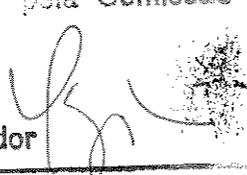


Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica
Departamento de Telemática

Este exemplar é a edição final da tese
defendida por JORGE SALOMÃO PEREIRA
_____ pela Comissão
Julgadora em 04 de 02 de 94.
Orientador 

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO
TECNOLÓGICO, A CARACTERIZAÇÃO E AO ESTUDO
DA CONFIABILIDADE DE FOTODETECTORES PIN EM
 $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$.**

Autor : Jorge Salomão Pereira
Orientador : Prof. Dr Edson Moschim ^{IA}

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas-
FEE-UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção de título de MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

DEZEMBRO-1993.

Resumo :

Neste trabalho apresentamos uma revisão da tecnologia de fabricação das estruturas mesa e planar, para fotodetectores pin. Propomos uma estrutura, mesa coberta, e desenvolvemos um modelo para analisar suas características. Resultados experimentais obtidos da fabricação de vários "wafers" de fotodetectores mostraram boa concordância com os resultados calculados. Analisamos a confiabilidade através de testes de vida acelerado e os resultados encontrados são comparáveis aos melhores da literatura. Apresentamos resultados de aplicação destes fotodetectores em receptores ópticos e dispositivos para interconexão óptica.

Abstract :

This work presents a resume of the photodiode fabrication technology. It describes the covered mesa structure and presents a dynamic and static model to estimate device's performance. Experimental results show good agreement with models. From the accelerated life test we observe that the reliability is comparable to the best published. This document shows the characteristics of optical receiver made with these photodiodes and the characteristics of linear array of covered mesa pin photodiodes .

AGRADECIMENTOS

As pesquisadoras Pei-Jen Shieh e Edna Sato, aos pesquisadores Angelo Luiz Gobbi e Kazuki Jumori, pelo crescimento, processamento e proveitosas discussões, ao Prof N. Patel pelo encorajamento e estimulantes discussões, ao Prof Y. Nanichi da Universidade de Tsukuba pela doação da poliimida, a Maria Aparecida Caetano pelas caracterizações, e ao Hélio Godói pelas montagens .

De forma geral, agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

DEDICAÇÃO

Aos meus queridos pais, a minha esposa, aos meus filhos .

Índice

1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	6
3 ESTRUTURA DO TRABALHO	6
4 REFERÊNCIAS	7
Capítulo 1 FUNCIONAMENTO BÁSICO	9
1.1 RESPONSABILIDADE, EFICIÊNCIA QUÂNTICA E FOTOCORRENTE	9
Capítulo 2 TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO	13
2.1 CRESCIMENTO EPITAXIAL	13
2.1.1 EPITAXIA POR FASE LÍQUIDA	14
2.1.2 PROCEDIMENTOS DE CRESCIMENTO EPITAXIAL POR FASE LÍQUIDA	15
2.1.3 CRESCIMENTO EPITAXIAL POR FASE VAPOR	16
2.1.4 MOVPE- CRESCIMENTO EPITAXIAL POR FASE DE VAPOR DE ORGANO-METÁLICOS.	18
2.1.5 CRESCIMENTO EPITAXIAL POR FEIXE MOLECULAR	20
2.2 PROCESSAMENTO :	22
2.3 REFERÊNCIAS	23
Capítulo 3 ESTRUTURAS PARA FOTODIODOS PIN	27
3.1 FOTODETECTORES PIN NA ESTRUTURA MESA:	27
3.2 FOTODETECTOR PIN NA ESTRUTURA PLANAR:	29
3.3 FOTODETECTOR PIN NA ESTRUTURA MESA COBERTA ..	32
3.4 REFERÊNCIAS	36
Capítulo 4 MODELOS	39
4.1 CARACTERÍSTICA ESTÁTICA	39

4.1.1	CARACTERÍSTICA CORRENTE VERSUS TENSÃO REVERSA	40
4.1.2	CARACTERÍSTICA CAPACITÂNCIA TENSÃO	46
4.2	MODELO DINÂMICO	48
4.2.1	SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CONTINUIDADE	50
4.3	REFERÊNCIAS	58
Capítulo 5	CARACTERIZAÇÕES	61
5.1	CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA OU CONTÍNUA	61
5.1.1	CORRENTE DE ESCURO	61
5.1.2	VARIAÇÃO COM TEMPERATURA	68
5.1.3	CAPACITÂNCIA	69
5.1.4	RESPONSIVIDADE	70
5.2	CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA	73
5.2.1	TÉCNICAS DE MEDIDA	73
5.2.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	75
5.3	REFERÊNCIAS	83
Capítulo 6	CONFIABILIDADE	85
6.1	FUNÇÕES ESTATÍSTICAS	85
6.1.1	FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE	85
6.1.2	FUNÇÃO DE FALHA ACUMULADA	86
6.1.3	FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE	86
6.1.4	TAXA DE FALHA	87
6.2	ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS	87
6.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	88
6.3.1	DISTRIBUIÇÃO DE FALHAS	89
6.4	REFERÊNCIAS	95
Capítulo 7	APLICAÇÕES	97
7.1	RECEPTORES ÓPTICOS	97
7.2	“ARRAYS” LINEARES	100
7.3	REFERÊNCIA	100
Capítulo 8	CONCLUSÕES	103

Figuras

Figura 1.1: Operação de um fotodiodo pin reversamente polarizado.(a) Diagrama esquemático da estrutura do fotodiodo. (b) Diagrama de bandas da junção pin polarizada reversamente. (c) Variação da fotogeração de portadores.	10
Figura 1.2: Variação do coeficiente de absorção para diferentes materiais em função do comprimento de onda.	12
Figura 2.1: Sistema de epitaxia por fase líquida.(a) Sistema básico.(b) Detalhe do bote de crescimento.	14
Figura 2.2: Diagrama básico de um reator de VPE	17
Figura 2.3: Diagrama esquemático de um reator de MOVPE.	19
Figura 2.4: Processo básico de crescimento epitaxial por feixe molecular	20
Figura 2.5: Diagrama esquemático de um reator típico de crescimento epitaxial por feixe molecular.	21
Figura 3.1: Representação esquemática de um fotodetector pin em InGaAs/InP na estrutura mesa proposta na referência 1	28
Figura 3.2: Seqüência de processo do fotodetector pin tipo mesa.	28
Figura 3.3: Representação esquemática do fotodetector pin obtido por Nickel e Kuphal [2].	29
Figura 3.4: Representação esquemática do fotodetector pin planar de acordo com [3].	30
Figura 3.5: Seqüência resumida do processamento do fotodetector na estrutura planar.	30
Figura 3.6: Representação do corte transversal do fotodetector pin enterrado. ..	31
Figura 3.7: Corte esquemático de um fotodetector pin na estrutura mesa coberta.	33
Figura 3.8: Fluxograma das etapas básicas de processamento do fotodetector pin na estrutura mesa coberta.	34
Figura 3.9: Microfotografia de um corte transversal de um fotodetector pin-mesa coberta.	35

Figura 3.10: Corte transversal do fotodetector pin, estrutura mesa coberta, com passivação por poliimida. Dispositivo de simetria circular.	36
Figura 4.1: (a) Fotodetector pin mesa coberta.(b) Análogo elétrico: D_B diodo de homojunção no InP e D_T diodo de homojunção no InGaAs.	40
Figura 4.2: Variação da corrente de escuro com a tensão reversa de polarização. Valores calculados pelo modelo proposto.	46
Figura 4.3: Variação da capacitância com a tensão calculada pela equação 4.14 assumindo-se $N_{dt}=5E15$, $N_{db}=8E15$ $\Phi_1=55\mu\text{m}$ e $\Phi_2=85\mu\text{m}$	48
Figura 4.4: Diagrama de bandas de um fotodiodo pin com junção p-i no InGaAs : fotodiodo de homojunção.	49
Figura 4.5: Variação da velocidade de buracos e elétrons com campo E no InGaAs[6].	50
Figura 4.7: Resposta em frequência calculada pela equação 4.40. Eixo x frequência em escala linear, eixo y, módulo de $i(\omega)/i(0)$, escala linear, unidades arbitrárias.	58
Figura 5.1: Diagrama esquemático da medida de corrente de escuro	62
Figura 5.2: Característica corrente x tensão reversa [0, -20V].	63
Figura 5.3: Característica reversa mostrando a região de ruptura da junção.	63
Figura 5.4: Mapas da corrente de escuro (a) -4V, (b) -15V.	64
Figura 5.5: Característica IxV calculada com base no modelo para a corrente de escuro.	65
Figura 5.6: Corrente de escuro medida a -4V para fotodetectores sem passivação.	66
Figura 5.7: Corrente de escuro para três diâmetros de junção. Fotodetector passivado com polimida.	67
Figura 5.8: Característica IxV para diferentes temperaturas.	69
Figura 5.9: Arranjo experimental para medida da capacitância em função da tensão	69
Figura 5.10: Curva experimental da capacitância versus tensão. Os pontos marcados com foram calculados pela equação 4.18.	70
Figura 5.11: Arranjo experimental para medida de responsividade.	71
Figura 5.12: Variação da responsividade com o comprimento de onda.	73
Figura 5.13: Arranjo experimental para medida da resposta em frequência pelo método do batimento de dois feixes de luz monocromática.	74
Figura 5.14: Fotodetector soldado em suporte cerâmico.	76
Figura 5.15: Conjunto para medida da resposta em frequência.	76

Figura 5.16: Arranjo experimental para medida da resposta em frequência através de fonte óptica com resposta em frequência conhecida.	77
Figura 5.17: Resposta em frequência medida pela técnica da fonte óptica de resposta em frequência conhecida.	78
Figura 5.18: Arranjo experimental para medida da resposta em frequência pela técnica da conversão FM-AM.	79
Figura 5.19: Resultados experimentais de resposta em frequência obtidos pela medida interferométrica.	80
Figura 5.20: Arranjo experimental para medida da resposta em frequência do fotodiodo por batimento da emissão espontânea amplificada.	80
Figura 5.21: Resultados experimentais da medida de resposta em frequência através do batimento da emissão espontânea amplificada.	81
Figura 5.22: Modelo de circuito elétrico para fotodetector pin submontado e acoplado a uma carga de 50Ω.	82
Figura 5.23: Resposta em frequência obtida por simulação no spice. (a) Indutância de montagem de 1nH. (b) Indutância de montagem de 3nH	83
Figura 6.1: Distribuição log-normal da taxa de falha acumulada para os dados da tabela 6.1	90
Figura 6.2: Distribuição log-normal da taxa de falha acumulada para os dados da tabela 6.2	91
Figura 6.3: Gráfico da distribuição log-normal de falhas dos dados da tabela 6.3	93
Figura 6.4: Gráfico de Arrhenius para os dados de teste de vida acelerado.	94
Figura 6.5: Variação da corrente de escuro medida a temperatura ambiente em função do tempo para a amostra testada a 150°C	95
Figura 7.1: Receptor óptico transimpedância para recepção em ELO-34 e ELO-140	98
Figura 7.2: Receptor óptico transimpedância	98
Figura 7.3: Resposta do receptor óptico a uma seqüência de pulsos correspondente a taxa de 2,5Gb/s	100

Tabelas

Tabela 5.1: Valores médios de corrente de escuro a $-4V$, sem passivação.	66
Tabela 5.2: Valores médios de corrente de escuro para fotodetectores passivados.	67
Tabela 5.3: Valores experimentais para cálculo da responsividade em função do comprimento de onda.	72
Tabela 6.1: Distribuição de falhas para a amostra testada a $100^{\circ}C$	89
Tabela 6.2: Distribuição de falhas da amostra testada a $130^{\circ}C$	90
Tabela 6.3: Distribuição de falhas da amostra testada a $150^{\circ}C$	92
Tabela 6.4: Tempos de vida médio para diferentes temperaturas	93
Tabela 7.1: Comparação dos valores de sensibilidade para receptores ópticos . .	99

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos componentes optoeletrônicos tem experimentado uma forte aceleração nos últimos 20 anos. O principal estimulador deste desenvolvimento têm sido os sistemas de telecomunicações. A demanda por novos e mais complexos serviços de telecomunicações impulsiona o desenvolvimento da optoeletrônica e dos sistemas de transmissão que têm como meio de propagação a fibra óptica.

Os sistemas de comunicação óptica que começaram a ser implantados no final da década de 70 exigiram, para a demonstração de sua potencialidade, entre outros componentes, de lasers e fotodetectores de alto desempenho e confiabilidade para a operação na janela de melhores condições de propagação das fibras de sílica existentes àquela época, ou seja, a janela óptica em torno de 850nm.

Com a obtenção de fibras ópticas de sílica de melhor desempenho tornou-se viável a produção de fibras monomodo, cujas características de propagação, atenuação e dispersão, são superiores às fibras multimodo usadas na janela de 850nm.

Sob o ponto de vista de dispersão, 1300nm é a janela espectral de maior interesse, uma vez que a dispersão é mínima nesta região espectral. No entanto sob o ponto de vista de atenuação o valor mínimo ocorre para 1550nm, situando-se na faixa de 0,2dB/km. O aproveitamento efetivo desta região espectral exige o uso de lasers de alta pureza espectral do tipo DFB ou DBR.

Fotodetectores para esta região espectral, 1550nm, devem ser construídos com materiais cuja energia de banda proibida seja menor que a energia do fóton em 1550nm. Ao contrário da janela de 850nm, onde a fotodeteção é feita em Si, cujos fotodetectores são de elevado desempenho, a fotodeteção em baixa energia exige o emprego de ligas semicondutoras ou Ge e o projeto destes dispositivos nem sempre resulta em um componente de elevado desempenho.

Para fotodeteção em 1300nm e 1550nm apresentam absorção adequada o Ge e o $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$.

Receptores ópticos com fotodetectores pin em $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ seguidos por FETs de GaAs têm demonstrado desempenho comparável a receptores ópticos que usam fotodetectores de avalanche em Ge [1]. O emprego de fotodetectores pin torna os receptores ópticos mais simples: não há necessidade de uma fonte de tensão elevada para a sua polarização, a variação da sensibilidade com a temperatura se deve exclusivamente ao aumento da corrente de difusão térmica, se contrapondo aos fotodetectores de avalanche onde o ganho varia com a temperatura.

Fotodetectores pin em $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ têm se mostrado dispositivos de elevada resposta em frequência [2] e alta confiabilidade.

Desta forma os fotodetectores pin em $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ se mostram como dispositivos muito promissores para aplicações como conversores opto-elétricos em sistemas de comunicação óptica de elevadas taxas de transmissão.

Aplicações de interconexão óptica a taxas de Gb/s foram demonstradas empregando-se múltiplos fotodetectores pin integrados monoliticamente [3].

O crescimento epitaxial de $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ sobre Si abre uma vasta possibilidade para integração monolítica de receptores ópticos [4], onde seria possível reunir os circuitos eletrônicos feitos em Si com os fotodetectores feitos em $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$.

Todos estes pontos levantados tornam os fotodiodos pin em $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ dispositivos de grande importância, vindo seu estudo a contribuir para o desenvolvimento das comunicações ópticas e de outras aplicações, por exemplo interconexão óptica.

2 OBJETIVOS

Neste trabalho apresentaremos uma estrutura de fotodetector pin em InGaAs/InP cujo processo de fabricação é potencialmente de baixo custo. Apresentaremos modelos estáticos e dinâmicos para o funcionamento do fotodetector pin, resultados de estudos de confiabilidade e aplicações.

3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

O capítulo 1 aborda o funcionamento básico de fotodetectores pin bem como seus parâmetros eletro-ópticos fundamentais.

No capítulo 2 é feita uma revisão resumida das técnicas de crescimento epitaxial empregadas no crescimento de camadas epitaxiais de InP e suas ligas bem como um resumo das etapas básicas de processamento necessárias a implementação de fotodetectores.

O capítulo 3 apresenta as estruturas usadas na fabricação de fotodetectores pin e a estrutura mesa coberta que é a contribuição deste trabalho.

No capítulo 4 são apresentados os modelos estático e dinâmico do fotodetector pin na estrutura mesa coberta.

O capítulo 5 apresenta os resultados experimentais de caracterizações .

O capítulo 6 apresenta os resultados dos ensaios de envelhecimento acelerado por temperatura.

No capítulo 7 são mostrados os resultados alcançados de aplicação destes fotodetectores em receptores ópticos e dispositivos para interconexão óptica e no capítulo 8 são apresentadas as conclusões obtidas deste trabalho.

4 REFERÊNCIAS

- 1.T.P. Lee, C.A.Burrus e A.G. Dentai, "InGaAs/InP pin photodiodes for lightwave communications at 0.95 μ m-1.65 μ m wavelength", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol QE-27,n 2, 1981.
- 2.D.Wake, T.P. Sponner, S.D. Perrin e I.D. Henning, "50GHz InGaAs edge-coupled pin photodetectors", Electronics Letters, vol 27, n12, 1991.
- 3.Y. Liu, S.R.Forrest, G.L. Tangonan, R.A. Jullens, R.Y. Leo, V.L. Jones, D. Persechini, J.L. Pikulski e M.M. Johnson , " Very high bandwidth InGaAs pin detector array", IEEE Photonics Technology Letters, vol 3, n10, 1991.
- 4.P.D. Hodson, R.R. Bradley, J.R. Riffat, T.B. Joyce e R.H. Wallis, " GaInAs pin photodiodes grown on silicon substrates for 1.55 μ m detection", Electronics Letters, n20, vol 23, 1987.

Capítulo 1

FUNCIONAMENTO BÁSICO

Fotodetectores pin são formados por duas junções semicondutoras: p-i e i-n, com i sendo o semicondutor não intencionalmente dopado.

O princípio básico de operação dos fotodiodos pin, que vale também para outros fotodiodos, é a conversão de sinais ópticos incidentes em corrente elétrica pelo processo de absorção óptica no semicondutor.

1.1 RESPONSABILIDADE, EFICIÊNCIA QUÂNTICA E FOTOCORRENTE

Vamos considerar a junção p-i-n reversamente polarizada e mostrada nas figuras 1.1 (a,c). Os fótons incidentes são absorvidos pelo semicondutor gerando pares elétron/buraco que são separados pela ação do campo elétrico da região i. Os pares elétron buraco fotogerados nas regiões de cargas neutras, p ou n, são separados por difusão devido a inexistência de campo elétrico nestas regiões.

