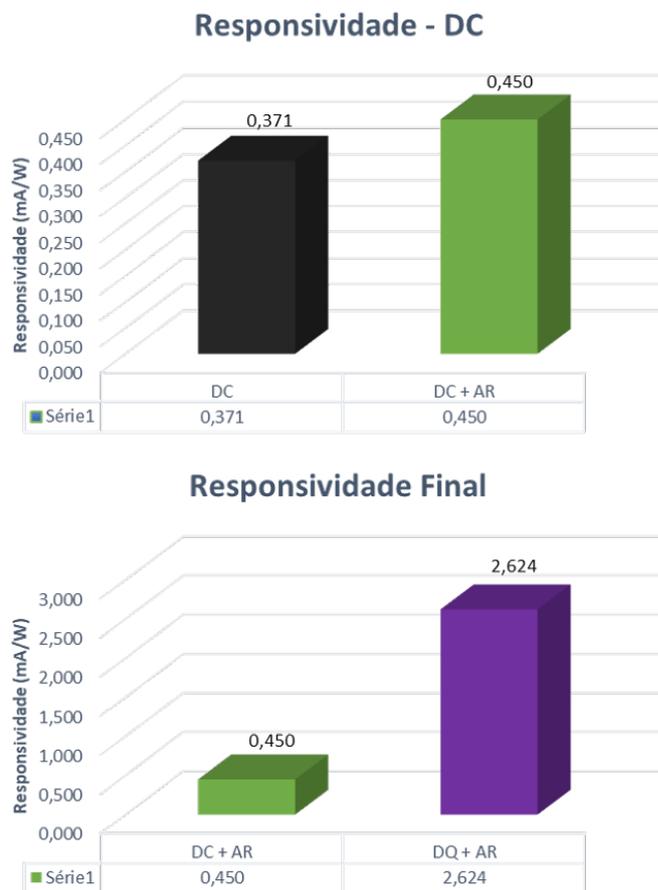


Figura 5.15: Valores de responsividade das amostras obtidos em temperatura ambiente e no modo fotovoltaico. Em preto e verde temos os dispositivos sem adição do quaternário, DC e DC +AR, respectivamente. Em roxo temos o dispositivo com quaternário e revestimento AR. Os valores de responsividade foram obtidos em temperatura ambiente (300 K) e no modo fotovoltaico.

Com o revestimento AR houve um aumento de 21% na responsividade para o detector DC (de 0,371 mA/W para 0,450 mA/W). O dispositivo DQ com AR (2,624 mA/W) apresentou um aumento mais acentuado de aproximadamente 6 vezes o valor da responsividade do dispositivo DC com AR (0,450 mA/W). Provavelmente a maior contribuição para essa diferença na responsividade pode ser atribuída às absorções em comprimentos de onda superiores a 1700 nm, que estão presentes somente no dispositivo DQ, conforme apresentado na Figura 5.14.

No modo fotocondutivo, podemos observar na Figura 5.16 que o aumento da tensão reversa altera suavemente a responsividade do dispositivo DC. A hipótese mais provável para esse resultado seria de que, mesmo com os níveis de polarização reversa aplicados, os portadores ainda continuam armadilhados no dispositivo DC. Logo, a corrente total no dispositivo se mantém estável. Já o dispositivo DQ mostra um ganho substancial em relação ao dispositivo DC. Em -500 mV temos 14,33 mA/W de responsividade para o dispositivo DQ e 1,11 mA/W para o dispositivo DC, essa diferença representa um ganho em torno de 13 vezes para o dispositivo DQ.