A responsividade de um fotodiodo é definida pela equação 1.1:

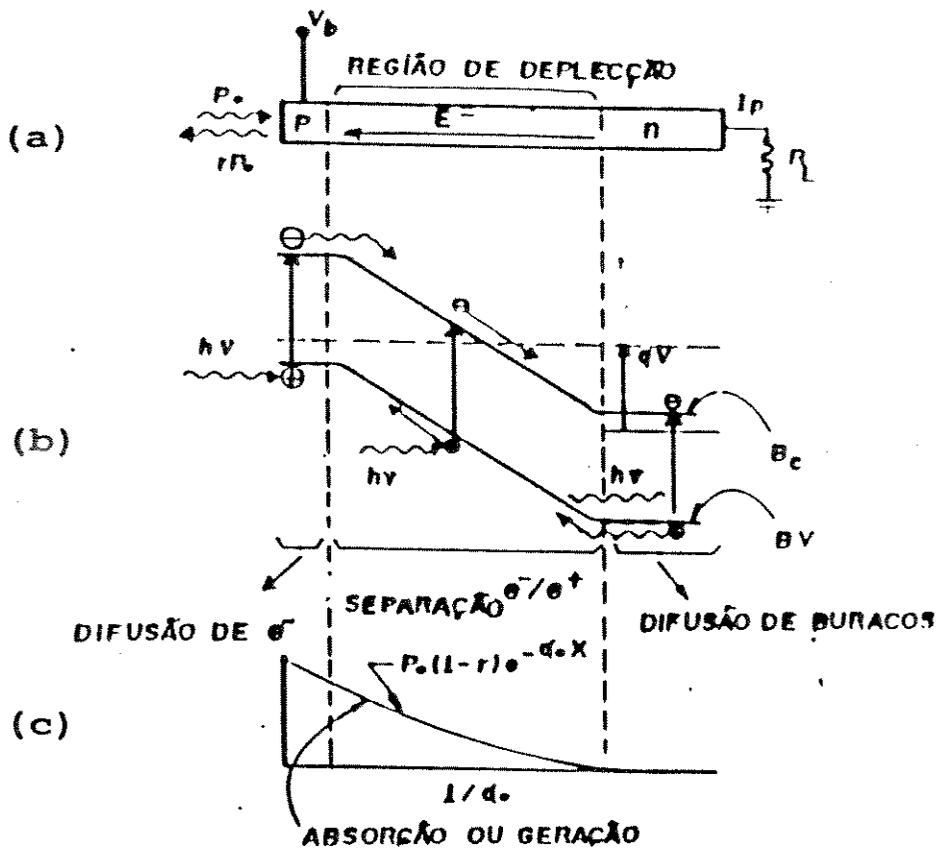


Figura 1.1: Operação de um fotodiodo pin reversamente polarizado. (a) Diagrama esquemático da estrutura do fotodiodo. (b) Diagrama de bandas da junção pin polarizada reversamente. (c) Variação da fotogeração de portadores.

$$R = I_{\text{fot}}/P_{\text{inc}} \quad (1.1)$$

Onde:

I_{fot} = corrente fotogerada,

P_i = Potência óptica incidente.

A eficiência quântica de um fotodiodo é definida como sendo a razão entre o número de portadores fotogerados e o número de fótons incidentes.

$$\eta = \frac{\text{número de portadores fotogerados}}{\text{número de fótons incidentes}}$$

O número de portadores fotogerados por unidade de tempo é:

$$n_{\text{port}} = I_{\text{fot}}/q \quad (1.2)$$

Onde :

q = carga do elétron.

O número de fótons incidentes por unidade de tempo é dado por:

$$n_{\text{fot}} = P_i / (h\nu) \quad (1.3)$$

Onde :

P_i = potência incidente,

h = constante de Planck,

ν = frequência óptica.

Portanto podemos escrever a eficiência como sendo :

$$\eta = (I_{\text{fot}}/q) / (P_i/h\nu) \quad (1.4)$$

então,

$$\eta = (R/q) h c / \lambda \quad (1.5)$$

Por outro lado quando a luz incide em uma superfície semicondutora de refletividade r a potência efetivamente absorvida será:

$$P_{\text{abs}} = (1-r)P_i \quad (1.6)$$

Onde:

P_{abs} = Potência absorvida.

Para um dado coeficiente α , denominado coeficiente de absorção, e para uma dada espessura l da região de absorção a potência óptica absorvida será:

$$P_{\text{abs}}(l) = P_i(1-r)(1-e^{-\alpha l}) \quad (1.7)$$

O termo $(1-e^{-\alpha l})$ expressa a probabilidade de absorção de um fóton por um material semicondutor. O coeficiente de absorção α é característica do material e para um mesmo material varia com o comprimento de onda. Ilustramos através da figura 1.2, a variação do coeficiente de absorção com o comprimento de onda, para diferentes materiais, na faixa espectral de interesse em sistemas de telecomunicação.

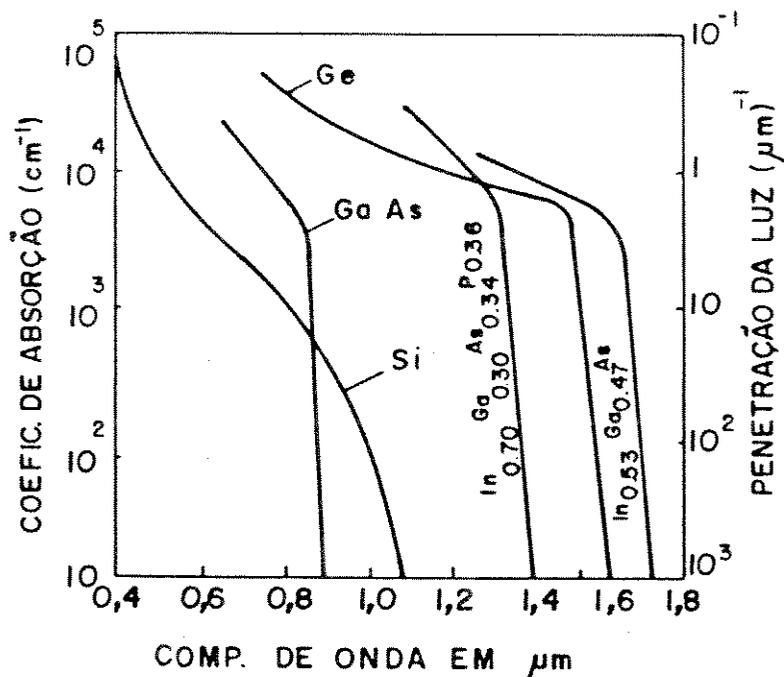


Figura 1.2: Variação do coeficiente de absorção para diferentes materiais em função do comprimento de onda.

Na figura 1.2 observamos que o $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ é um material bastante adequado à fabricação de fotodetectores para operação em 1300nm e 1550nm.

A fotocorrente resultante pode ser calculada a partir das equações (1.4) a (1.6):

$$I_{\text{tot}} = P_i(1-r)(1-e^{-\alpha l})q\lambda/hc \quad (1.8)$$

A partir de (1.7) e (1.1) temos:

$$R = (1-r)(1-e^{-\alpha l})q\lambda/hc \quad (1.9)$$

As equações (1.8) e (1.9) expressam a fotocorrente e a responsividade de um fotodetector pin em função do coeficiente de absorção α e do comprimento de onda λ .

De (1.8) e (1.4) podemos calcular a eficiência quântica do fotodetector pin :

$$\eta = (1-r)(1-e^{-\alpha l}) \quad (1.10)$$

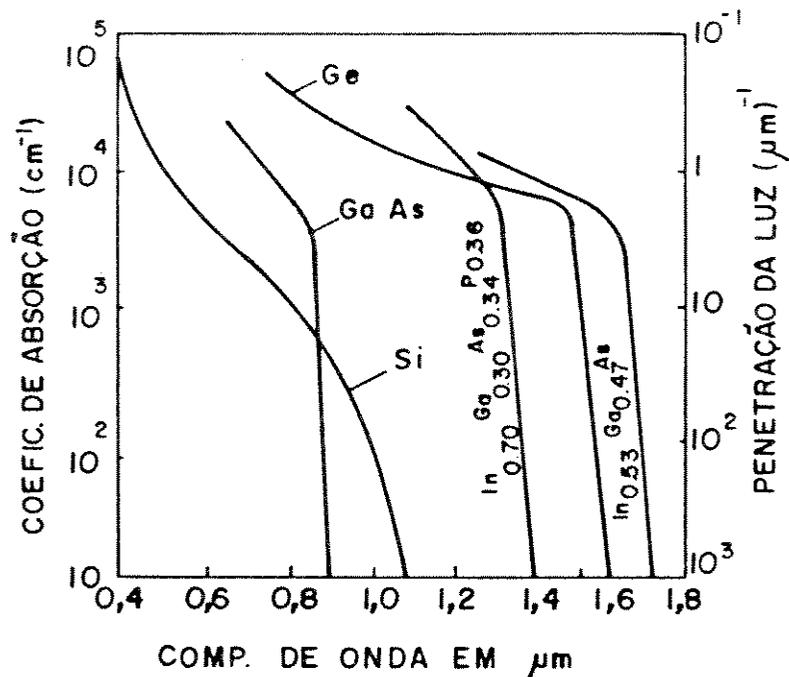


Figura 1.2: Variação do coeficiente de absorção para diferentes materiais em função do comprimento de onda.

Na figura 1.2 observamos que o $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ é um material bastante adequado à fabricação de fotodetectores para operação em 1300nm e 1550nm.

A fotocorrente resultante pode ser calculada a partir das equações (1.4) a (1.6):

$$I_{\text{tot}} = P_i(1-r)(1-e^{-\alpha l})q\lambda/hc \quad (1.8)$$

A partir de (1.7) e (1.1) temos:

$$R = (1-r)(1-e^{-\alpha l})q\lambda/hc \quad (1.9)$$

As equações (1.8) e (1.9) expressam a fotocorrente e a responsividade de um fotodetector pin em função do coeficiente de absorção α e do comprimento de onda λ .

De (1.8) e (1.4) podemos calcular a eficiência quântica do fotodetector pin :

$$\eta = (1-r)(1-e^{-\alpha l}) \quad (1.10)$$

Capítulo 2

TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO

Semicondutores compostos não são encontrados na natureza, ao contrário do Si e Ge, materiais de largo emprego na indústria microeletrônica. Os semicondutores compostos, como por exemplo o InGaAs são obtidos por técnicas de crescimento específicas.

Neste capítulo serão apresentadas as principais técnicas de crescimento epitaxial de InGaAs sobre InP bem como uma descrição das etapas básicas de processo de microeletrônica envolvidas na fabricação de fotodetectores.

2.1 CRESCIMENTO EPITAXIAL

As técnicas de crescimento epitaxial de camadas de semicondutores compostos a base de InP e suas ligas, o $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ é um caso particular, são:

- Crescimento epitaxial por fase líquida (LPE),
- Crescimento epitaxial por fase de vapor (VPE) e,
- Crescimento epitaxial por feixe molecular (MBE).

No crescimento epitaxial por fase líquida uma solução saturada dos elementos que compõe a liga semicondutora que se deseja crescer é resfriada enquanto entra em contato com o substrato.

No crescimento epitaxial por fase de vapor a camada epitaxial é crescida pelo resultado da reação dos elementos gasosos na superfície de um substrato aquecido. Uma variante desta técnica, e de extenso emprego no crescimento de semicondutores compostos para optoeletrônica, é o MOCVD (deposição através de vapores químicos de organo metálicos)

No MBE a camada é crescida pela reação de feixes moleculares e atômicos dos elementos constituintes com o substrato mantido a elevada temperatura em ambiente de alto vácuo.

2.1.1 EPITAXIA POR FASE LÍQUIDA

O sistema de crescimento epitaxial por fase líquida, de largo emprego na produção de componentes optoeletrônicos, está ilustrado nas figuras 2.1 (a,b)[1].

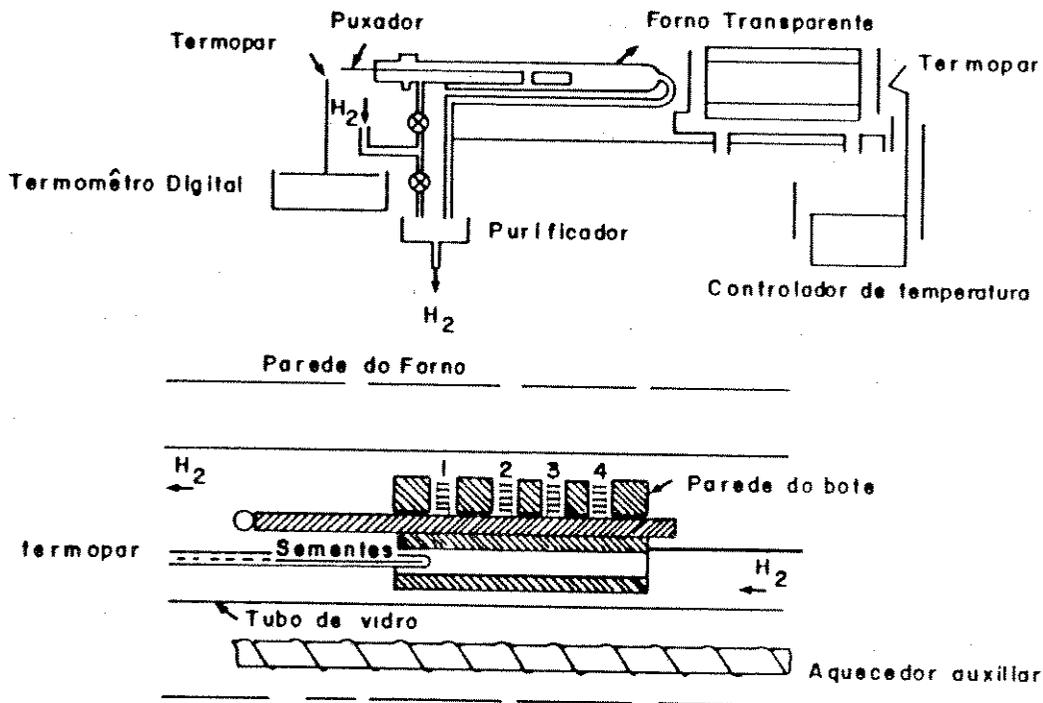


Figura 2.1: Sistema de epitaxia por fase líquida. (a) Sistema básico. (b) Detalhe do bote de crescimento.

Este sistema é composto por um cilindro de quartzo, bote de grafite de múltiplas cavidades, em geral cinco, por um sistema de aquecimento (forno e controladores de temperatura), linhas de gases em aço inox e conexões do tipo ultratorr. O bote de grafite tem as cavidades que contém a solução saturada correspondente a camada epitaxial a ser crescida. O substrato é colocado em uma régua deslizante com uma pequena cavidade que o prende tornando possível a sua colocação sob cada uma das soluções. Esta régua é acionada pelo operador de maneira que possa ser posicionada sob as diferentes cavidades que contém as diferentes soluções. Durante toda a operação de crescimento o interior do reator, isto é o ambiente de crescimento, é submetido a uma atmosfera de H_2 .

2.1.2 PROCEDIMENTOS DE CRESCIMENTO EPITAXIAL POR FASE LÍQUIDA

Vários procedimentos têm sido usados para crescer InP e suas ligas por epitaxia de fase líquida. Faremos abaixo uma apresentação resumida destes procedimentos. A referência [2] apresenta detalhes que não serão abordados neste texto.

Resfriamento em degrau (step-cooling): Procedimento para crescimento em fase líquida onde tanto o substrato quanto as soluções de crescimento são resfriados de um degrau ΔT abaixo da temperatura de saturação da solução, antes que o substrato entre em contato com a solução. Depois do degrau de resfriamento a temperatura é estabilizada na temperatura de crescimento e o substrato posicionado sob a solução. Durante o crescimento a temperatura é mantida constante.

Resfriamento em equilíbrio (equilibrium cooling): Neste procedimento de crescimento epitaxial o substrato desloca-se sob a solução de crescimento quando ambos estão na temperatura de saturação da solução. Substrato e solução são resfriados a uma taxa uniforme até que o crescimento esteja concluído.

Super resfriamento (super cooling): Este procedimento é semelhante a técnica de resfriamento em equilíbrio, exceto pelo fato de antes do substrato ser colocado em contato com a solução de crescimento a temperatura é diminuída abaixo da temperatura de saturação por um valor ΔT . Depois do contato do substrato com a solução o conjunto é resfriado uniformemente como no resfriamento em equilíbrio. O valor de ΔT usado neste procedimento é em geral menor que o empregado no resfriamento por degrau.

Crescimento por solução em duas fases (two phase solution): Este procedimento de crescimento usa o mesmo princípio que o crescimento por resfriamento em equilíbrio, diferindo pela presença na solução de um pedaço sólido de InP ou GaAs que é colocado no topo e em equilíbrio com a solução simultaneamente ao início do crescimento. Esta fonte sólida de saturação assegura que sempre haverá duas fases (sólida e líquida) na solução. Este procedimento tem demonstrado ser eficiente no crescimento de camadas finas por LPE.

As técnicas de crescimento epitaxial mencionadas acima foram desenvolvidas para crescimento de InGaAsP, que inclui InGaAs, sobre substratos de InP com orientação $\langle 100 \rangle$. A referência [3] apresenta as propriedades dos materiais crescidos pelos procedimentos resumidamente mencionados acima. Estas propriedades consistem na avaliação da morfologia, do valor da energia de banda proibida, espessura e uniformidade e do descasamento entre a constante de rede do InP e o InGaAs.

Estruturas de fotodetectores pin necessitam para o seu correto funcionamento de camadas de absorção de aproximadamente $3\mu\text{m}$ de espessura e é fundamental que estas camadas tenham composição constante. M. Feng e colaboradores [3] mostram que camadas epitaxiais de $3\mu\text{m}$ de espessura só podem ser crescidas pela técnica de resfriamento em degrau. As demais técnicas mencionadas apresentam um gradiente na composição da liga semicondutora na direção da espessura.

O descasamento entre a constante de rede da camada epitaxial de InGaAs e o substrato ($\Delta a/a$) deve assumir valores tão pequenos quanto possíveis, $<1.10^{-3}$, e negativos no caso de crescimento por LPE. Para a obtenção destes valores o InGaAs é crescido casado ao InP na temperatura de crescimento, resultando em um descasamento na faixa de -6.10^{-4} a -9.10^{-4} a temperatura ambiente.

O descasamento entre a camada crescida e o substrato é medido por difração de raio x e uma referência bastante completa é apresentada por M.M. Tashima e co-autores [4].

Os materiais semicondutores, InGaAs e InP, empregados na fabricação dos fotodetectores analisados neste texto foram crescidos por epitaxia de fase líquida com resfriamento em degrau. Estes materiais apresentam dopagens residuais menores que 8.10^{15}cm^{-3} , tipo n, tanto no InP quanto no InGaAs e mobilidades eletrônicas de $9400\text{ cm}^2/\text{Vs}$ a $11000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ a temperatura ambiente, no InGaAs.

Um estudo completo do desenvolvimento do crescimento epitaxial usado nos fotodetectores pin analisados neste trabalho é apresentado por P.J. Shieh em [5].

2.1.3 CRESCIMENTO EPITAXIAL POR FASE VAPOR

No crescimento epitaxial por fase vapor (VPE-vapor phase epitaxy) os componentes que provêm as fontes para o crescimento das camadas epitaxiais desejadas estão na fase de vapor. Esta técnica de crescimento pode ser implementada por vapores de cloretos ou vapores de hidretos.

No método de crescimento por vapores de cloreto os gases AsCl_3 ou PCl_3 passam sobre o Ga ou In aquecido formando cloreto de Ga ou In. Estes cloretos metálicos reagem com AsH_3 ou PH_3 numa região próxima ao substrato de InP para formar camadas epitaxiais de InGaAs ou InGaAsP sobre InP. O cloreto de gálio ou o cloreto de índio pode ser formado usando como fontes pedaços de Ga ou InP.

No crescimento por vapores de hidretos os cloretos de gálio ou índio são formados passando-se HCl, gasoso, sobre a superfície aquecida de índio ou gálio [6]. Basicamente um reator de VPE pode ser resumido através do diagrama da figura 2.2.