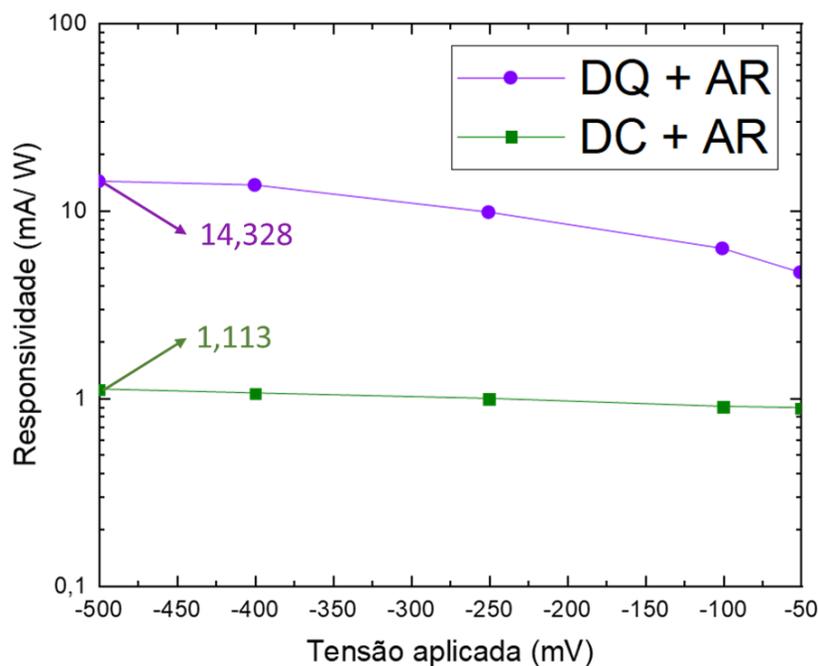


Figura 5.16: Valores de responsividade das amostras obtidos em temperatura ambiente (300 K) e com variação da tensão reversa aplicada (-500 mV até -50 mV). Ambos os dispositivos medidos possuem o revestimento AR, em roxo temos o dispositivo DQ e em verde temos o dispositivo DC. Destaque para os melhores valores obtidos pelos dispositivos.

5.6 Detectividade normalizada

Como mencionado no cap. 2, a detectividade normalizada é a figura de mérito mais importante em fotodetectores. Para calcular a detectividade normalizada, antes é necessário obter os valores de responsividade integral do dispositivo e a corrente de ruído total. A responsividade dos dispositivos foi apresentada na seção anterior. Segundo Kouh et al. (2014) (KOUH et al., 2014), é possível obter a corrente de ruído a partir dos valores de X e Y do amplificador *lock-in* no modo de ruído X-Y. Os valores de corrente de ruído foram obtidos usando o mesmo *setup* da medida de responsividade, porém sem o uso da fonte de corpo negro, para garantir as mesmas condições de ruído. Devido à sensibilidade da corrente de ruído, foi determinado um tempo de 2 minutos para a estabilização do sinal, após esse tempo, os valores de X e Y foram obtidos. As correntes de ruído média em função da tensão aplicada estão apresentadas na Figura 5.17. É possível perceber que a corrente de ruído de ambos os dispositivos aumenta conforme a tensão reversa aumenta.

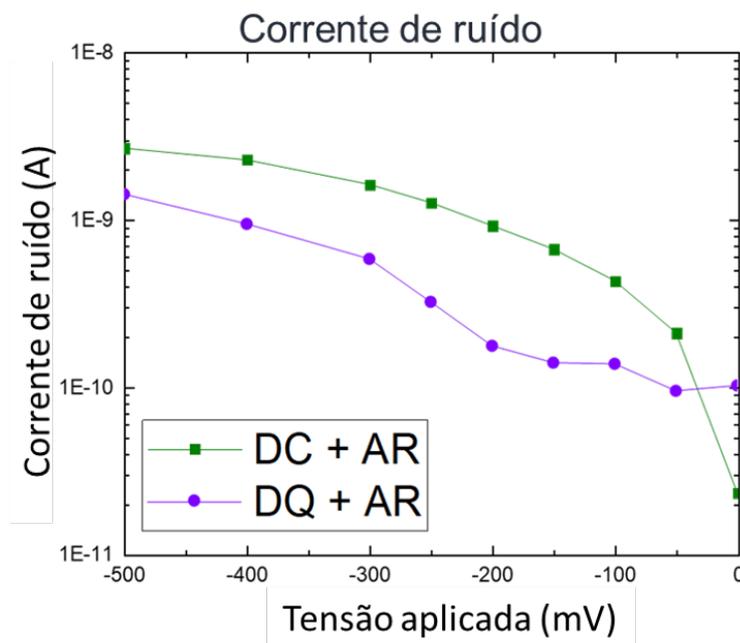


Figura 5.17: Valores da corrente de ruído das amostras obtidos em temperatura ambiente (300 K), em função da tensão aplicada e no modo fotocondutivo. Em verde temos o dispositivo DC e em roxo temos o dispositivo DQ, ambos com revestimento AR.