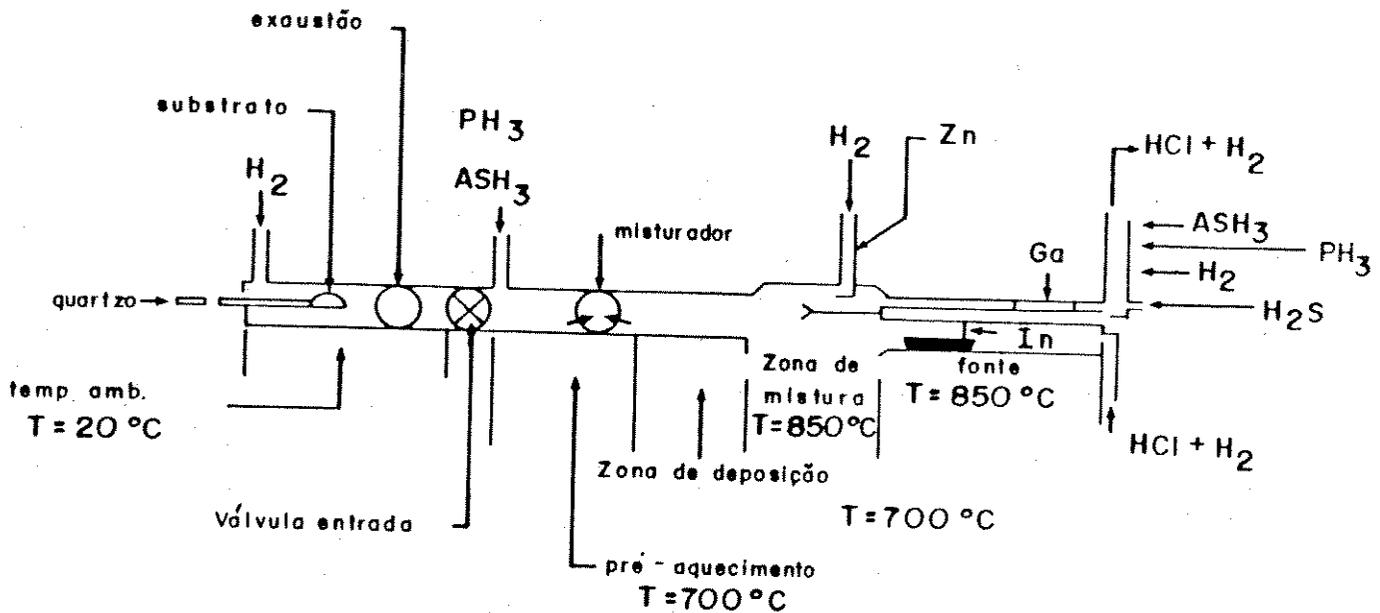


Figura 2.2: Diagrama básico de um reator de VPE

A passagem de HCl sobre a superfície também aquecida do Ga ou In (850°C a 900°C) forma cloreto de gálio ou índio. Arsina e fosfina são misturados aos cloretos metálicos na zona de mistura do reator. O substrato de InP é aquecido a $\approx 700^{\circ}\text{C}$ em atmosfera de AsH_3 e PH_3 para evitar sua decomposição. Na seqüência o substrato é inserido na câmara de crescimento por um período proporcional a espessura da camada que se deseja crescer.

A taxa de crescimento varia de $0,1\mu\text{m}/\text{minuto}$ a $1\mu\text{m}/\text{minuto}$. A composição pode ser ajustada pela variação dos fluxos dos reagentes, no entanto este ajuste exige um tempo de estabilização do fluxo que na prática é uma forte desvantagem ao crescimento de camadas de composição variável.

O crescimento epitaxial por fase vapor (VPE) tem sido empregado com sucesso na fabricação de fotodetectores. Susa e co-autores [7] empregaram VPE de hidretos para crescer InP e InGaAs, demonstraram ser possível a obtenção de interfaces abruptas através de um adequado projeto do reator. No reator usado por Susa e colaboradores [7] o suporte do substrato tem uma cobertura deslizante que permite a interrupção do crescimento durante a estabilização do fluxo.

Olson em [8] mostra que a técnica de crescimento por VPE pode produzir fotodetectores pin em InGaAs/InP de reduzida corrente de escuro e alta confiabilidade. Os fotodetectores construídos em [8], com diâmetros de $100\mu\text{m}$ apresentam correntes de escuro na faixa de 10nA a 30nA ,

medida a $-10V$, e comportamento estável da corrente de escuro durante ensaio acelerado a $60^{\circ}C$ com polarização de $-10V$ por 5000 horas.

Quando comparado ao crescimento epitaxial por fase líquida (LPE), o crescimento por fase vapor (VPE) oferece uma vantagem significativa que é o crescimento de InP sobre InGaAs, fundamental ao bom desempenho da estrutura planar de fotodetectores. Esse crescimento não pode ser realizado diretamente com LPE pois a solução líquida para o crescimento de InP provoca a corrosão da camada de InGaAs.

Uma variante do VPE e que atualmente é das mais importantes técnicas de crescimento epitaxial é o crescimento por fase de vapor de organometálicos, que será apresentada de forma resumida em 2.1.4.

2.1.4 MOVPE- CRESCIMENTO EPITAXIAL POR FASE DE VAPOR DE ORGANO-METÁLICOS.

Esta técnica de crescimento epitaxial também é conhecida por MOCVD (metal organic chemical vapor deposition). No crescimento MOVPE os elementos necessários para o crescimento de um semiconductor composto III-V são fornecidos na fase vapor e a reação de crescimento ocorre sobre um substrato aquecido. Os organo-metálicos são compostos termicamente instáveis [9], ao atravessar o reator a única superfície aquecida que estes compostos encontram é o substrato, fazendo com que a reação de crescimento só ocorra no substrato. As fontes de organometálicos são líquidos voláteis ou sólidos volatizados, transportados por um gás vetor, normalmente H_2 . A figura 2.3 ilustra um reator de crescimento MOVPE [10]. O reator é formado por um tubo de quartzo, por onde fluem os gases que originarão as camadas epitaxiais, um suceptor de grafite aquecido por correntes de Foucault, induzidas a partir de um gerador de RF externo, e tubulações para os gases. A saída do reator é filtrada de modo a minimizar o impacto ambiental dos produtos da reação de crescimento.

Um reator de crescimento MOVPE pode ser dividido em 4 zonas:

- zonas das fontes, a partir da qual são arrastados os compostos do grupo III e os elementos do grupo V,
- zona da mistura, onde são misturados os elementos do grupo III e grupo V, nesta zona ocorrem reações que resultam em compostos intermediários,
- zona de fronteira entre o substrato e a atmosfera que o circunda,
- zona de crescimento.

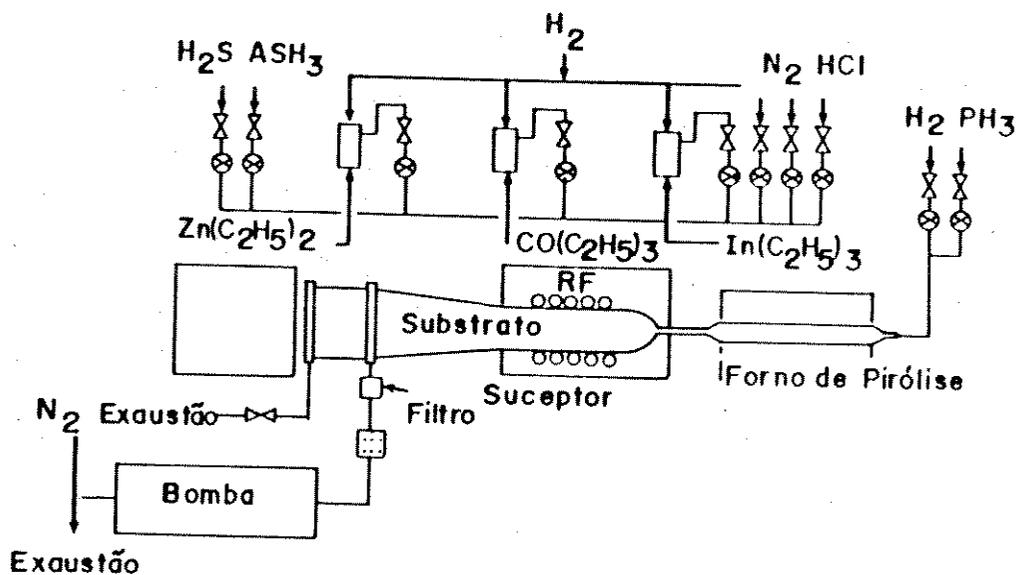


Figura 2.3: Diagrama esquemático de um reator de MOVPE.

A reação que provoca o crescimento é a decomposição dos compostos intermediários, formados na segunda zona, com a superfície do substrato.

$Ga_xIn_{1-x}As$ crescidos por MOVPE têm mostrado excelentes propriedades de material e uniformidade em suas propriedades, por exemplo: composição, dopagem residual etc, em "wafers" de até duas polegadas. O primeiro resultado de fabricação de fotodiodo pin em $InGaAs/InP$ crescido por MOVPE foi apresentado por J.P. André e co-autores [11]. Neste trabalho são apresentadas correntes de escuro de $2nA$ a $-10V$ e capacitância de $1pF$ em fotodiodos com junção de $100\mu m$ de diâmetro. D. Wake e co-autores em [12] apresentam menores correntes de escuro: $200pA$ a $-5V$ e menores capacitâncias, $95fF$. Em [12] os fotodetectores foram crescidos sobre substrato de InP semi-insolante visando aplicação em optoeletrônica integrada. As menores correntes de escuro de fotodetectores pin crescidos por MOVPE foram obtidas por M. Gallant e co-autores [13]. Correntes de $10pA$ medidas a $-10V$ e capacitâncias de $0,45pF$ foram obtidas em [13] para fotodetectores de $100\mu m$ de diâmetro.

2.1.5 CRESCIMENTO EPITAXIAL POR FEIXE MOLECULAR

O crescimento epitaxial por feixe molecular nasceu de estudos da interação de feixes moleculares gerados termicamente com superfícies sólidas em ambiente de ultra-alto-vácuo. O crescimento se dá pela interação de feixes de átomos ou moléculas dos elementos que compõem a camada, a ser crescida, com um substrato cristalino mantido a alta temperatura em ambiente de ultra-alto-vácuo. Estes feixes são obtidos de células de efusão colocados internamente ao reator. A espessura da camada crescida depende da intensidade dos feixes moleculares gerados a partir da célula de efusão. A temperatura das células é controlada com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$ e a intensidade do feixe molecular é controlada pela abertura do obturador da célula e/ou pela temperatura da célula. Como a composição da camada depende das intensidades dos feixes e a intensidade de cada feixe pode ser controlada pelo obturador e/ou pela temperatura, a composição da camada pode ser controlada pela temperatura da célula de efusão e/ou pela abertura do obturador.

O processo de crescimento sobre substrato cristalino envolve as seguintes fases:

- Adsorção dos átomos ou moléculas dos constituintes,
- Migração superficial e dissociação dos átomos ou moléculas adsorvidas,
- Incorporação dos átomos ao substrato resultando em nucleação e crescimento.

O processo básico de crescimento epitaxial por feixe molecular é ilustrado na figura 2.4

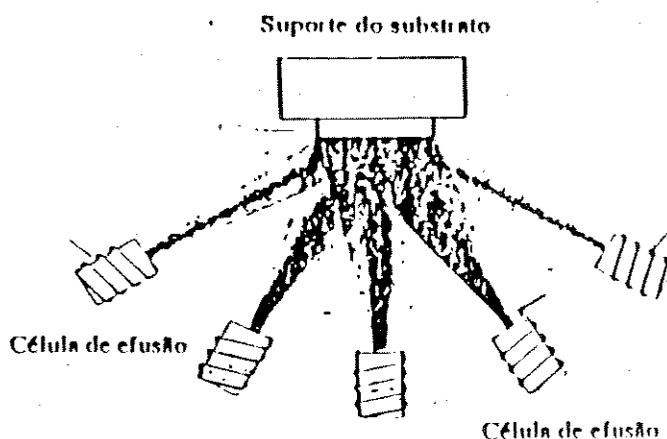


Figura 2.4: Processo básico de crescimento epitaxial por feixe molecular

A partir dos mecanismos mencionados acima, uma fina camada de cristal, de mesma orientação que o substrato, é depositada. Esta técnica de crescimento é governada pela cinética dos feixes

moleculares, ao contrário das técnicas de crescimento por fase vapor e fase líquida, desta forma se tem controle de espessura a nível de camada atômica, da camada crescida. Ilustramos na figura 2.5 um reator típico de crescimento de semicondutores compostos III-V por feixe molecular [14].

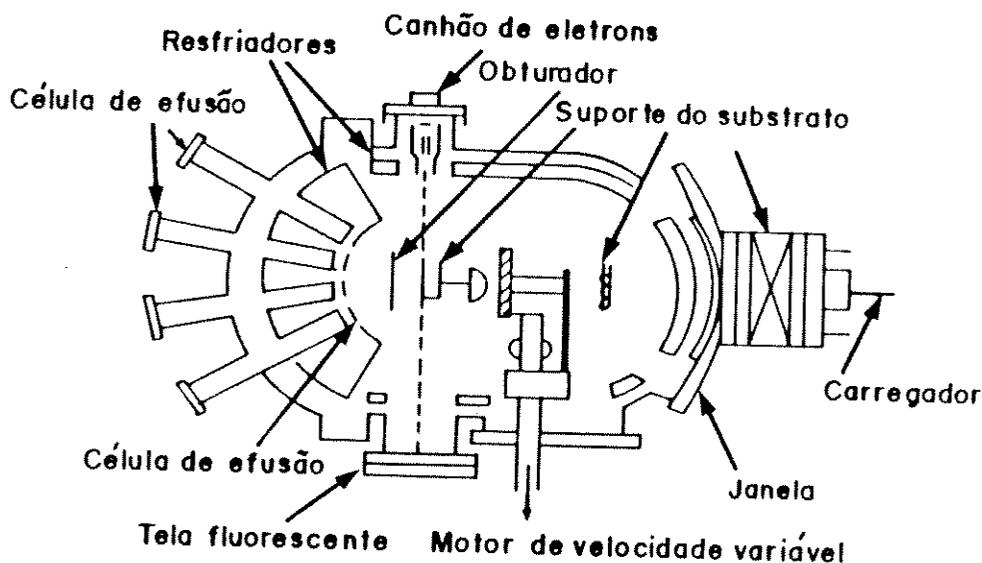


Figura 2.5: Diagrama esquemático de um reator típico de crescimento epitaxial por feixe molecular.

A amostra é carregada através de uma pré-câmara para não quebrar o vácuo do reator. Durante o crescimento o substrato gira de modo a proporcionar uniformidade de composição e espessura na camada. Os elementos do grupo V estão na forma de tetrâmeros, por exemplo As_4 , P_4 , e são dissociados termicamente em dímeros: As_2 , P_2 . Esta dissociação proporciona uma melhoria na qualidade do cristal crescido.

Adicionalmente ao sistema de crescimento em si, os reatores de MBE contêm recursos de análise “in-situ” de material. Destes recursos o mais comum é a monitoração através da difração/reflexão de elétrons de alta energia.

Os primeiros crescimentos de InGaAs sobre InP realizados com MBE foram feitos por Müller e colaboradores [15]. Camadas de $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ de alta pureza, e portanto adequadas à fabricação de fotodetectores foram, inicialmente, obtidas por Lambert e colaboradores [16]. Estas camadas

apresentavam dopagens residuais na faixa de $8.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ a $3.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ tipo n, mobilidades eletrônicas, medidas por efeito Hall, de aproximadamente $46000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ a 77K e $11500 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ à temperatura ambiente.

2.2 PROCESSAMENTO :

Processamento microeletrônico, versão aportuguesada da palavra “processing”, esta associado a uma série de etapas de fabricação destinadas a dar forma ao dispositivo e lhe garantir meios de acesso elétrico ou óptico.

Na fabricação de fotodetectores PIN em $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ as etapas básicas de processamento são:

- FOTOGRAVAÇÃO,
- DIFUSÃO,
- METALIZAÇÃO,
- PASSIVAÇÃO.

Estas etapas não diferem muito das etapas envolvidas na fabricação de outros componentes eletrônicos ou optoeletrônicos, e neste capítulo, as abordaremos de forma ilustrativa. No capítulo referente as estruturas estas etapas de processo serão abordadas de forma específica.

Fotogravação :

A fotogravação é o processo pelo qual se transfere um padrão gravado em uma fotomáscara para o semiconductor, ou para algum filme, dielétrico ou metálico, que exista sobre sua superfície, que recebe a cobertura de uma resina fotossensível. Esta resina, também chamada de fotorresiste, é polimerizada ou despolimerizada quando exposta a luz, podendo adquirir ou perder solubilidade em revelador específico.

Difusão :

Difusão é um processo que ocorre na natureza sempre que houver uma diferença de concentração de solutos. Em microeletrônica a difusão é usada para incorporar impurezas aceitadoras ou doadoras ao semiconductor definindo a natureza das cargas livres de regiões : região p, impurezas aceitadoras, região n impurezas doadoras. Em microeletrônica a difusão é feita a elevadas temperaturas, e em particular na fabricação de lasers e fotodetectores a difusão é feita na faixa de 500°C e o material mais empregado é o Zn, usado como impureza aceitadora. As técnicas mais usadas de difusão de Zn em semicondutores compostos são:

- Difusão em ampola selada,
- Difusão em ampola aberta.

Na difusão em ampola selada o Zn, na forma de $ZnAs_2$ é colocado em uma ampola de quartzo, juntamente com o substrato no qual se quer difundir. É feito vácuo na ampola, a níveis de 10^{-6} torr, quando a ampola é selada e colocada em um forno a temperaturas que variam de $450^\circ C$ a $550^\circ C$.

Na técnica de ampola aberta o Zn, em geral na forma ZnF_2 é incorporado a um filme dielétrico, por exemplo ZnF_2/SiO_2 e levado a um forno a alta temperatura [17].

Metalização :

A metalização, como processo de microeletrônica, é a etapa que definirá os contatos elétricos com o semicondutor em si, ou as linhas de interconexão elétrica quando mais de um componente estiver integrado monoliticamente. Esses filmes metálicos são depositados sobre o semicondutor por diferentes técnicas, sendo a evaporação térmica e o "sputtering" as mais usuais. A evaporação térmica pode ser provida por um filamento aquecido ou por um feixe de elétrons.

Os contatos mais usados em fotodetectores podem ser classificados em dois grupos:

- contatos que formam ligas,
- contatos que não formam ligas.

Os contatos que formam ligas são mais usados sobre InP-n e o mais comum é o AuGe/Ni. Outras alternativas de baixa resistividade são mostradas na literatura [18].

Os contatos que não formam ligas, em geral são usados no InP-p e no InGaAs-p [19,20].

Passivação:

A passivação é a etapa na qual serão protegidas as partes críticas do componente. As partes mais sensíveis são aquelas associadas a junções expostas, no caso de fotodetectores pin é a borda da junção p-i. Idealmente a passivação deve ser neutra ao componente, isto é, não deve modificar seus parâmetros, mas garantir seus valores por um longo tempo de operação.

Em fotodetectores a passivação pode ser feita com filmes dielétricos, por exemplo Si_3N_4 , SiO_2 , Al_2O_3 ou filmes poliméricos, por exemplo poliimida.

2.3 REFERÊNCIAS

1. G.E. Stillman, L.W. Cook, N. Tabatabaie, G. Bulman e V. Robins, " InGaAsP photodiodes", IEEE Transactions on Electron Devices", ED-30, n4, 1983.

2. J.J. Hsieh, "Thickness and surface morphology of InGaAs/InP layers grown by step-cooling, equilibrium-cooling, supercooling and two phase solution techniques", *Journal of Crystal Growth*, vol 27, 1974.
3. M.Feng, L.W. Cook, M.M. Tashima e G.E. Stillman, "Lattice constant, bandgap, thickness and morphology of InGaAs/InP layers grown by step-cooling, equilibrium cooling, supercooling and two phase solution growth technique", *Journal of Electronic Material*, vol 9, 1980.
4. M.M. Tashima, L.W. Cook e G.E. Stillman, "The application of x-ray diffraction measurements in the growth of InGaAsP/InP", *Journal of Crystal Growth*, vol 54, 1981.
5. P.J. Shieh, "Desenvolvimento da técnica de crescimento para fotodetectores", Relatório Técnico interno TELEBRÁS, 1989.
6. G.H. Olsen, "GaInAsP alloy semiconductors", cap1, editado por T.P. Pearsall, John Willey and Sons, 1982.
7. N. Susa, Y. Yamanchi, H. Ando e H. Kanbe, "Te-doped InP and InGaAs prepared by vapor phase epitaxy for photodetectors", *Journal of Crystal Growth*, vol 58, 1982.
8. G.H. Olsen, "Low leakage, high efficiency, reliable VPE InGaAs 1.0-1.7 μ m photodiodes", *IEEE Electron Devices Letters*, vol EDL-2, n9, 1981.
9. G.B. Stringfellow, "Materials growth technology semiconductor and semimetal", vol 22, part A, 1985.
10. J.P. Hirtz, M. Razeghi, M. Bonnet, J.P. Duchemin, cap 3 "GaInAsP alloy semiconductors", editado por T.P. Pearsall, John Willey and Sons, 1982.
11. J.P. André, J.P. Chané, J.L. Gentner, C. Mallet-Monko, B.G. Martin, G.M. Martin, E. Menn e J.N. Patillon, "Low dark-current and low capacitance InGaAs pin photodiodes grown by MOVPE", *Proceedings of IOOC/ECOC 1985*.
12. D. Wake, R.H. Walling, S.K. Sargood e I.D. Henning, "In_{0.53}Ga_{0.47}As pin photodiode grown by MOVPE on semi-insulating InP substrate for monolithic integration", *Electronics Letters*, vol 23, n38, 1987.
13. M. Gallant, N. Puetz, A. Zamel e F.R. Sheperd, "Metalorganic chemical vapor deposition InGaAs pin photodiodes with extremely low dark-current", *Applied Physics Letters*, 52(9), 1988.
14. K.Y. Cheng e A.Y. Cho, *Journal of Applied Physics*, 53, 1982.

- 15 B. I. Miller e J.H.McFee, Journal of Electrochemical Society, vol 125, 1978.
16. M Lambert, D. Bonnerie, D. Huet, Proceedings of 2nd European Workshop on MBE, Brighton, England, 1982.
17. I. Camlibel, A.K. Chin, H. Giggenhein, S. Singh, L.G. van Viter e G.H. Zydisk, "Fabrication of low dark current photodiodes using an open tube method for Zn diffusion in to InP and InGaAs", Journal of Electrochemical Society, 1984.
18. E. Kuphal, "Low resistance ohmic contacts to n and p InP", Solid State Electronics, vol 24, 1981.
19. H. Kraulter, E. Woelk, J. Solders e H. Benekin, "Contacts on GaInAs", IEEE Transaction on Electron Devices, ED-32, n6, 1985.
20. A.D. Huelsman e C.G. Fonstad, "Fabrication and Characterization of non alloyed CrAu ohmic contacts to n and p type $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ", IEEE Transaction on Electron Devices, vol ED-33, n2, 1986.

Capítulo 3

ESTRUTURAS PARA FOTODIODOS PIN .

Neste capítulo serão abordadas as estruturas freqüentemente usadas para implementação de fotodiodos pin . Será apresentada a estrutura mesa coberta com passivação por poliimida e suas etapas de processamento físico- químico.

Basicamente os fotodiodos pin podem ser construídos em duas estruturas:

- Estrutura mesa,
- Estrutura planar.

A estrutura mesa, em geral, requer menos recursos de processamento para ser implementada . Normalmente é tida como de fácil realização. A estrutura planar requer um processamento mais elaborado e é usada na produção comercial de fotodetectores.

3.1 FOTODETECTORES PIN NA ESTRUTURA MESA:

A figura 3.1 traz uma representação esquemática de um fotodetector pin na estrutura mesa. Neste dispositivo a camada de absorção é de InGaAsP ($\lambda = 1,26\mu\text{m}$). Esta estrutura foi pioneira na demonstração de fotodetectores em semicondutores compostos para comprimentos de onda longo, acima de $1\mu\text{m}$ [1].

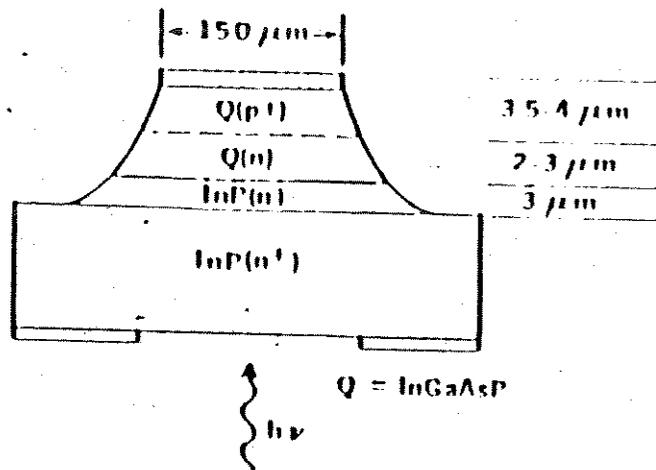


Figura 3.1: Representação esquemática de um fotodetector pin em InGaAs/InP na estrutura mesa proposta na referência 1

A seqüência de fabricação esta representada na figura 3.2 . Inicialmente são crescidas, por epitaxia de fase líquida, uma camada tampão de InP, não intencionalmente dopada, uma camada de InGaAsP, também não dopada e uma camada p⁺ de InGaAsP. As mesas foram feitas com corrosão química via úmida e têm 150μm de diâmetro. Os contatos , p e n, são ligas de Au-Zn e Au-Sn respectivamente. Não há nenhuma passivação sobre a junção.

Nickel e Kuphal [2] introduziram melhorias nesta estrutura:

- O material de absorção passou a ser o $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, permitindo conversão opto-elétrica em 1300nm e 1550nm.
- A camada p foi obtida por difusão de Zn.
- A junção foi passivada com fotorresiste, o que garante mais estabilidade na corrente de escuro em comparação a estrutura originalmente proposta por C.A. Burrus e colaboradores [1].

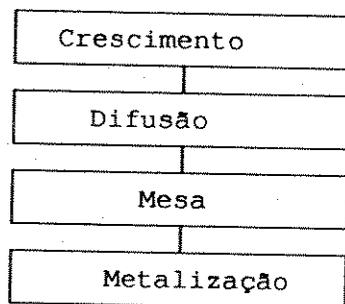


Figura 3.2: Seqüência de processo do fotodetector pin tipo mesa.

Representamos na figura 3.3 a estrutura do fotodetector pin obtida por Nickel e Kuphal [2].

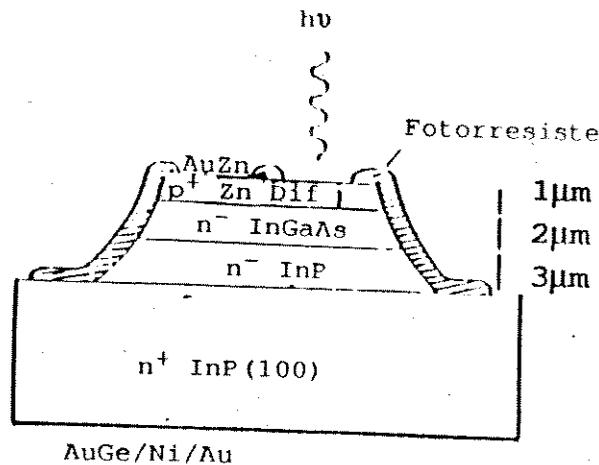


Figura 3.3: Representação esquemática do fotodetector pin obtido por Nickel e Kuphal [2].

A estrutura mesa apresenta como desvantagem a dificuldade de passivação da junção, o que pode resultar em componentes de baixa confiabilidade.

3.2 FOTODETECTOR PIN NA ESTRUTURA PLANAR:

A figura 3.4 traz uma representação esquemática de um fotodetector pin planar em InGaAs [3]. A seqüência de processamento esta resumida na figura 3.5 .

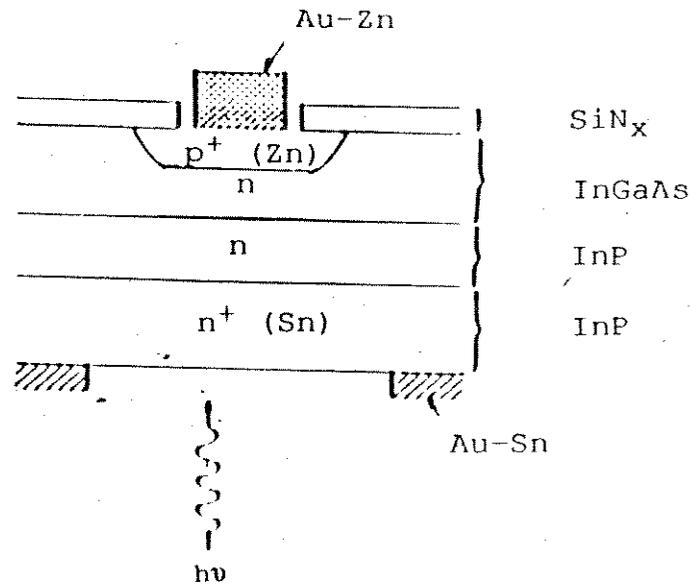


Figura 3.4: Representação esquemática do fotodetector pin planar de acordo com [3].

Foram crescidas por epitaxia de fase líquida uma camada tampão de InP e uma camada de InGaAs, onde será absorvida a luz. Ambas camadas não são intencionalmente dopadas. Sobre a camada de InGaAs foi depositado por PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) um filme de Si_3N_4 onde foi aberto um círculo para difusão de Zn que definiu o anodo do fotodetector conseqüentemente a área da junção.

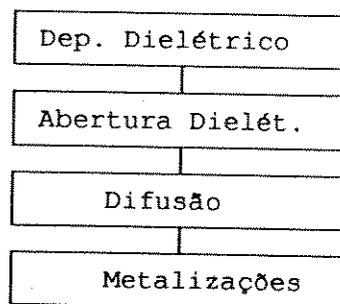


Figura 3.5: Seqüência resumida do processamento do fotodetector na estrutura planar.

Após a difusão, foram depositadas por evaporação térmica ligas de Au-Sn e Au-Zn no anodo e catodo respectivamente para formação dos contatos elétricos. A luz chega a região de absorção através de uma janela aberta no substrato.

O. K. Kim e colaboradores [4], observaram que a estrutura proposta em [3] pode ter sua corrente de escuro reduzida se a junção p-n for feita em InGaAsP ao invés de InGaAs, sugerindo desta

forma que a corrente de escuro depende do material no qual a superfície da borda da junção p-n esta localizada, isto é, depende da densidade de estados superficiais do material no qual a borda da junção esta exposta. Em [3] foi observado que materiais de energia de banda proibida maior que o $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, como por exemplo o InGaAsP , quando usados como camada de recobrimento (cap-layer), ou seja, camada onde a superfície da junção se expõe, apresentam significativa redução da corrente de escuro.

Uma outra opção para se obter fotodetectores pin planar foi apresentada por S. Miura e colaboradores em [5]. Nesta estrutura o fotodetector pin é enterrado em um buraco aberto, através de corrosão química, em um substrato semi-insulante de InP . As camadas que formam o fotodetector foram crescidas por epitaxia de fase vapor e constituem-se em :

- Camada n^+ de InP , catodo do fotodetector,
- Camada n^- de InP , camada tampão (buffer),
- Camada n^- de $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, camada intrínseca de absorção de luz.

A planarização da estrutura, isto é, a remoção do excesso de material semiconductor decorrente do crescimento fora do canal, foi feita através de corrosão por feixe de íons. A estrutura final do fotodetector planar enterrado esta mostrada na figura 3.6.

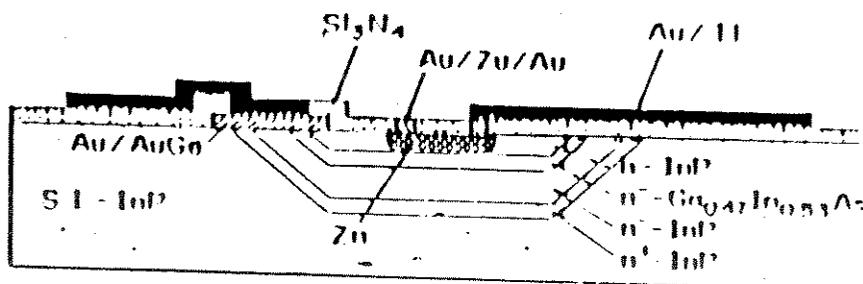


Figura 3.6: Representação do corte transversal do fotodetector pin enterrado.

As principais virtudes deste tipo de estrutura são :

- Baixa corrente de escuro,
- Compatibilidade com integração optoeletrônica.

3.3 FOTODETECTOR PIN NA ESTRUTURA MESA COBERTA

A estrutura do fotodetector pin a ser analisada neste trabalho procura reunir a simplicidade de processamento da estrutura mesa com a confiabilidade obtida através da passivação da junção na estrutura planar.

Segundo as observações feitas por O. K. Kim em [4], para que os fotodetectores pin na estrutura planar tenham correntes de escuro comparáveis aos fotodetectores tipo mesa a superfície da junção p-n deve estar localizada em um material de energia de banda proibida maior que o $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Nas versões atuais de fotodetectores planares há uma camada de cobertura de InP [6]. As dificuldades fundamentais no processamento de fotodetectores pin na estrutura planar são:

- Crescimento de InP sobre $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. Esse crescimento não pode ser feito por LPE uma vez que a solução contendo InP dissolve a camada de InGaAs. O crescimento de InP sobre InGaAs para fabricação de fotodetectores é em geral feito com VPE ou MOVPE.

- Deposição de dielétricos (Si_3N_4 , SiO_2 , Al_2O_3 , etc.) para delimitação da região do anodo. O coeficiente de expansão térmica dos dielétricos mencionados é diferente do coeficiente de expansão térmica do InGaAs ou InP, com isto durante o ciclo térmico para a difusão, 530°C , por alguns minutos, podem ser criados defeitos na interface dielétrico semiconductor, na superfície da junção, que resultam em estados de condução superficial aumentando a corrente de escuro. Outro problema associado ao dielétrico ocorre com as técnicas de deposição de dielétricos que requerem uma cuidadosa avaliação das condições de deposição de maneira a minimizar a densidade de estados superficiais criados durante a deposição do filme.

A estrutura mesa coberta foi originalmente proposta por G. R. Antell e colaboradores [7] e esta mostrada na figura 3.7.

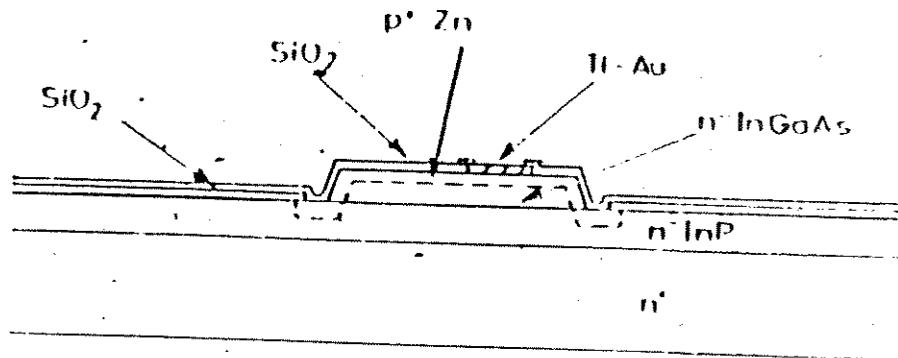


Figura 3.7: Corte esquemático de um fotodetector pin na estrutura mesa coberta.

Na estrutura do fotodiodo mostrada na figura 3.7 o problema da deposição do dielétrico para a máscara de difusão ainda está presente embora a superfície da junção p-n esteja no InP e não no $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ como nos fotodetectores construídos na estrutura mesa.

Mostramos na figura 3.8 as etapas básicas de fabricação dos fotodetectores pin na estrutura mesa coberta analisadas neste trabalho.

Inicialmente foram crescidas duas camadas por epitaxia de fase líquida: InP e $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, estas camadas apresentam dopagens residuais de $5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ a $8 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ e espessura de $3 \mu\text{m}$. Os procedimentos para o crescimento e as propriedades dos materiais são apresentadas detalhadamente na referência [5] do capítulo 2.

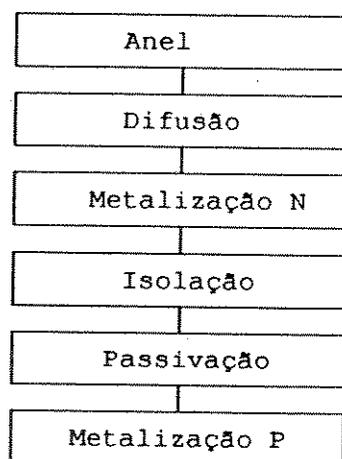


Figura 3.8: Fluxograma das etapas básicas de processamento do fotodetector pin na estrutura mesa coberta.

Fotogravação do anel:

O primeiro passo do processamento físico-químico é a fotogravação do anel que consiste em transferir ao semiconductor um padrão de anéis cujos diâmetros, interno e externo são:

Φ_{int}	300 μ m	200 μ m	100 μ m	55 μ m
Φ_{ext}	320 μ m	220 μ m	120 μ m	75 μ m

As condições de cura do fotorresiste são críticas para a forma final da mesa, a referência [8] as analisa em detalhe.

Através de corrosão química via úmida com $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ (1:1:5) [9] são formadas as mesas. Este reagente é seletivo e só corrói o InGaAs, praticamente não afetando o InP.

A difusão de Zn foi feita em ampola selada, 3 minutos a 530°C. Toda a superfície que foi corroída quimicamente no passo anterior sofre difusão de Zn. Mostramos na figura 3.9 uma microfotografia de um corte transversal de uma mesa após a difusão de Zn. A junção p-n foi revelada por $K_3Fe(CN)_6:KOH:H_2O$. Pela observação ao microscópio eletrônico de varredura estimamos a profundidade da difusão de Zn no InGaAs em 0,3 μ m e a profundidade de difusão no InP em 1 μ m.

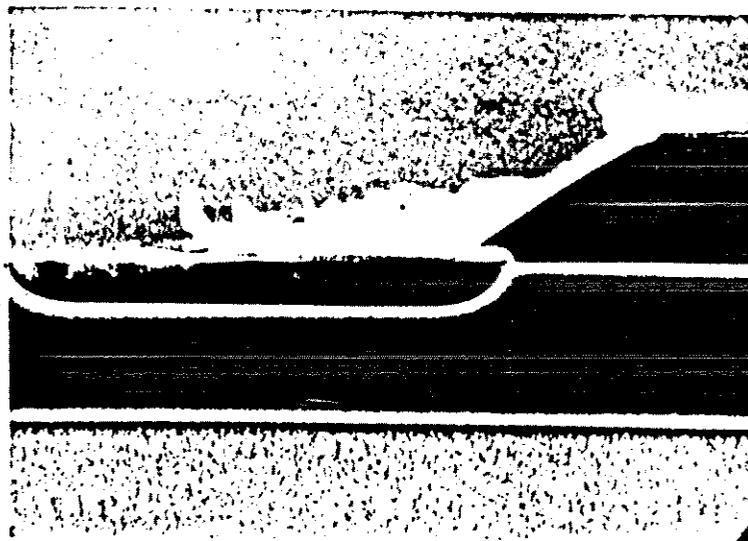


Figura 3.9: Microfotografia de um corte transversal de um fotodetector pin-mesa coberta.

Neste ponto há uma diferença significativa no processamento da estrutura mesa coberta, descrita neste trabalho, em relação a outras estruturas de fotodetectores pin: a difusão é feita sem nenhum dielétrico a servir como máscara, eliminando a criação de estados superficiais devido ao tensionamento dielétrico/semicondutor durante o aquecimento para difusão ou a técnica de difusão empregada.

Os substratos de InP usados no crescimento têm espessuras de aproximadamente 450 μ m, valor que dificulta a separação dos “chips”. De maneira a facilitar a separação de “chips” o substrato é afinado, por polimento com pasta de diamante e solução de Br-metanol, até 250 μ m de espessura. Sobre o substrato desbastado são depositados, por evaporação térmica, dois filmes metálicos: Au-Ge e Ni.