Este efeito ocorre devido ao aumento da corrente de escuro que parece se acentuar mais no dispositivo DC. Em 0 V o dispositivo DC apresenta

uma corrente de ruído menor do que o dispositivo DQ, porém conforme a polarização reversa aumenta, a corrente de ruído do dispositivo DC aumenta mais do que a corrente de ruído do dispositivo DQ. As correntes de ruído apresentam um comportamento conforme o planejado, mostrando que com a introdução do quaternário e o aumento da polarização reversa, de fato ocorre um desarmadilhamento dos portadores de cargas, que resulta numa redução da corrente de ruído do dispositivo DQ em relação ao dispositivo DC. Esse desarmadilhamento pode ser percebido nas medidas de detectividade normalizada, apresentadas na Figura 5.18.

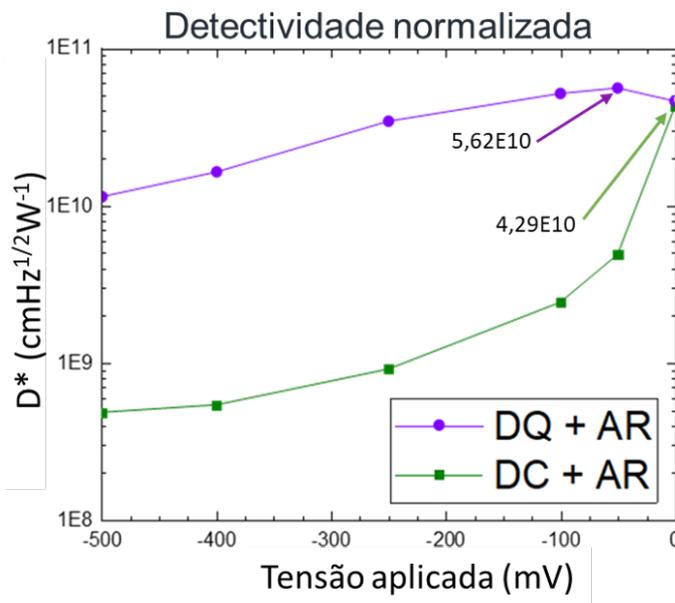


Figura 5.18: Valores de detectividade normalizada das amostras obtidos em temperatura ambiente (300 K), em função da tensão aplicada e no modo fotocondutivo. Em roxo temos o dispositivo com DQ e em verde temos o dispositivo DC, ambos com revestimento AR. Destaque para os melhores valores obtidos pelos dispositivos.

A detectividade normalizada foi calculada conforme a equação 2-11 apresentada no Cap. 2. Conforme a Figura 5.18, os valores obtidos de detectividade no modo fotovoltaico (0 V) são de: $4,29 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ para o dispositivo DC e de $4,64 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ para o dispositivo DQ e estão próximos dos valores encontrados na literatura para fotodetectores de InGaAs/InP no modo fotovoltaico e à 300 K (ZELLER et al., 2015). Como podemos perceber, o dispositivo DC apresentou uma queda acentuada na detectividade, indo de $4,29 \times 10^{10}$ para $4,83 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$. Já o dispositivo DQ em 0 V apresenta valor de detectividade próximo do valor do dispositivo DC, porém, com o aumento da tensão reversa, a detectividade do dispositivo DQ teve uma queda

menos acentuada (de $4,64 \times 10^{10}$ para $1,14 \times 10^{10}$ $\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$). Considerando uma polarização reversa de -500 mV, o dispositivo DQ conseguiu um sinal 24 vezes maior do que o dispositivo DC. Esse resultado consegue enfatizar que à aplicação de tensão reversa penaliza mais a estrutura sem o quaternário do que a estrutura com o mesmo. Uma hipótese é que somente o mecanismo de desarmadilhamento (pensado inicialmente) não conseguiria por si só contribuir para toda essa melhora de desempenho e que existem outros mecanismos que não estão sendo considerados e que estão contribuindo mutuamente. Ainda assim, as melhorias propostas foram suficientemente bem sucedidas na otimização do desempenho geral do dispositivo.

A Tabela 5.1 mostra um resumo de todos os parâmetros obtidos neste trabalho e compara os valores dos dispositivos fabricados nesta tese com dispositivos comerciais. Conforme podemos observar na Tabela 5.1, comparando a tecnologia de fabricação empregada e a principal figura de mérito dos fotodetectores (detectividade), os dispositivos de fabricação própria (DC e DQ) não conseguiram obter resultados superiores aos comerciais. Porém, esse resultado mostra que como reportado na literatura (ROUVIÉ et al., 2012), dispositivos FPA possuem menor corrente de escuro do que estrutura do tipo mesa, o que contribui para um melhor desempenho do dispositivo. Esse resultado evidencia que ainda há otimizações que podem ser realizadas nos dispositivos apresentados nesta tese e que podem contribuir de forma efetiva para melhorar o desempenho dos mesmos.