Para que se forme uma liga Au-Ge-Ni nesta metalização e conseqüentemente um contato de baixa resistividade, o substrato metalizado é submetido a um recozimento a 450°C por 5 minutos.

O fotodetector pin na estrutura mesa coberta é iluminado pelo substrato. Para minimizar a reflexão na interface semicondutor/ar é depositado um filme de Si₃N₄, 1650 angstroms de espessura. Os passos seguintes de processamento são realizados no lado p. O primeiro destes passos é a isolamento dos anodos dos fotodetectores. Esta é uma etapa crítica, a medida que

resíduos ou contaminações deixadas sobre a superfície da junção podem criar estados de condução superficial sobre a junção elevando a corrente de escuro do fotodetector.

Com o objetivo de tornar o processo de passivação simples e viabilizar sua produção industrial a investimentos reduzidos, foi escolhida a passivação com poliimida.

Ohnaka e colaboradores [10] seguem passos semelhantes de processo, mas utilizam passivação com Si_3N_4 e iluminação pelo topo da mesa. A poliimida usada foi fabricada pela HITACHI CHEMICALS, modelo lx110sx, de baixa concentração de impurezas. Os resultados de teste de vida acelerado, a serem apresentados neste trabalho, mostram resultados de confiabilidade semelhantes aos melhores resultados alcançados nos fotodetectores planares. A última etapa de processamento é a metalização p que é feita em dois passos de evaporação térmica. Inicialmente é depositado um filme de Cr/Al, fotogravado em simetria circular e removido, por corrosão química via úmida, exceto sobre a mesa. Segue-se a deposição de um filme de CrAu sobre o filme de CrAl e parcialmente sobre a poliimida, tal como esta ilustrado na figura 3.10. A solda de fio é feita sobre a metalização de CrAu na poliimida de modo a evitar esforços mecânicos sobre a mesa.

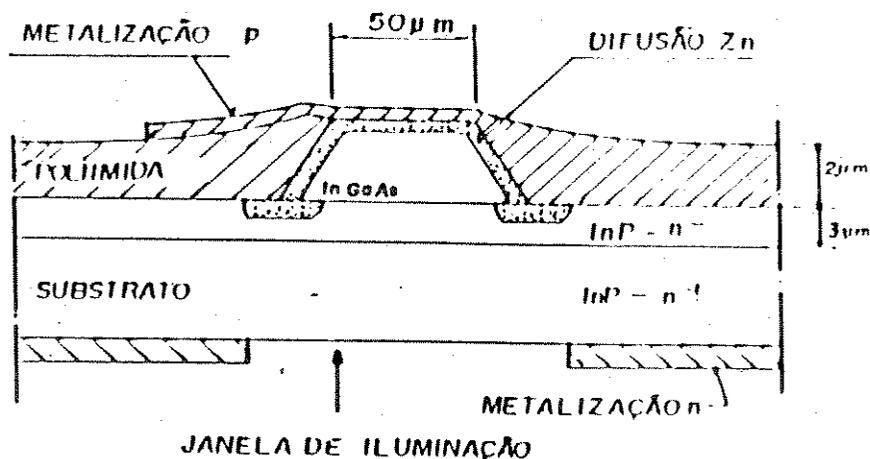


Figura 3.10: Corte transversal do fotodetector pin, estrutura mesa coberta, com passivação por poliimida. Dispositivo de simetria circular.

3.4 REFERÊNCIAS

1. C.A. Burrus, A. Dentai e T.P. Lee, "InGaAsP pin photodiodes with low dark current and small capacitance", Electronics Letters, vol15, n20, 1979.
2. H. Nickel e E. Kuphal, "Surface passivated low dark current InGaAs pin photodiodes", Journal of Optical Communications, vol4, 1983.

3. S.R. Forrest, I. Camlibel, O.K. Kim, H.J. Stocker e J.R. Zuber, "Low dark-current, high efficiency planar $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ pin photodiode", IEEE Electron Device Letters, vol EDL-2, n11, 1981.
4. O.K. Kin, B.V. Dutt, R.J. McCoy e J.R. Zuber, "A low dark current planar InGaAs pin photodiode with a quaternary InGaAsP cap layer", IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-21, n2, 1985.
5. S. Miura, H. Kawatsuka, T. Mikawa e O. Wada, "Planar embedded InP/InGaAs pin photodiode for very high-speed operation", Journal of Lightwave Technology, LT-5, n 10, 1987.
6. M. J. Robertson, S. Ritchie, S. K. Sargood, A.W. Nelson, L. Davis, R. H. Walling, C.P. Skrimshire e R.R. Sutherland, "Highly reliable planar GaInAs/InP photodiodes with high yield made by atmospheric pressure MOVPE", Electronics Letters, vol 24, n5, 1988.
7. G.R. Antell e R.F. Murison, "InGaAs/InP mesa photodetectors passivated with silicon dioxide", Electronics Letters, vol 20, n22, 1984.
8. E. Sato e K. Jumori, "Condições de deposição de fotorresiste para fotografação de anéis em fotodetectores pin mesa coberta", Relatório técnico interno TELEBRÁS, 1987.
9. Reference guide to chemical etching of InGaAsP, InGaAs semiconductors, Technical Note 1206, 1982, Naval Ocean System Center.
10. K. Ohnaka, M. Kubo e J. Shibata, "A low dark-current InGaAs/InP pin photodiode with covered mesa structure", IEEE Transaction on Electron Devices, ED-34, 1987.

Capítulo 4

MODELOS

Neste capítulo faremos uma descrição dos modelos usados para o cálculo dos parâmetros e características de funcionamento do fotodetector pin mesa coberta. Estes modelos procuram descrever o comportamento estático e dinâmico do fotodetector pin de mesa coberta com passivação por poliimida.

Procuraremos usar como variáveis de entrada aquelas que podemos ter controle no crescimento e no processamento. Desta forma calcularemos as características , tensão versus corrente, capacitância versus corrente e reposta em frequência em função da geometria , materiais e dopagens.

4.1 CARACTERÍSTICA ESTÁTICA

As características estáticas ou de corrente contínua mais importantes em fotodetectores são:

- Corrente de escuro versus tensão reversa,
- Capacitância versus tensão reversa.

Do ponto de vista elétrico, a estrutura mesa coberta pode ser representada por dois diodos em paralelo, tal como esta representado na figura 4.1.

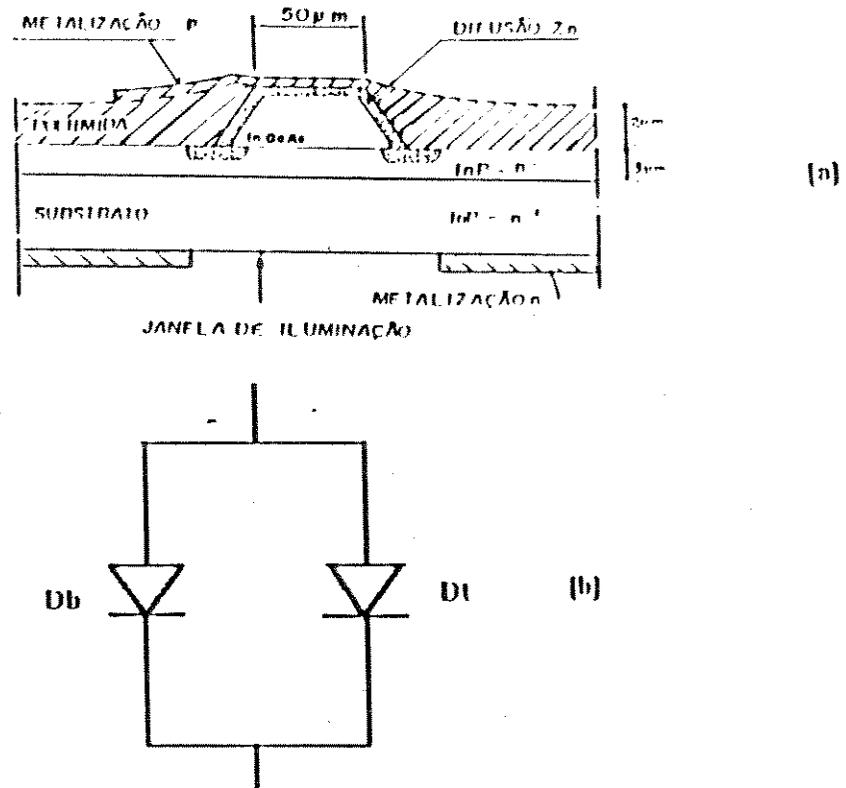


Figura 4.1: (a) Fotodetector pin mesa coberta. (b) Análogo elétrico: D_B diodo de homojunção no InP e D_T diodo de homojunção no InGaAs.

4.1.1 CARACTERÍSTICA CORRENTE VERSUS TENSÃO REVERSA

A corrente de escuro em fotodetectores pin tem três contribuições fundamentais [1], a saber:

- Corrente de difusão térmica
- Corrente de geração recombinação
- Corrente de tunelamento

Em função da tensão de polarização e da temperatura pode haver a predominância de uma das componentes sobre a outra:

- Em temperaturas elevadas, acima de 100°C, como será visto adiante, a corrente de difusão térmica começa a predominar em relação as demais.
- Para altas tensões, acima de 40V, passa a haver uma contribuição acentuada da corrente de tunelamento.

Portanto podemos escrever a corrente de escuro como :

$$I_d = I_{dif} + I_{g,r} + I_{tun} \quad (4.1)$$

Onde :

I_{dif} = corrente de difusão térmica,

$I_{g,r}$ = corrente de geração /recombinação,

I_{tun} = corrente de tunelamento.

Corrente de difusão térmica :

A corrente de difusão devido aos portadores minoritários gerados termicamente é dada por [2]:

$$I_{dif} = I_s [e^{(qV/kT)} - 1] \quad (4.2)$$

Onde :

I_s = corrente de saturação da junção,

q = carga do elétron,

V = tensão aplicada,

k = constante de Boltzman, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K,

T = temperatura em K.

A corrente de saturação pode ser calculada usando-se a expressão (4.3) [2].

$$I_s = qn_i^2 [(D_n/\tau_n)^{1/2}(A_p/N_a) + (D_p/\tau_p)^{1/2}/(A_n/N_d)] \quad (4.3)$$

Onde :

n_i = concentração intrínseca de portadores,

D_p, D_n = Constante de difusão dos portadores minoritários obtida a partir da relação de Einstein:

$D/\mu = kT/q$.

τ_p, τ_n = tempo de vida dos portadores minoritários.

N_a, N_d = concentração de doadores e aceitadores.

A_p, A_n = área das regiões p e n respectivamente.

A concentração intrínseca de portadores pode ser calculada pela equação (4.4):

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} e^{(-E_g/2kT)} \quad (4.4)$$

Onde :

$$(N_c N_v)^{1/2} \approx 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

E_g = energia de banda proibida do semiconductor.

A dependência de E_g com a temperatura pode ser calculada pela equação (4.5).

$$E_g(T) = E_g(0) + \sigma T \quad (4.5)$$

Para o $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ $E_g(0) = 0,821\text{eV}$, $\sigma = -3,2 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$.

Para o InP $E_g(0) = 1,42 \text{ eV}$ $\sigma = -2,3 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$.

A equação (4.3) pode sofrer algumas simplificações na estrutura mesa coberta: nesta estrutura os portadores minoritários se difundem das regiões p^+ , n^+ e intrínseca conforme podemos observar da figura 4.1 (a), no entanto a contribuição dos portadores gerados no substrato n^+ de InP é desprezível devido a menor concentração intrínseca de portadores no InP .

$$I_{\text{dif}} \propto n_i^2 \alpha e^{(E_g/kT)} \quad (4.6)$$

Com n_i podendo ser calculado pela expressão (4.4).

Para o $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ temos :

$$n_i = 5,08 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

Para o InP temos :

$$n_i = 4,68 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

Segundo (4.6) podemos afirmar que a corrente de difusão no $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ é aproximadamente 10^{11} vezes maior que a corrente de difusão no InP . Desta maneira a equação da corrente de difusão de portadores minoritários pode ser simplificada para a corrente de difusão da região p^+ :

$$I_s \approx q n_i^2 (D_n / \tau_n)^{1/2} A / N_a \quad (4.7)$$

Onde :

$\tau_n = 200\text{ps}$, tempo de vida dos portadores minoritários [1],

$D_n = 259 \text{ cm}^2/\text{s}$, constante de difusão dos elétrons [1],

A = área da junção,

N_a = concentração de aceitadores,

q = carga do elétron.

A equação de difusão pode então ser escrita como :

$$I_{\text{dif}} = qn_i^2(D_n/\tau_n)^{1/2}A[e^{qV/kT}-1]/N_a \quad (4.8)$$

Corrente de geração recombinação:

A recombinação e a geração de elétrons e buracos em semicondutores pode ocorrer em centros de geração recombinação ou armadilhas presentes na banda proibida do semiconductor. Estas armadilhas podem ser defeitos cristalográficos, átomos de impureza intersticial ou substitucional na rede cristalina ou defeitos de superfície [3].

Existem 4 processos básicos envolvendo a geração e recombinação através de centros presentes no meio da banda proibida :

- i- Se uma armadilha é ocupada por um buraco, um elétron da banda de condução pode se recombinar com o buraco presente na armadilha,
- ii- A armadilha pode emitir o buraco para a banda de valência.
- iii- Se a armadilha é ocupada por um elétron, este elétron pode ser emitido para a banda de condução ou,
- iv- Um buraco da banda de valência pode se mover até a armadilha e recombinar com o elétron que a ocupa.

Os processos descritos acima dizem respeito as armadilhas no material semiconductor (bulk), já os defeitos de superfície nas junções p-n se originam estados de superfície no semiconductor que induzem cargas imagem formando centros de recombinação.

Em fotodetectores pin a corrente de geração recombinação pode tanto ser devido a defeitos na superfície quanto a defeitos no semiconductor.

De maneira a verificar, experimentalmente, a origem da corrente de geração recombinação nos fotodetectores construídos neste trabalho, foram implementados fotodetectores com diferentes diâmetros de junção:

- Se a dependência da corrente de escuro seguir uma lei de formação quadrática com o diâmetro, corrente proporcional a área, a corrente de geração recombinação terá origem no material semiconductor.
- Se a corrente de escuro variar linearmente com o diâmetro a dependência será com o perímetro da junção, logo a corrente de escuro se relaciona com a superfície da junção: corrente de geração/recombinação superficial.

Resultados experimentais serão mostrados no capítulo V.

Assumiremos para nosso modelo que a corrente de geração recombinação é do material semiconductor e não da superfície. Neste caso para uma região esvaziada de cargas de largura W, a corrente de geração recombinação será [4]:

$$I_{gr} = qn_iAW/\tau_{ef} (e^{qV/2kT} - 1) \quad (4.9)$$

Onde :

q = carga do elétron

A = área da junção,

τ_{ef} = tempo de vida efetivo dos portadores,

n_i = concentração intrínseca, dada por (4.4),

A = área da junção,

V = tensão aplicada,

k = constante de Boltzman,

T = temperatura em K.

Para junções abruptas a variação da largura da região esvaziada com a tensão é dada por :

$$W(V) = (2*\epsilon_0 \epsilon_r*(V+V_{bi})/(q*N_d))^{1/2} \quad (4.10)$$

Onde :

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-2}$ pF/cm

ϵ_r = constante dielétrica do semiconductor, 12 para o InGaAs.

N_d = concentração residual da camada i, intrínseca.

V = tensão aplicada.

Podemos calcular V_{bi} pela equação (4.11).

$$qV_{bi} = k T \ln(N_d N_a / n_i^2) \quad (4.11)$$

N_d = concentração residual na região intrínseca,

N_a = concentração na região p⁺,

Corrente de tunelamento :

S.R.Forrest e colaboradores observam em [5] um comportamento anômalo na corrente de escuro dos fotodetectores pin em $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}/InP$, onde o $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ é uma das ligas possíveis.

Em muitos casos os fotodetectores exibiam uma dependência próxima a exponencial da corrente de escuro com a tensão. Este comportamento foi atribuído ao tunelamento banda a banda nestes semicondutores. A corrente de tunelamento domina a corrente de escuro para altas tensões e, para semicondutores de “gap” direto, a corrente de tunelamento banda a banda pode ser calculada pela expressão 4.12, [5]:

$$I_{\text{tun}} = \gamma A e^{((- \Theta m_0^{1/2} E_g^{3/2}) / (q h E_m))} \quad (4.12)$$

Onde :

m_0 = massa do elétron livre,

$h = h/2\pi$,

$E_m = -2(V + V_{bi})/W$,

$\Theta = \alpha (m_c^* / m_0)^{1/2}$

$\alpha \approx 1$.

O pré-fator γ pode ser calculado pela equação (4.13):

$$\gamma = [2m_c^* / E_g]^{1/2} (q^3 E_m V / (4\pi^2 h^2)) \quad (4.13)$$

Onde :

m_c^* = massa efetiva na banda de condução

Das equações (4.12) e (4.13) observamos que a dependência da corrente de tunelamento é fraca com a temperatura. Esta dependência se resume a variação de E_g com a temperatura.

A figura 4.2 mostra a variação da corrente de escuro em função da tensão reversa calculada pelo modelo de corrente de escuro exposto, isto é, decompondo-se a corrente de escuro em corrente de difusão térmica, corrente de geração/recombinação e corrente de tunelamento. No próximo capítulo este resultado será comparado com resultados experimentais.

A curva foi calculada assumindo-se os seguintes valores:

Concentração residual do binário : $8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,

Concentração residual do ternário : $7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,

Diâmetro da junção no binário : $80 \text{ }\mu\text{m}$,

Diâmetro da junção no ternário : $50 \text{ }\mu\text{m}$,

Tempo efetivo de geração/recombinação : $1 \mu\text{s}$.

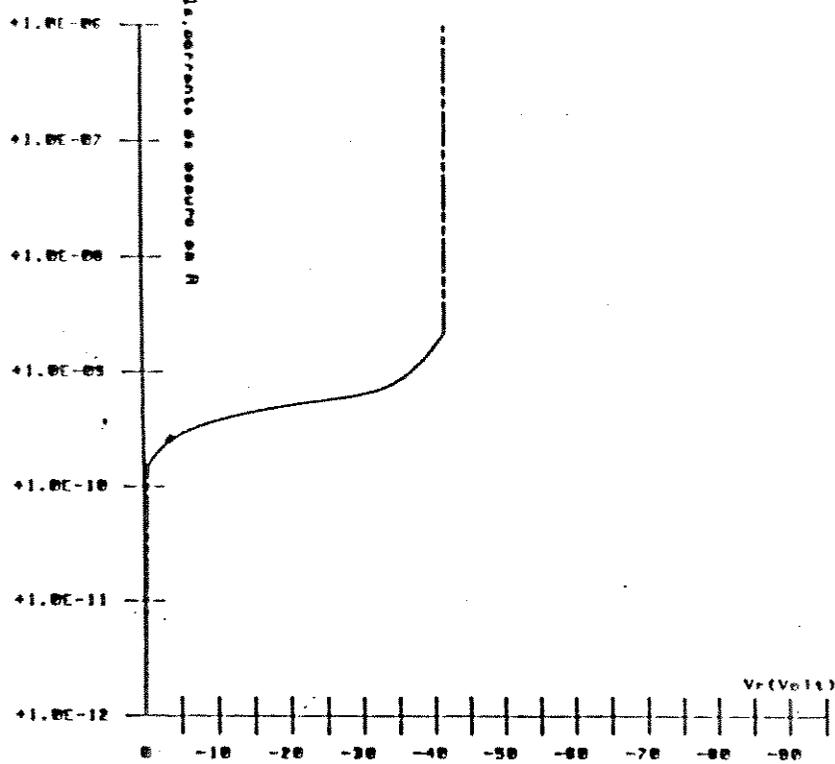


Figura 4.2: Variação da corrente de escuro com a tensão reversa de polarização. Valores calculados pelo modelo proposto.