Tabela 5.1: Comparação entre os fotodetectores fabricados nesta tese e os comerciais para faixa do SWIR.

Parâmetros / Fabricantes	Fabricação Própria		Princeton IR Tech		Sensors Inc.
	Convencional (DC)	Quaternário (DQ)	1280BPCam	PIRT1280A1	1280JSX
Modelo	InGaAs	InGaAs	InGaAs/GaAsSb	InGaAs	InGaAs
Camada ativa					
Tecnologia		Mesa	FPA		FPA
Tamanho do pixel (μm)	13,6E+06	12,9E+06	12	12	12,5
Faixa de operação (μm)	0,9 - 1,7	0,9 - 2,0	0,4 - 2,1	0,4 - 1,7	0,5 - 1,7
Temperatura de operação ¹ ($^{\circ}\text{C}$)		22	-25	0	17
Corrente de escuro ² (A)	1,05E-04	5,82E-04	NI		NI
Responsividade (mA/W)	1,11	14,33	NI		NI
Corrente de ruído (A)	2,33E-11 (0 V)	9,45E-11 (-50 mV)	NI		NI
Detectividade* ($\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$)	4,29E+10	5,62E+10	4,50E+11	1,30E+13	2,90E+13

Nota:

[NI = Não informado]¹ Temperatura da medida de detectividade² Tensão aplicada de -500 mV

6

Considerações finais e projetos futuros

Nesta tese conseguimos calibrar e fabricar um fotodiodo utilizando o processo de difusão uniforme do zinco. Propusemos duas melhorias para otimizar o desempenho dos fotodetectores infravermelhos na faixa de comprimento de onda do SWIR (900 a 1700 nm) convencionais baseados em InP e InGaAs.

A primeira melhoria proposta foi a introdução de uma camada quaternária de InGaAsP entre a camada ativa de InGaAs e a camada $n+$ de InP. Os resultados demonstram que a introdução do quaternário, apesar de aumentar a corrente de escuro, melhora significativamente o desempenho geral do dispositivo. Obtivemos um ganho médio na intensidade da fotocorrente do dispositivo com o InGaAsP da ordem de 10% em relação ao dispositivo sem InGaAsP (entre 900 e 1700 nm).

A segunda melhoria proposta foi a introdução de um novo revestimento AR composto por duas bicamadas de SiO_2 e TiO_2 . O revestimento AR aumentou a transmissão dos fótons incidentes nos fotodiodos em 30% (melhorou a refletância média de 43,2% para 13,5%). Na medida de espectro de fotocorrente, obtivemos um aumento na intensidade em torno de 25% para os dispositivos analisados. Na medida de responsividade, no modo fotovoltaico, tivemos um aumento de 20% com a introdução do revestimento AR para o dispositivo sem quaternário (de 0,371 para 0,450 mA/W). Este resultado demonstrou quantitativamente que o revestimento AR proposto reduziu a refletância superficial do dispositivo e aumentou sua eficiência, conforme as simulações realizadas. Comparando os dispositivos com o revestimento AR, podemos destacar que com a introdução do quaternário, a responsividade aumentou por um fator de seis vezes em relação aos dispositivos com e sem InGaAsP (de 0,450 para 2,624 mA/W). No modo fotocondutivo, a maior diferença observada na responsividade foi em -500 mV, com 1,113 mA/W contra 14,328 mA/W, dispositivo DC +AR e DQ + AR, respectivamente. Já na detectividade, em -500 mV obtivemos uma melhora no desempenho do dispositivo com quaternário, por um fator de vinte e quatro vezes em relação ao dispositivo sem quaternário (de $1,14\text{E}10$ contra $4,83\text{E}8 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$). Esses resultados de responsividade e detectividade mostram que a camada quaternária desempenhou seu papel fundamental de desarmadilhamento de portadores na interface e aumentando a coleta dos mesmos. Os resultados apresentados indicam que ambas as propostas de fato melhoraram o desempenho dos dispositivos convencionais na faixa do SWIR.

Como contribuição científica, foram produzidos 2 artigos completos publicados em anais de congresso (RUA et al., 2023; RUA et al., 2024a), um artigo completo publicado em periódico (RUA et al., 2024b) e um resumo apresentado no *20th Brazilian Workshop on Semiconductor Physics* (BWSP) (RUA et al., 2022).

Nas etapas futuras, é necessário um estudo mais detalhado da camada quaternária de InGaAsP, para entender os mecanismos que beneficiam o dispositivo. Também se torna interessante a fabricação de fotodiodos utilizando a difusão seletiva do Zn com estrutura planar. Estruturas planares apresentam baixa corrente de escuro, fator que pode contribuir para aumentar o desempenho da estrutura final apresentada nessa tese. Dessa forma, podemos abrir caminho para a fabricação em solo nacional de matrizes planares de fotodetectores de alto desempenho na faixa do SWIR.

7

Referências bibliográficas

AZZAM, R. M. A.; BASHARA, N. M. **Ellipsometry and Polarized Light**. [S.l.]: North-Holland, 1988. Citado na página 40.

BAHREYNI, B. **Fabrication and design of resonant microdevices**. [S.l.]: William Andrew, 2008. Citado na página 30.

BOISVERT, J. et al. Performance of very low dark current swir pin arrays. In: SPIE. **Infrared Technology and Applications XXXIV**. [S.l.], 2008. v. 6940, p. 203–210. Citado na página 43.

BRAGA, O. d. M. et al. Investigation of ingaas/inp photodiode surface passivation using epitaxial regrowth of inp via photoluminescence and photocurrent. **Materials Science in Semiconductor Processing**, Elsevier, v. 154, p. 107200, 2023. Citado na página 49.

CAPANO, M. A. **X-ray studies of strained overlayers**. Tese (Tese de Doutorado) — Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

CHEMICAL Detection Using SWIR Cameras. **Princeton Infrared Technologies**, s.d. Acesso em: 7 de Outubro de 2024. Disponível em: <<https://www.princetonirtech.com/applications/chemical-detection-in-swir>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

CHIQUITO, A. J.; JR, F. L. O transistor, 50 anos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 20, n. 4, p. 309–314, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 33.

CHUANG, S. L. **Physics of optoelectronic devices**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 38.

DAVIES, J.; PARROTT, M.; WILLIAMS, J. In-situ monitoring of chemical reactions in mocvd growth of znse. **Journal of Crystal Growth**, Elsevier, v. 79, n. 1-3, p. 363–370, 1986. Citado na página 47.

HALLIWELL, M.; LYONS, M.; HILL, M. The interpretation of x-ray rocking curves from iii–v semiconductor device structures. **Journal of crystal growth**, Elsevier, v. 68, n. 2, p. 523–531, 1984. Citado na página 35.

HASHAGEN, J. **SWIR Applications and Challenges: A Primer**. 2014. Photonics. Acesso em: 7 de Outubro de 2024. Disponível em: <https://www.photonics.com/Articles/SWIR_Applications_and_Challenges_A_Primer/a56646>. Citado na página 17.

HUGON, X. et al. Near-room operating temperature swir ingaas detectors in progress. In: SPIE. **Infrared Technology XXI**. [S.l.], 1995. v. 2552, p. 738–747. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

JOSHI, A. M.; HEINE, F.; FEIFEL, T. Rad-hard ultrafast ingaas photodiodes for space applications. In: SPIE. **Spaceborne Sensors III**. [S.l.], 2006. v. 6220, p. 39–52. Citado na página 24.

KAWABATA, R. M. S. **Produção e caracterização de fotodetectores de infravermelho baseado em poços quânticos com duas geometrias distintas de acoplamento com a luz**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 35, 38 e 39.

KELLY, P. J.; ARNELL, R. D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. **Vacuum**, Elsevier, v. 56, n. 3, p. 159–172, 2000. Citado na página 39.

KOUH, T. et al. Measuring gaussian noise using a lock-in amplifier. **American Journal of Physics**, American Association of Physics Teachers, v. 82, n. 8, p. 778–784, 2014. Citado na página 69.

LI, X. et al. High performance visible-swir flexible photodetector based on large-area ingaas/inp pin structure. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 12, n. 1, p. 7681, 2022. Citado na página 43.

LIANG, W. et al. Research progress of ingaas single-photon avalanche diode arrays detector. In: SPIE. **Fourteenth International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2023)**. [S.l.], 2023. v. 12935, p. 934–943. Citado na página 44.

LOVERGINE, N. Mocvd of ii-vi compounds. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, p. 5690–5697, 2001. Citado na página 33.

OHRING, M. **Materials science of thin films: depositon and structure**. [S.l.]: Academic press, 2002. Citado na página 39.

OTA, Y. Growth of high quality ge mbe film. **Journal of Crystal Growth**, Elsevier, v. 61, n. 3, p. 431–438, 1983. Citado na página 33.