4.1.2 CARACTERÍSTICA CAPACITÂNCIA TENSÃO

A capacitância total do fotodiodo da figura 4.1(a) pode ser dividida em duas capacitâncias associadas em paralelo :

- Capacitância da região esvaziada C_d ,
- Capacitância da ilha de metalização para solda C_p

$$C_{fd} = C_d + C_p \quad (4.14)$$

Na estrutura mesa coberta a capacitância da região esvaziada se divide em capacitância no InP, C_b , e capacitância no $In_{0,53}Ga_{0,47}As$, C_t .

Seja Φ_1 o diâmetro da junção no $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ e Φ_2 o diâmetro da junção no InP, seja W a largura da região esvaziada, dada pela equação (4.10) e a capacitância podendo ser calculada por uma aproximação de capacitância de placas paralelas temos :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A/d \quad (4.15)$$

Como o fotodetector é de simetria circular :

$$A = \pi \Phi^2/4$$

$$d = W = (-2 * \epsilon_0 \epsilon_r * (V + V_{bi}) / (q * N_d))^{1/2}$$

Para o InP temos :

$$C_b = \epsilon_0 \epsilon_{rb} (\Phi_2^2 - \Phi_1^2) \pi / \{ (-2 * \epsilon_0 \epsilon_{rb} * (V + V_{bib}) / (q * N_{db}))^{1/2} \} \quad (4.16)$$

Para o ternário temos:

$$C_i = \epsilon_0 \epsilon_{ri} \pi \Phi_1^2 / \{ 4 [2 \epsilon_0 \epsilon_r (V + V_{bit}) / (q N_{dt})]^{1/2} \} \quad (4.17).$$

A capacitância do fotodiodo será :

$$C_d = \epsilon_0 \epsilon_{rb} (\Phi_2^2 - \Phi_1^2) \pi / \{ (-2 * \epsilon_0 \epsilon_{rb} * (V + V_{bib}) / (q * N_{db}))^{1/2} \} + \epsilon_0 \epsilon_{ri} \pi \Phi_1^2 / \{ 4 [2 \epsilon_0 \epsilon_r (V + V_{bit}) / (q N_{dt})]^{1/2} \}$$

Re-agrupando os termos temos:

$$C_d = \epsilon_0 \pi / \{ (4 (2 \epsilon_0 / q)^{1/2}) \} \{ [\epsilon_{rb}^{1/2} (\Phi_2^2 - \Phi_1^2) / [(V + V_{bi}) / N_{db}]^{1/2} + \epsilon_{ri}^{1/2} \Phi_1^2 / [(V + V_{bit}) / N_{dt}]^{1/2} \} \quad (4.18)$$

A equação (4.18) permite calcular a capacitância do fotodetector em função de sua geometria e níveis de dopagem no InP e no InGaAs, N_b e N_p , respectivamente. A figura 4.3 mostra a variação da capacitância com a tensão reversa de polarização.

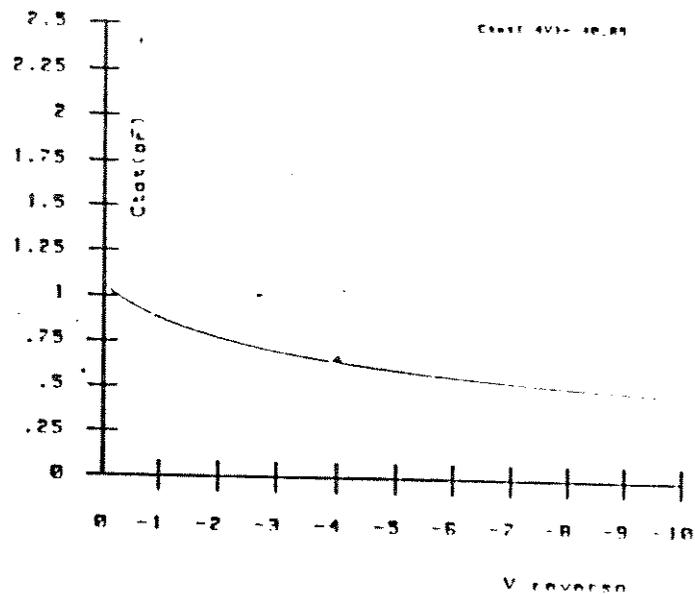


Figura 4.3: Variação da capacitância com a tensão calculada pela equação 4.14 assumindo-se $N_{dt}=5E15$, $N_{db}=8E15$, $\Phi_1=55\mu m$ e $\Phi_2=85\mu m$.

4.2 MODELO DINÂMICO

O comportamento dinâmico de fotodetectores pin é fundamental à sua aplicação em sistemas de comunicações ópticas, neste sentido o conhecimento dos mecanismos que limitam a resposta em frequência dos fotodetectores nos permite otimizar as estruturas visando a aplicação em telecomunicações.

Os principais mecanismos que limitam a resposta em frequência dos fotodetectores pin são [6,7] :

- . Tempo de trânsito dos portadores na região esvaziada.
- . Tempo de difusão dos portadores fotogerados fora da região esvaziada.
- . Tempo de carga e descarga da capacitância inerente ao fotodetector e de outras capacitâncias associadas a montagem do fotodetector.
- . Aprisionamento de cargas nas heterointerfaces.

O tempo de trânsito depende da velocidade dos portadores fotogerados e, no caso do InGaAs, do campo elétrico aplicado.

Se uma fração da luz for absorvida em uma das regiões de cargas neutras, p ou n, os portadores fotogerados nestas regiões se deslocarão por difusão o que resulta em uma baixa velocidade de deslocamento.

Mostramos na seção 4.1.2 a capacitância associada ao fotodiodo. Como sempre existe uma resistência de carga finita e não nula no fotodiodo há um tempo finito e não nulo associado a sua descarga.

O aprisionamento de cargas na heterointerface decorre do uso de semicondutores diferentes na fabricação dos fotodiodos. Em fotodetectores pin em InGaAs/InP a junção p-n é formada por difusão no InGaAs. Nesta estrutura esta presente a heterointerface InGaAs(n⁻)/InP(n⁻), conforme esta mostrado na figura 4.4, que é uma representação do diagrama de bandas de um fotodiodo pin com junção p-i no InGaAs.

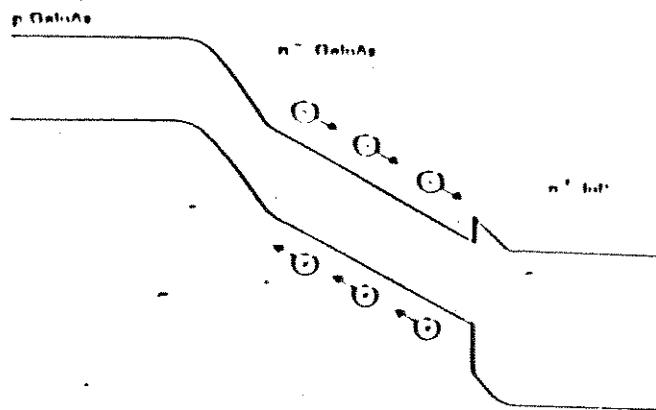


Figura 4.4: Diagrama de bandas de um fotodiodo pin com junção p-i no InGaAs : fotodiodo de homojunção.

A heterointerface InGaAs/InP pode aprisionar e⁻, contudo a massa efetiva dos e⁻ é pequena e a probabilidade de tunelamento grande sendo desprezível o acúmulo de cargas nesta região.

Para a estrutura mesa coberta os principais mecanismos que limitam sua resposta em frequência são :

- Capacitâncias
- Tempo de trânsito
- Tempo de difusão para fora da região de cargas neutras.

A influência do tempo de difusão pode ser minimizada fazendo-se com que pouca ou quase nenhuma luz seja absorvida nas regiões de cargas neutras. Na estrutura mesa coberta isto é obtido com a iluminação através do substrato.

Lucovski e colaboradores [8] analisam a resposta em frequência de fotodetectores pin através da solução das equações de continuidade. Assumem que a velocidade dos portadores na região esvaziada não depende do campo, já Sabella e Merli [7] observam que a velocidade dos portadores no InGaAs varia com o campo elétrico e apontam correções ao modelo de Lucovski. A análise do gráfico de velocidade dos portadores em função do campo elétrico nos permite avaliar uma possível limitação do modelo de Lucovski. Representamos na figura 4.5 a variação da velocidade dos portadores com o campo elétrico no InGaAs. Com a equação 4.10 podemos avaliar a largura da região esvaziada para uma dopagem residual de $5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ quando polarizado a -5V , que é uma tensão típica de polarização de fotodiodos pin em receptores ópticos.

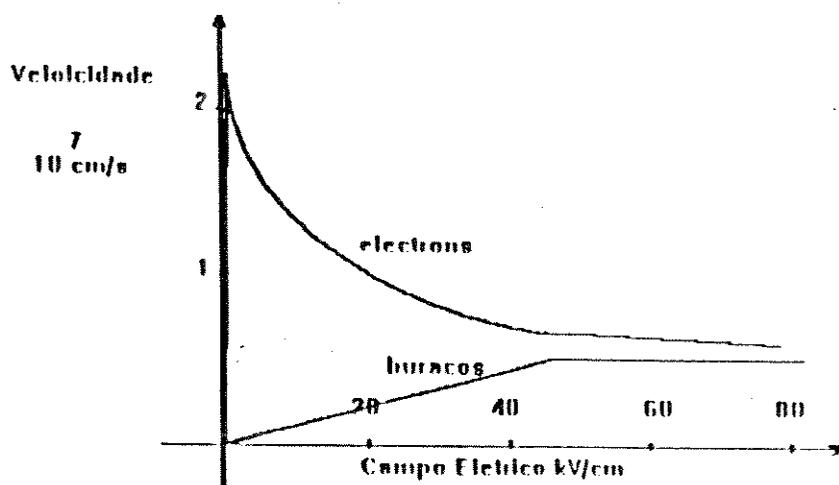


Figura 4.5: Variação da velocidade de buracos e elétrons com campo E no InGaAs[6].

Nestas condições a região esvaziada tem uma largura de aproximadamente $1,3 \mu\text{m}$ resultando em um campo elétrico de aproximadamente $3,85 \cdot 10^4 \text{V/cm}$. Para este campo elétrico as velocidades, tanto dos elétrons quanto dos buracos são praticamente constantes e o modelo de Lucovski, que é mais simples, pode ser empregado.

4.2.1 SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CONTINUIDADE

As equações de continuidade que descrevem o transporte dos portadores foto gerados na região esvaziada (i) de um fotodetector pin polarizado reversamente são:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -[(p-p_0)/\tau_b] + g - 1/q \operatorname{div}(J_p) \quad (4.19)$$

$$\partial n/\partial t = -[(n-n_0)/\tau_b] + g + 1/q \operatorname{div}(J_n) \quad (4.20)$$

Onde :

p, n = densidade de portadores foto-gerados

p_0, n_0 = densidade de portadores no equilíbrio

g = taxa de geração volumétrica de pares e^-/e^+ (elétron buraco)

τ_b = tempo de vida dos portadores no material (bulk)

A densidade de corrente de e^- (J_n) e de e^+ (J_p) pode ser obtida através das seguintes expressões:

$$J_p = e\mu_p p E - e D_p \operatorname{grad}(p) \quad (4.21)$$

$$J_n = e\mu_n n E + e D_n \operatorname{grad}(n) \quad (4.22)$$

Onde :

μ_n, μ_p = mobilidade dos elétrons e buracos,

E = campo elétrico devido a polarização externa,

D_n, D_p = constante de difusão de elétrons e buracos,

J_n, J_p = densidade de corrente de elétrons e buracos.

A densidade total de corrente será :

$$J = J_p + J_n + \epsilon_r \epsilon_0 (\partial E / \partial t) \quad (4.23)$$

A equação (4.23) é uma forma generalizada da equação de densidade de corrente . Nela são considerados os efeitos dos portadores foto-gerados e da variação temporal do campo elétrico que resulta em corrente de deslocamento.

A separação das cargas foto-geradas perturba o campo elétrico na região esvaziada. Para satisfazer a equação de Poisson que relaciona o campo elétrico na junção com a densidade de portadores devemos ter:

$$\operatorname{div}(E) = e * (p-n) / (\epsilon_r \epsilon_0) \quad (4.24)$$

As equações de continuidade de corrente podem ser escritas através da substituição de (4.21) a (4.24) em (4.19) e (4.20).

$$\partial p/\partial t = -[(p-p_0)/\tau_b] + g - \mu_p p [e(p-n)/\epsilon_r \epsilon_0] - \mu_p E \operatorname{div}(p) + D_p \operatorname{divgrad}(p) \quad (4.25)$$

$$\partial n/\partial t = -[(n-n_0)/\tau_b] + g + \mu_n n [e*(p-n)/\epsilon_r \epsilon_0] + \mu_n * E * \operatorname{div}(n) + D_n * \operatorname{divgrad}(n) \quad (4.26)$$

Como consequência da presença do espaço de cargas as equações de continuidade são acopladas e não lineares. Com base numa argumentação fenomenológica Lucovski e colaboradores [8] introduzem simplificações que permitem a linearização das equações de continuidade. Assumem que o campo na região i de um fotodetector pin polarizado reversamente é constante e determinam as condições para que esta hipótese seja observada. Como a junção p-i-n tem um comportamento semelhante a um capacitor de placas planas e paralelas, hipótese já usada em (4.15), a carga armazenada em uma das placas pode ser calculada através da equação (4.27).

$$Q = \epsilon_r \epsilon_0 E_0 \quad (4.27)$$

Onde :

$\epsilon_r \epsilon_0$ = constantes dielétricas relativa do material e absoluta do vácuo respectivamente.

$E_0 = V_{ext} / l$, campo elétrico devido a polarização externa.

Seja um fluxo de luz de intensidade i_l (fótons/(s*m²)) incidindo no fotodetector, e seja uma fração β desta luz sendo absorvida na região i , se o coeficiente de absorção for da ordem de $1/l$ e a luz uniformemente absorvida, cada fóton gerando um par e^-/e^+ então a razão de geração volumétrica de pares e^-/e^+ pode ser calculada pela equação (4.28)

$$\beta i_l = lg \quad (4.28)$$

Onde :

β = fração da luz absorvida,

i_l = fluxo de luz

l = largura da região i

g = razão de geração volumétrica de pares e^-/e^+ .

Assumindo mobilidades iguais para e^-/e^+ , o tempo de trânsito médio que estes portadores demandam para deixar a região i , considerando uma distância média $l/2$ e uma velocidade v é:

$$\tau = l/(2v)$$

mas $v = \mu E_0$

então:

$$\tau = l/(2\mu E_0) \quad (4.29)$$

O número de portadores, de cada tipo, presente na junção no tempo τ será:

$$N = I_g \tau = I_g l / (2\mu E_0) = I^2 g / (2\mu E_0) \geq I^2 g / (2v_{sat})$$

$$N = I^2 g / (2\mu E_0) \quad (4.30)$$

O campo que estes portadores produzem se opõe ao campo externo aplicado. Para avaliarmos quão significativa é a alteração no campo elétrico induzida pelas cargas fotogeradas é necessário calcularmos o total líquido de cargas em uma das placas do capacitor que representa o fotodetector. Para que esta perturbação seja mínima é preciso que o total de cargas acumulado em uma das placas seja maior que o total das cargas fotogeradas em equilíbrio.

$$Q \gg Nq$$

$$\epsilon_r \epsilon_0 E_0 \gg I^2 g / (2\mu E_0) q$$

$$E_0^2 \gg I / (2\mu E_0) J_1$$

Vamos considerar a geometria do fotodiodo conforme mostrado na figura (4.6)

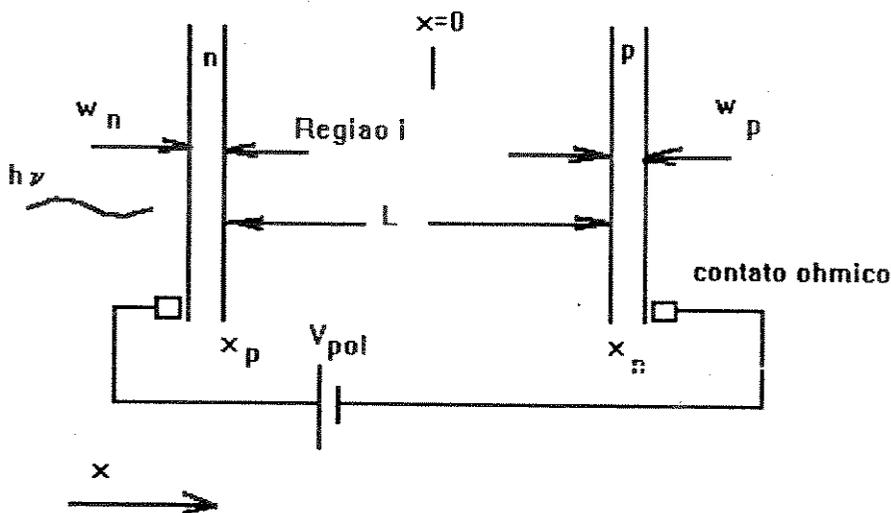


Figura 4.6: Representação esquemática de um fotodiodo pin

O número total de portadores na região i, de largura l é :

$$N = I g \tau = \int_0^{l/2} [p(x) - n(x)] dx$$

$$N = I^2 g / (2 v_{sat})$$

Que é satisfeito por :

$$p(x) - n(x) = 2gx / (\mu \epsilon) \quad (4.31)$$

Mas :

$$\text{div}(\mathbf{E}) = e (p - n) / (\epsilon_r \epsilon_0)$$

$$2 \partial E / \partial x = (2gq / (\mu \epsilon_0 \epsilon_r \epsilon_0)) x \quad (4.32)$$

$$E = (2gq / (\mu \epsilon_0 \epsilon_r \epsilon_0)) x^2 + E_0 \quad (4.33)$$

Onde E_0 , constante de integração, é devido a polarização externa.

Para altos valores de campo:

$E \approx E_0$, é constante, logo a velocidade de deriva dos portadores pode ser aproximada por μE_0 .

Podemos então linearizar as equações de continuidade:

Se o tempo efetivo de recombinação do material for muito maior que o tempo que os portadores fotogerados demoram para sair da região i , então os termos referentes a recombinação podem ser desprezados nas equações de continuidade :

$$(n - n_0) / \tau_b \approx 0$$

$$(p - p_0) / \tau_b \approx 0$$

Para uma taxa de geração de portadores independente do tempo a densidade de corrente é dada por :

$$J = J_p + J_n$$

$$J = e \mu (p + n) E - e D \text{grad}(p - n)$$

Se não houver recombinação a densidade de corrente deve ser igual a corrente fotogerada:

$$i_{\text{tot}} = I + g$$

Comparando a corrente de difusão com a corrente fotogerada temos:

$$\begin{aligned} e D \text{grad}(p - n) / (I + g) &= 2 D / (\mu E_0 l) = \\ &= (kT/e) / (E_0 l/2) \end{aligned}$$

Se a tensão de polarização for muito maior que kT/e então a corrente de difusão poderá ser desprezada.

$$J = I + g$$

$$J = e \mu (p + n) E \quad (4.34)$$

O cálculo de $p(x)$ e $n(x)$ poderá ser feito através das equações (4.31) e (4.32).

$$p(x) - n(x) = 2 g x / (\mu E_0)$$

$$p(x) + n(x) = I + g / (\mu E_0)$$

Logo :

$$p(x) = g (x + l/2) / (\mu E_0)$$

$$n(x) = - g (x - l/2) / (\mu E_0)$$

Os termos não lineares das equações de continuidade 4.25 e 4.26:

$$(\mu q / (\epsilon_r \epsilon_0)) p(p - n)$$

$$(\mu q / (\epsilon_r \epsilon_0)) n(p - n)$$

podem ser desprezados em comparação aos termos $\mu E \text{grad}(p)$ e $\mu E \text{grad}(n)$ desde que :

$$\mu q p(p - n) / ((\epsilon_r \epsilon_0) dp/dx) =$$

$$= I l / ((\mu \epsilon_r \epsilon_0) E_0^2) \ll 1$$

A condição para que esta inequação seja satisfeita é que os portadores fotogerados não perturbem o campo produzido pela polarização externa. A equação (4.33) apresenta a condição na qual o campo devido a polarização externa é fracamente perturbado pelos portadores fotogerados.