OTA, Y. Silicon molecular beam epitaxy. **Thin Solid Films**, Elsevier, v. 106, n. 1-2, p. 1–136, 1983. Citado na página 33.

PIRES, M. P. **Estruturas de poços quânticos múltiplos de InGaAs/InAlAs para modulação eletro-ótica de amplitude**. Tese (Tese de Doutorado) — Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998. Citado na página 34.

RAZEGUI, M. **The MOCVD challenge: Volume 1: A survey of GalnAsP-InP for photonic and electronic applications**. [S.l.]: Adam Hilger, 1989. Citado na página 33.

REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 21, 23, 25 e 27.

ROUVIÉ, A. et al. Swir ingaas focal plane arrays in france. **Infrared Technology and Applications XXXIX**, v. 8704, p. 12–20, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 49.

ROUVIÉ, A. et al. Ingaas focal plane array developments at iii-v lab. In: SPIE. **Infrared Technology and Applications XXXVIII**. [S.l.], 2012. v. 8353, p. 96–107. Citado 4 vezes nas páginas 17, 24, 43 e 71.

RUA, M. G. **Difusão de Zn em fotodiodos de InGaAs/InP para detecção infravermelha**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 47.

RUA, M. G. et al. Development and optimizing broadband ingaas/inp photodetectors for the swir range. In: **20th Brazilian Workshop on Semiconductor Physics (BWSP), Abstract Book**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 99. Citado na página 73.

RUA, M. G. et al. Anti-reflection coatings for photodetectors to reduce the reflectance in the swir range. In: IEEE. **2023 37th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro)**. [S.l.], 2023. p. 1–3. Citado na página 73.

RUA, M. G. et al. Optimizing broadband ingaas/inp photodetectors for the swir range. In: IEEE. **2024 38th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro)**. [S.l.], 2024. p. 1–3. Citado na página 73.

RUA, M. G. et al. Influência do revestimento antirreflexo e da camada adicional de ingaasp no desempenho de fotodetectores para o swir. **Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação**, Associação Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, n. E72, p. 342–354, 2024. Citado na página 73.

SCHRODER, D. K. **Semiconductor material and device characterization**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. Citado na página 21.

SHORT-WAVE Infrared Imagery (SWIR). **European Space Imaging**, 2018. Acesso em: 7 de Outubro de 2024. Disponível em: <<https://www.euspaceimaging.com/wp-content/uploads/2018/06/EUSI-SWIR.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.

STEBER, G. R. **The Story of the Transistor**. 2019. Nuts and Volts. Acesso em: 7 de Outubro de 2024. Disponível em: <<https://www.nutsvolts.com/magazine/article/the-story-of-the-transistor>>. Citado na página 16.

STREETMAN, B. G.; BANERJEE, S. **Solid state electronic devices**. [S.l.]: Pearson Education Inc., 2006. v. 6. Citado na página 21.

(SWIR) Short Wave Infrared Night Vision Camera Systems for Vehicle Navigation. **Sensors Unlimited**, 2014. Acesso em: 7 de Outubro de 2024. Disponível em: <<https://www.sensorsinc.com/applications/military/night-vision-systems>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.

SZE, S. M.; NG, K. K. **Physics of semiconductor devices**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. Citado na página 21.

TAUZIEDE, L. et al. Evaluation of ingaas array detector suitability to space environment. In: SPIE. **International Conference on Space Optics—ICSO 2012**. [S.l.], 2017. v. 10564, p. 202–211. Citado na página 24.

VINCENT, J. D. **Fundamentals of infrared detector operation and testing**. [S.l.]: Wiley-VCH, 1990. Citado na página 30.

WHAT is Ellipsometry?. **J. A. Woollam**, s.d. Acesso em: 7 de Outubro de 2024. Disponível em: <<https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/what-is-ellipsometry/>>. Citado na página 41.

WHAT is SWIR?. **Edmund Optics**, 2024. Acesso em: 7 de Outubro de 2024. Disponível em: <<https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/what-is-swir/>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

ZELLER, J. W. et al. Development of ge pin photodetectors on 300 mm si wafers for near-infrared sensing. **Int. J. Engr. Res. Tech**, v. 8, n. 1, p. 23–33, 2015. Citado na página 70.

ZHOU, W. et al. Structural and optical properties of titanium oxide thin films deposited on unheated substrate at different total pressures by reactive dc magnetron sputtering with a substrate bias. **Journal of the Korean Physical Society**, The Korean Physical Society, v. 49, n. 9, p. 2168, 2006. Citado na página 62.