Após estas considerações as equações de continuidade tomam a forma linear abaixo.

$$\partial p / \partial t = g - \mu_p E \partial p / \partial x \quad (4.35)$$

$$\partial n / \partial t = g + \mu_n E \partial n / \partial x \quad (4.36)$$

E a equação de densidade de corrente será:

$$J = q(\mu_p p + \mu_n n) + (\epsilon_r \epsilon_0) (\partial E / \partial t)$$

A solução da equação de continuidade depende do modelo usado para representar a absorção da luz na camada i ou, em outras palavras como são fotogerados os portadores.

A fotogeração pode ser :

- Uniforme
- Não uniforme

Na fotogeração uniforme a razão de geração de portadores é a mesma qualquer que seja a posição na região i . Na fotogeração não uniforme a geração de fotoportadores decai exponencialmente a medida que a luz penetra no semiconductor.

Neste trabalho estamos usando o modelo de geração não uniforme, que é mais geral para fotodiodos, embora o modelo de geração uniforme para fotodetectores de região i fina e coeficiente de absorção da ordem do inverso da espessura da região i seja consistente.

Assumindo que a luz incide no lado n da junção e que a ordenada, x , cresce de x_p para x_n , Lucovski e co-autores [8] mostram que as soluções são do tipo:

Para uma fotogeração não uniforme, da forma :

$$g = \alpha g_0 e^{-\alpha (x - x_p)} (1 + A e^{j\omega t}) \quad (4.37)$$

Com $A < 1$.

$$p(x,t) = g/v [1 - e^{-\alpha(x-x_p)}] + \alpha g A e^{j\omega t} / (j\omega - \alpha \cdot v) [1 + e^{-\alpha(x-x_p)} - e^{-j(\omega/v)(x-x_p)}] \quad (4.38)$$

$$n(x,t) = -g/(bv)[e^{-\alpha l} - e^{-\alpha(x-x_p)}] + \alpha g A e^{j\omega t} / (j\omega + \alpha \cdot b \cdot v) [e^{-\alpha(x-x_p)} - e^{-\alpha l} e^{j(\omega/(bv))(x-x_p)}] \quad (4.39)$$

E a densidade de corrente será :

$$J(\omega,t) = e \cdot g (1 - e^{-\alpha l}) \cdot \{ 1 + A \cdot e^{j\omega t} / [(j\omega l/v) - \alpha l] [1 - \alpha l / (1 - e^{-\alpha l})(1 - e^{j\omega l/v}) / (j\omega l/v)] \} A \cdot e^{j\omega t} / (j\omega l/bv + \alpha l) [1 - \alpha l e^{-\alpha l} / (1 - e^{-\alpha l})(1 - e^{-j\omega l/bv}) / (j\omega l/(bv))] \quad (4.40)$$

Onde :

$$A < 1$$

b = velocidade dos elétrons/velocidade dos buracos.

Bowers e co-autores [9] mostram com base nos resultados de Lucovski [8], especificamente a equação (4.39), a resposta em frequência de um fotodetector pin, limitado pelo tempo de trânsito é dada por:

$$i(\omega)/i(0) = 1/(1 - e^{-\alpha l}) [(1 - e^{j\omega\tau_n - \alpha l}) / (j\omega\tau_n + \alpha l) + e^{-\alpha l} (e^{-j\tau_n} - 1) / (j\omega\tau_n) + (1 - e^{j\omega\tau_p}) / (j\omega\tau_p) + e^{-\alpha l} (1 - e^{\alpha l + j\omega\tau_p}) / (\alpha l - j\omega\tau_p)] \quad (4.41)$$

Na equação (4.40) a resposta em frequência do fotodetector considera somente as limitações decorrentes de tempo de trânsito. Limitações práticas como as introduzidas por indutâncias e capacitâncias de montagem não são modeladas pela equação (4.40).

A figura 4.7 mostra a curva de resposta em frequência do fotodetector, calculada com base na equação 4.40 e dimensões correspondentes a um fotodetector na estrutura mesa coberta e com os seguintes parâmetros: $\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$, espessura da região esvaziada $l = 2,5 \mu\text{m}$, $v_e = 10^7 \text{ cm/s}$, $v_p = 5,8 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$. A principal limitação da resposta em frequência sob o ponto de vista de tempo de trânsito é a velocidade dos buracos.

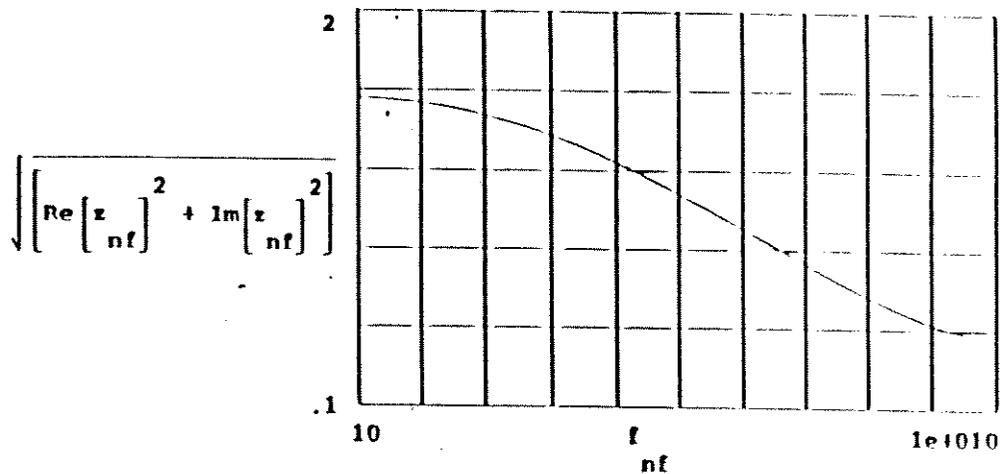


Figura 4.7: Resposta em frequência calculada pela equação 4.40. Eixo x frequência em escala linear, eixo y, módulo de $i(\omega)/i(0)$, escala linear, unidades arbitrárias.

4.3 REFERÊNCIAS

1. S. R. Forrest, "Performance of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ photodiodes with dark-current limited by diffusion, generation recombination and tunneling", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol QE-17, n 2, 1981.
2. S.M. Sze, "Physics of semiconductor devices", John Willey & Sons, 1981.
- 3 C.H. Sah, R. N. Noyce, W. Shockley, "Generation and recombination in p-n junctions and p-n junctions characteristics", Proceedings of IRE, 1957.
4. A.S. Grove " Physics and technology of semiconductor devices", John Willey & Sons, 1967.
5. S.R. Forrest, M.N. DiDomenico, G.R. Smith e H.J. Stocker, "Evidence for tunneling in reverse-biased III-V photodetector diode", Applied Physics Letter, vol 36, n 7, 1980.
6. J. E. Bowers e C.A. Burrus, "Ultrawide-band longwavelength pin photodetectors", Journal of Lightwave Technology, LT-3, n 10, 1987.
7. R. Sabella e S. Merli, "Analysis of InGaAs pin photodiodes frequency response", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol 29, n3, 1993.

8. G. Lucovski, R.F. Schwarz e K.B. Emmons, "Transit-time considerations in p-i-n diodes", *Journal of Applied Physics*, vol 35, n 3, 1964.

9. J.E. Bowers e C.A. Burrus, " InGaAs pin photodetectors with modulation response to millimetre wavelengths", *Electronics Letters*, vol 21, n18, 1985.

Capítulo 5

CARACTERIZAÇÕES

Neste capítulo apresentaremos os resultados experimentais de caracterização dos fotodetectores pin mesa coberta e os compararemos com os resultados previstos pelo modelamento descrito no capítulo 4.

5.1 CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA OU CONTÍNUA

A caracterização estática de fotodetectores é aquela realizada sem variação temporal da geração de portadores. Consiste em medirmos a corrente de escuro e a capacitância, para uma faixa de tensão de polarização reversa, e a responsividade em função do comprimento de onda.

5.1.1 CORRENTE DE ESCURO

A medida da característica corrente reversa versus tensão reversa foi realizada em diferentes estágios da fabricação do fotodetector pin.

- . Imediatamente após o processo de fabricação
- . Após a solda do fotodetector, individualizado, ao suporte cerâmico.

O arranjo experimental usado para a medida da corrente de escuro esta mostrado na figura 5.1. A medida é efetivamente realizada por um analisador paramétrico de dispositivos semicondutores, HP4145B. O controle das medidas, traçar gráficos e controlar a temperatura é feito com um micro computador do tipo PC que atua sobre os instrumentos através de um barramento GPIB.

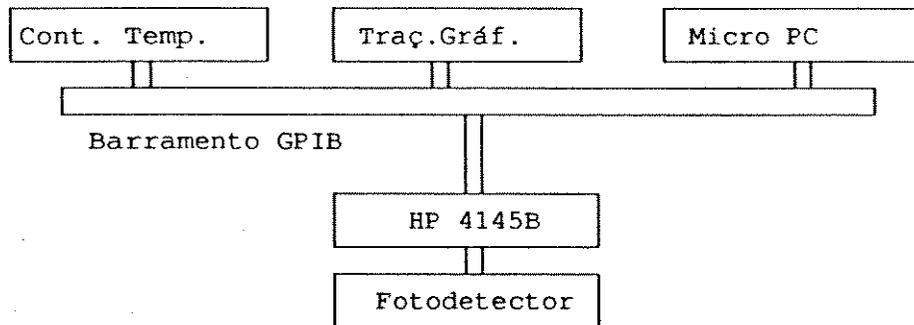


Figura 5.1: Diagrama esquemático da medida de corrente de escuro

Embora tenha sido feita uma varredura de 0V a -20V a característica corrente reversa versus tensão foi parametrizada pelo valor da corrente em dois pontos :

- . corrente reversa a -4V
- . corrente reversa a -15V

O valor -4V foi escolhido por ser uma tensão próxima a tensão de operação em receptores ópticos, e o valor -15V nos permite avaliar se há mecanismos de condução superficial dependentes da tensão de polarização.

Este mesmo sistema pode fazer varreduras de até 100V de polarização reversa, permitindo a medida da tensão de ruptura da junção.

A variação da tensão de ruptura com a dopagem segue a equação empírica (5.1) [1].

$$V_b = 60.[E_g(\text{eV})/1,1]^{1,5}[N_d(\text{cm}^{-3})/10^{16}]^{-0,75} \quad (5.1)$$

Onde:

V_b = tensão de ruptura da junção,

$E_g(\text{eV})$ = energia da banda proibida do semicondutor em eV,

N_d = concentração residual de impurezas doadoras em cm^{-3} .

Considerando que a estrutura mesa coberta possui dois diodos em paralelo e que as dopagens residuais do InGaAs e InP, nesta estrutura, são praticamente iguais, a tensão de ruptura medida corresponderá ao material de menor energia de banda proibida.

Apresentamos na figura 5.2 uma característica típica da corrente de escuro versus tensão reversa para fotodiodos na estrutura mesa coberta. Este fotodetector foi crescido por epitaxia de fase líquida.

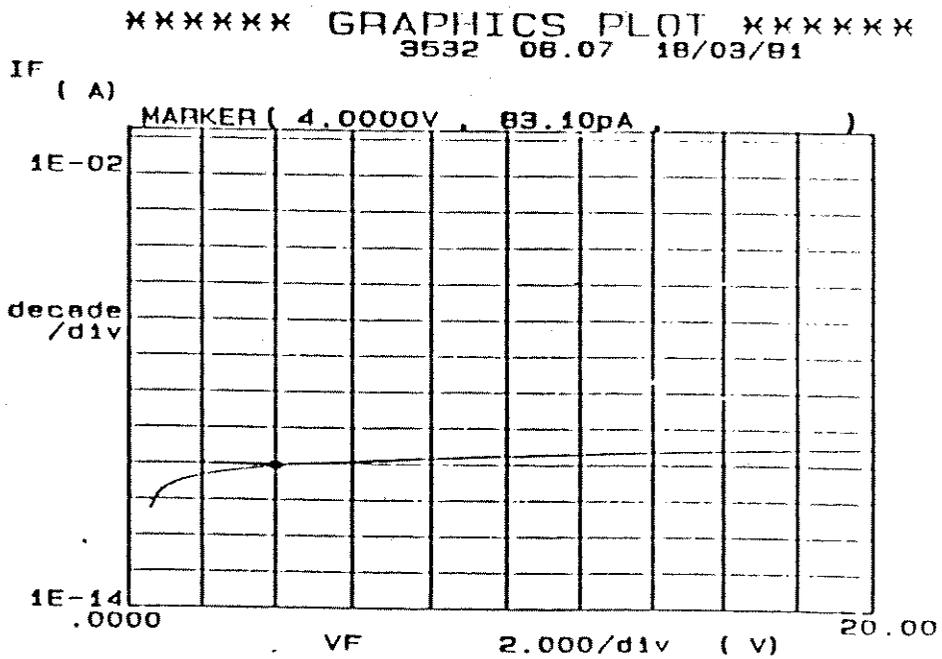


Figura 5.2: Característica corrente x tensão reversa [0, -20V].

A figura 5.3 apresenta uma característica de corrente de escuro versus tensão reversa que mostra a tensão de ruptura e as regiões da corrente de difusão, geração/recombinação e corrente de tunelamento, do valor da tensão de ruptura, 86V, e da equação 5.1 calculamos o valor da dopagem residual do InGaAs 3.10^{15}cm^{-3} .

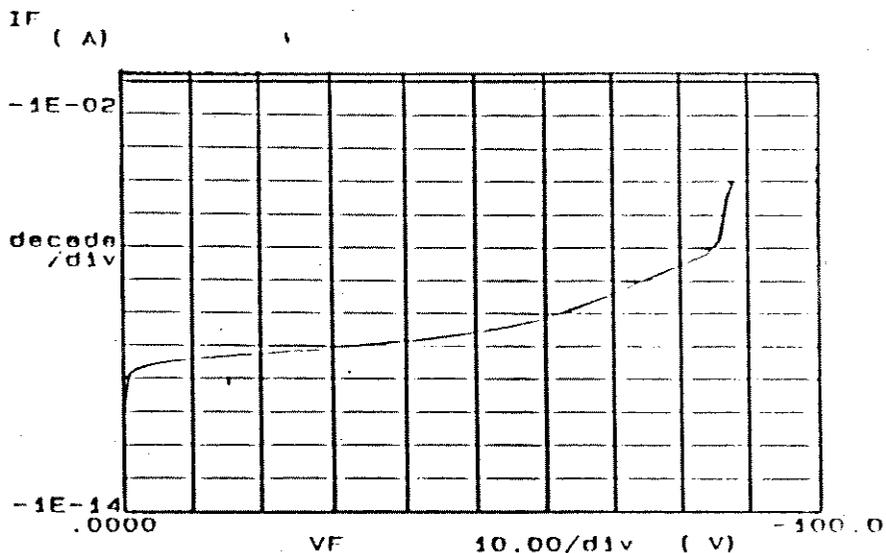


Figura 5.3: Característica reversa mostrando a região de ruptura da junção.

Os resultados das medidas de corrente de escuro, para tensões de -4V e -15V são impressos na forma de um mapa, conforme mostra a figura 5.4.

	1	3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1.2	0.5	2.3	1.3	0.3	70	22	22	22	.3n	3n	3n	3n	5n
	n	n	n	n	n	p	n	n	n	n	n	n	n	n
2	.2n	.2n	6.3	1.4	33	0.5	0.2	1.1	0.2	0.2	0.9	1.4	3.6	2.4
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
3	0.2	1.4	0.9	0.4	0.2	0.2	0.2	99	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3
	n	n	n	n	n	n	n	p	n	n	n	n	n	n
4	24	0.2	0.3	18	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	6.1	0.2	0.5
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
5	3.2	1.5	16	3.5	0.1	33	0.7	0.1	47	1.4	0.1	1.4	0.2	0.2
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
6	0.2	0.5	0.2	0.7	0.2	2.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.3	0.1	5n	1.1
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
7	0.2	0.2	3.6	6.6	0.6	2.4	6.7	0.2	0.1	0.1	3.0	0.2	0.3	0.5
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
8	0.1	0.2	0.2	6.3	1.0	1.2	22	1.8	0.2	5.1	1.1	14	0.6	0.2
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	90	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2
	n	n	n	n	n	n	n	n	p	n	n	n	n	n
10	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	2.9	0.2	0.2	0.2	0.2	8.6	0.1
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
11	Q	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	1.3	0.3	54	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	10	2n	10	6.2	3.1	0.4	0.6	0.9	1.0	0.8	1.2	1.2	1.3	1.8
	n	n	n	n	n	m	n	n	n	n	n	n	n	n
2	1.1	1.8	0.1	46	0.2	1.4	1.2	4.5	1.1	1.1	3.3	6.9	0.2	10
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
3	0.8	5.4	7.5	7.0	1.0	0.8	1.0	0.4	0.8	0.7	0.9	0.8	1.0	3.1
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
4	2.1	1.2	1.6	0.1	10	2.8	1n	1n	0.8	0.4	0.8	0.1	1.2	1.7
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
5	10	5.7	0.4	10	2.4	1.5	3.3	1.0	0.2	24	0.7	7.0	0.7	0.7
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
6	0.8	35	1.4	94	2.9	10	1.7	1.0	1.0	0.7	1.4	0.8	0.2	5.0
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
7	1.0	1.1	25	48	7.5	7.5	10	19	12	0.7	4.0	10	38	3.2
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
8	0.6	1.2	1.0	10	3.3	4.8	0.1	4.1	0.8	34	5.2	54	2.8	4.2
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
9	1n	1.1	1.1	1.2	0.8	1.5	0.7	0.7	0.5	0.8	13	26	4.3	13
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
10	1.0	1.2	1.0	1.2	0.3	1.4	0.7	18	0.7	0.8	6.7	0.7	32	0.6
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
11	Q	0.8	1.5	0.9	0.7	0.8	5m	3n	0.5	0.7	1.2	1.6	1.1	0.8
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n

Figura 5.4: Mapas da corrente de escuro (a) -4V, (b) -15V.

Os resultados de corrente de escuro são comparáveis aos previstos no capítulo de modelamento. Mostramos na figura 5.5 um resultado previsto pelo modelo com base nas dopagens medidas por perfil eletroquímico, e geometria medida por microscópio metalográfico. Os resultados calculados guardam boa concordância com os resultados experimentais.

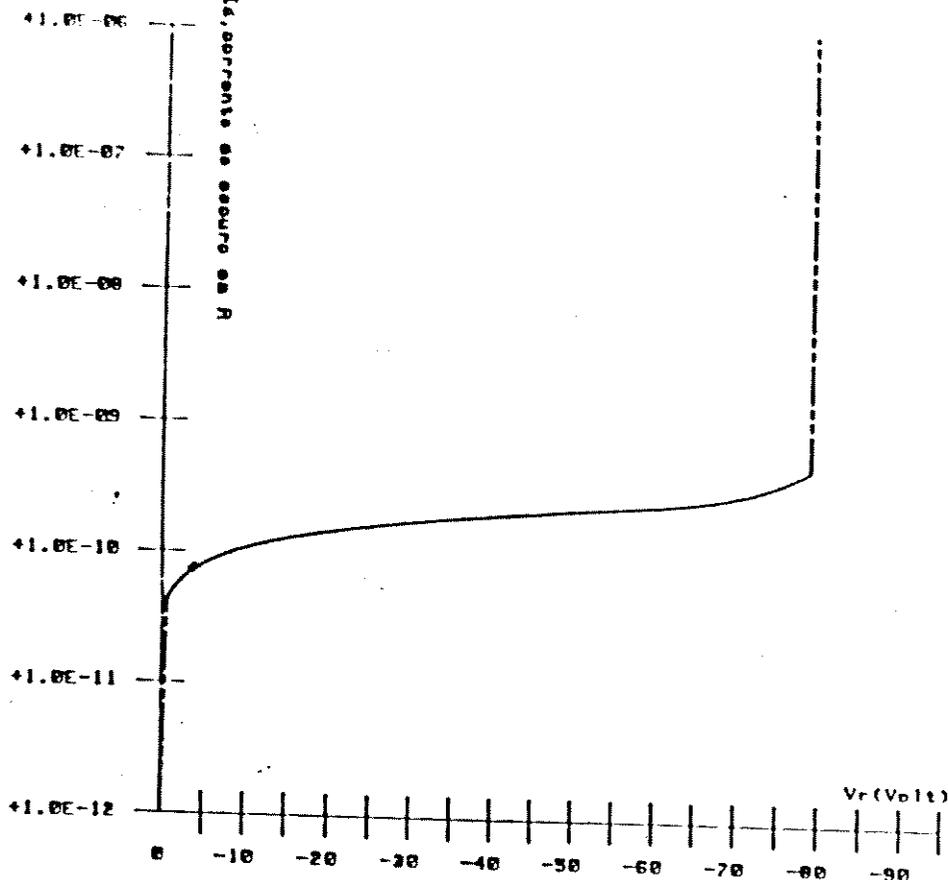


Figura 5.5: Característica IxV calculada com base no modelo para a corrente de escuro.

O modelo apresentado em 4.1 pressupõe que a geração-recombinação na superfície é desprezível face a geração-recombinação no material (bulk). Do ponto de vista experimental esta hipótese foi verificada construindo-se fotodetectores com diferentes diâmetros de junção e analisando-se a dependência da corrente de escuro com o diâmetro da junção. Para a dependência linear da corrente de escuro com o diâmetro corresponde a recombinação superficial uma vez que a corrente de recombinação superficial é proporcional ao perímetro da junção; já para a recombinação no material (bulk) a corrente de escuro é proporcional ao quadrado do diâmetro, ou a área da junção.

A figura 5.6 apresenta um mapa da corrente de escuro, medida a $-4V$, para fotodetectores com diâmetros de junção de $100\mu m$, $200\mu m$ e $300\mu m$. Neste "wafer" os fotodetectores não foram passivados com poliimida.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	10m	0.9μ	90μ 1	10m	0.4μ	2.8n	0.4 m	12μ	2.4n	2.6μ	2.7n	4.0 m	31n	3.9n	10m
2	4.8 m	0.7n	19μ	74n	0.6n	0.6n	0.6n	0.1μ	0.7n	10μ	0.7n	0.7n	0.7n	0.9n	0.9n
3	1.8n	18μ	0.1 m	1.5n	1.5n	1.6n	0.2 m	0.2 m	0.2 m	1.8n	1.8n	2.0n	1.9n	0.6μ	0.6μ
4	10m	3.0n	3.3n	3.1n	25μ	22μ	1.5 m	17μ	40μ	0.5n	3.2n	0.3 m	4.5 m	1.4 m	0.2 m
5	0.6n	0.5n	0.7n	0.7n	0.7n	0.8n	0.8n	9.4μ	57μ	0.9n	0.9n	1n	1μ	2n	12n
6	1.2n	1.6n	1.8n	1.7n	1.8n	2.2μ	0.2 m	8.4n	2.3n	0.5μ	19n	2.8n	3.2n	2.8 m	2.0n
7	10m	3.3n	0.3μ	3.6n	3.9n	0.2 m	2.2 m	5.6n	4.8n	0.2μ	55μ	14n	10μ	7.2n	6.0n
8	1.1n	0.6n	0.7n	0.8n	1.1n	1.6n	1.0n	1.6n	1.2n	1.9n	2.1n	2.9n	0.3 m	3.5n	3.2n
9	1.9n	0.5 m	2.2n	3.2n	5.3n	5.8n	5.6n	0.3μ	5.2n	6.6n	8.2n	31μ	11n	9.6n	11n
10	4.5 m	3.4n	5n	0.2μ	9.2n	0.3 m	16n	14n	1.7 m	14n	0.7μ	27n	56μ	32n	15n

Figura 5.6: Corrente de escuro medida a -4V para fotodetectores sem passivação.

A tabela 5.1 apresenta os valores médios de corrente de escuro para cada um dos diâmetros de junção. Para a obtenção das médias foram desprezados os fotodetectores com correntes de escuro excessiva, isto é, acima de 5nA para 100μm, acima de 10nA para 200μm e acima de 30nA para 300μm.

Diâmetro	Id	Desvio Padrão
100μm	0,73nA	0,21nA
200μm	2,4nA	0,20nA
300μm	5,80nA	0,73nA

Tabela 5.1: Valores médios de corrente de escuro a -4V, sem passivação.

Os valores típicos de corrente reversa medida a -4V para um “wafer” com fotodetectores de três diâmetros mas passivados com poliimida estão mostrados na figura 5.7.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0.5n	0.3n	0.3n	0.5n	3.1n	0.3n	0.3n	0.5μ	0.1μ	0.3n	0.3n	0.4n	0.3n	0.3n	2μ	1.0μ	2.3μ
2	0.6 m	1.3n	1.2n	1.2n	1.3n	1.3n	0.3 m	1m	1.3n	18n	1.7n	1.3n	0.4μ	2.7μ	1.3n	72n	1.4n
3	0.5μ	1.6n	3.0n	0.4μ	0.2μ	50n	3.1n	3.9μ	4.2n	3.0n	6.2n	3.1n	11n	0.3μ	0.3μ	22n	0.2μ
4	0.2 m	0.3n	0.2n	0.3n	0.3n	0.3n	0.3n	0.3n	1.3n	0.3n	0.3n	6.2n	0.3n	0.4n	0.3n	0.3n	6n
5	4.6n	1.2n	1.2n	3.3n	2.1n	1.6n	0.8μ	1.4n	1.3n	1.7n	1.4n	1.4n	1.3n	2.1n	1.3n	1.6n	0.1μ
6	10m	3.3n	4.2n	2.3μ	3.1n	3.2n	3.5n	3.2n	3.7n	3.5n	53n	3.2n	1.5μ	3.5n	65n	4.1n	13n
7	7.4μ	2.3μ	0.3n	0.5μ	0.4n	0.3n	0.4n	0.4n	0.4n	1.0n	32n	0.5n	0.3n	0.3n	0.3n	0.3n	33n
8	10m	0.3 m	1.3n	1.3n	1.4n	2.4n	2.6μ	1.3 m	1.3n	1.3n	1.3n	1.2n	2.7n	1.3n	1.2n	1.2n	1.3n
9	10m	0.3 m	3.0n	3.6n	3.0n	0.2μ	52n	6.7n	0.2n	3.4n	2.9μ	2.7μ	3.1n	3.3n	2.7n	0.6μ	3n
10	53μ	0.3n	0.3n	0.4n	0.3n	0.3n	0.3n	0.3n	0.3 m	0.5n	3.0μ	1.3 m	0.3n	0.2n	0.5μ	0.5n	10m

Figura 5.7: Corrente de escuro para três diâmetros de junção. Fotodetector passivado com polimida.

Os valores médios das correntes de escuro para cada um dos diâmetros esta mostrado na tabela 5.2.

Diâmetro	Id	Desvio padrão
100μm	0,50nA	0,37nA
200μm	1,70nA	0,49nA
300μm	3,96nA	0,89nA

Tabela 5.2: Valores médios de corrente de escuro para fotodetectores passivados.

Aproximando os dados da tabela 5.2 por uma função do tipo ax^2+bx+c a dependência da corrente de escuro com o diâmetro será dada pela equação empírica 5.2.

$$I_d = 6,0510^{-5}d^2 + 7,7910^{-4}d + 2,0510^{-3} \quad (5.1)$$

Para :

d = diâmetro da junção em micron

I_d = corrente de escuro em nA

Os resultados experimentais correspondentes a fabricação de fotodetecores pin na estrutura mesa coberta, passivado com poliimida, também podem ser aproximados por uma função quadrática do tipo ax^2+bx+c , obtendo-se a equação empírica 5.3.

$$I_d = 4,0710^{-5}d^2 + 7,8310^{-4} d + 3,7710^{-3} \quad (5.3)$$

Para :

d = diâmetro da junção em micron

I_d = corrente de escuro em nA.

A equação 5.2 mostra que a corrente de escuro tem um comportamento predominantemente quadrático com o diâmetro. Por exemplo: para 100 μ m de diâmetro a componente quadrática corresponde a aproximadamente 88% da corrente total, a componente linear a 11% e a componente independente do diâmetro a 1%.

A passivação por poliimida não altera este resultado. Para uma junção de 100 μ m de diâmetro a componente quadrática corresponde a 83% da corrente total, a componente linear com o diâmetro a 16% e a componente independente do diâmetro a 1%. Este resultado mostra que após a passivação com poliimida a corrente de escuro é essencialmente dependente da área do fotodetector, ou seja uma corrente de geração/recombinação do material (bulk). Notamos também um pequeno aumento da influência da componente linear com o diâmetro, isto é da corrente de recombinação superficial.

5.1.2 VARIAÇÃO COM TEMPERATURA

A proporção que a temperatura aumenta (acima da temperatura ambiente) esperamos que haja uma crescente predominância da corrente de difusão térmica que se caracteriza por uma diminuição da dependência da corrente de escuro com a tensão . Para uma corrente puramente de difusão térmica não esperamos que haja variação da corrente de escuro com a tensão

A figura 5.8 mostra resultados experimentais de caracterização reversa para diferentes temperaturas. A temperatura inicial é de 40°C com variação de 30°C em 30°C.

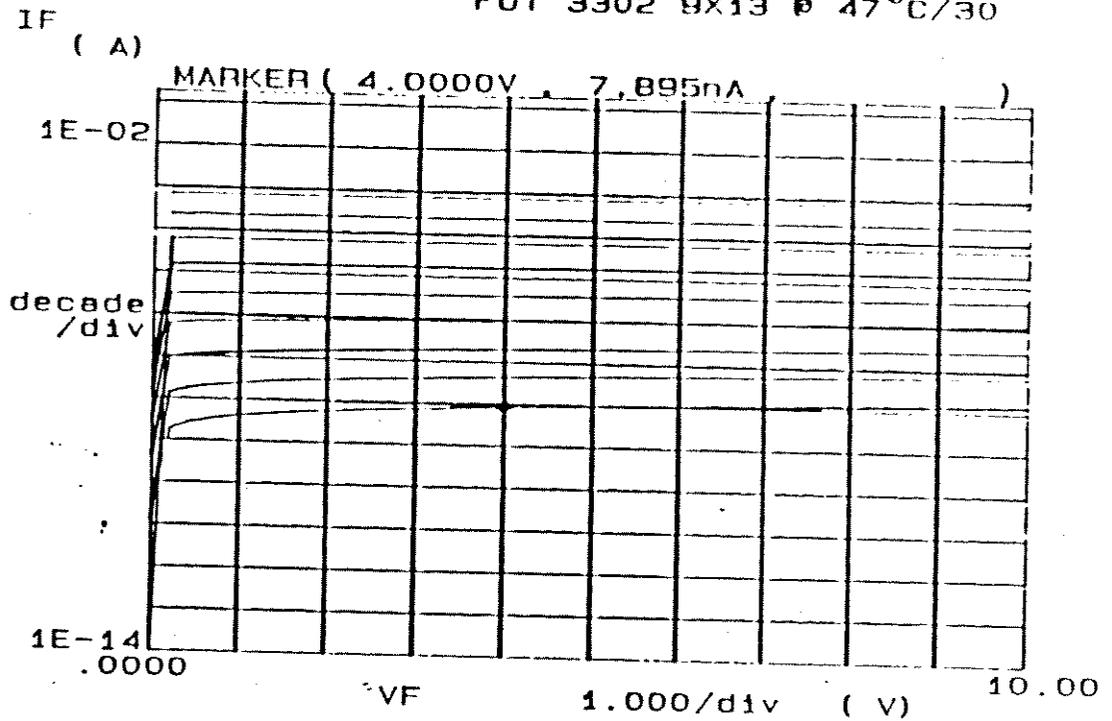


Figura 5.8: Característica IxV para diferentes temperaturas.

Observamos da figura 5.8 que acima de 150°C a corrente praticamente não depende da tensão caracterizando-se como uma corrente puramente de difusão térmica.

5.1.3 CAPACITÂNCIA

A capacitância foi medida com um arranjo experimental semelhante ao da figura 5.1. A este conjunto de instrumento foi acrescentado um capacitômetro analógico Boonton resultando no arranjo experimental mostrado na figura 5.9

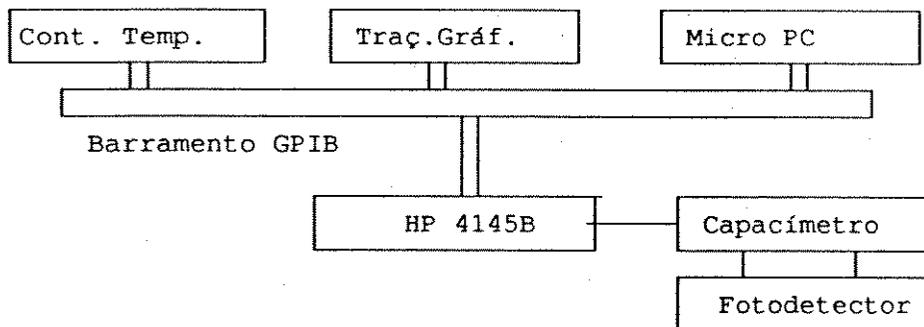


Figura 5.9: Arranjo experimental para medida da capacitância em função da tensão

O HP4145B provê varredura em tensão para a medida da capacitância. O capacitômetro tem uma tensão DC de saída proporcional ao valor da capacitância que é lida pelo voltímetro do

HP4145B. Mostramos na figura 5.10 um gráfico da capacitância versus tens V_0 para um fotodetector pin em InGaAs/InP crescido por LPE. O fotodetector medido representa, tipicamente o valor obtido em vários outros fotodetectores, tem diâmetro de junção de $85\mu\text{m}$ e dopagem residual de $5 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}$ no InGaAs e $7 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}$ no InP. Na figura 5.10 foram colocados além dos pontos experimentais valores calculados pela equação 4.18. Para este cálculo a dopagem residual do binário foi estimada em $7 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}$ e a do ternário em $5 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}$, o diâmetro da junção no binário em $85\mu\text{m}$ e no ternário em $55\mu\text{m}$. Observamos uma boa concordância entre os valores experimentais e os valores teóricos.

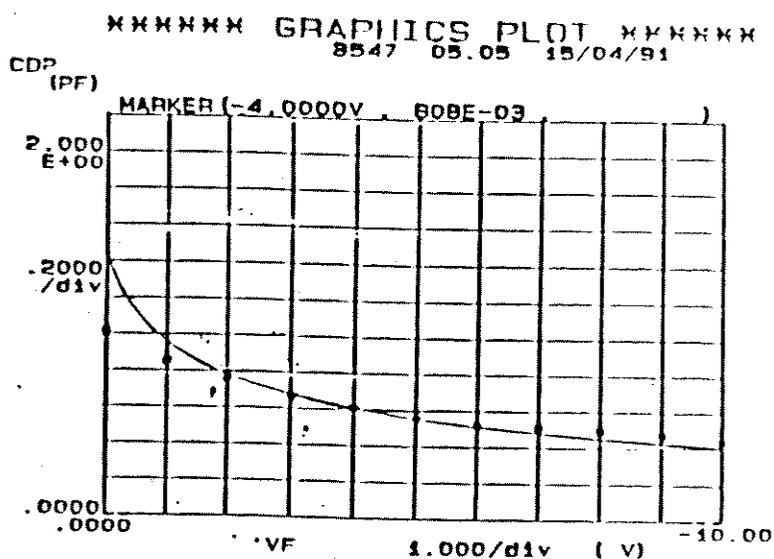


Figura 5.10: Curva experimental da capacitância versus tensão. Os pontos marcados com foram calculados pela equação 4.18.

5.1.4 RESPONSIVIDADE

A medida da responsividade deve nos permitir avaliar a razão de conversão de luz em corrente elétrica, para um dado comprimento de onda. Desta forma será possível determinar a faixa espectral para a qual o fotodetector é sensível. O arranjo experimental de medida da responsividade em função do comprimento de onda está mostrado na figura 5.11.

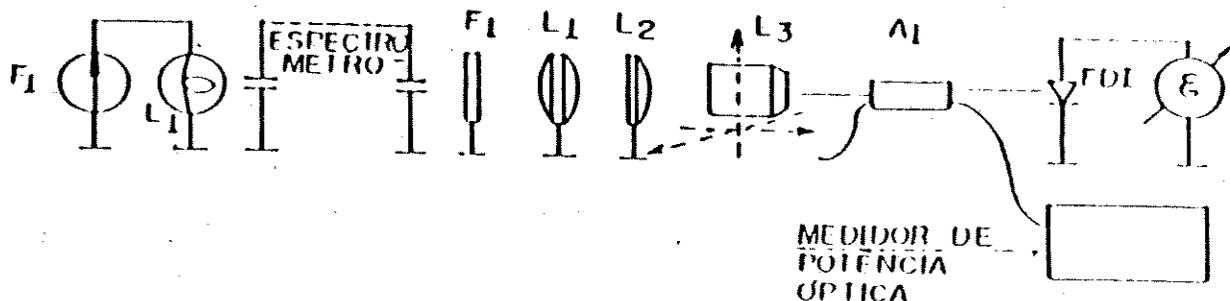


Figura 5.11: Arranjo experimental para medição de responsividade.

A iluminação do fotodetector é feita através de uma fonte de luz formada por uma lâmpada de tungstênio e um espectrômetro. Com este arranjo a potência útil incidente no fotodetector é pequena, na faixa de dezenas de nW. A medição da fotocorrente foi feita com um eletrômetro Keytley-610C. De modo a evitar que luz devido a difração de segunda ordem no espectrômetro esteja presente na medição usamos um filtro óptico, f_1 , que estabelece o comprimento de onda mínimo em 800nm. L_1 e L_2 são lentes usadas para colimar o feixe de luz, e L_3 é uma objetiva que acopla o feixe colimado a fibra de um dos ramos de um acoplador óptico multimodo. Este acoplador nos permitirá a medição da potência incidente e da potência refletida no fotodetector. Usando o arranjo experimental da figura 5.11 foi medida a responsividade em função do comprimento de onda para fotodetectores sem camada anti-reflexiva. Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 5.3.

Comprimento de onda	Ifot (nA)	Potência (nW)	R (A/W)
1000 nm	0,70	1,69	0,41
1050 nm	2,50	3,18	0,79
1100 nm	3,70	4,80	0,77
1150 nm	5,20	7,12	0,73
1200 nm	4,70	6,71	0,70
1250 nm	7,10	10,44	0,68
1300 nm	7,50	11,19	0,67
1350 nm	7,70	11,32	0,68
1400 nm	6,30	9,40	0,67
1450 nm	7,20	11,25	0,64
1500 nm	7,80	10,68	0,73
1550 nm	7,80	11,40	0,68
1600 nm	7,80	11,25	0,69
1650 nm	7,40	11,00	0,67
1700 nm	5,90	11,00	0,53
1750 nm	0,50	11,00	0,045
1800 nm	0,00	1,0	0,00

Tabela 5.3: Valores experimentais para cálculo da responsividade em função do comprimento de onda.

A figura 5.12 apresenta na forma de gráficos os resultados da medida de responsividade. Observamos, próximo a 1100nm, um valor elevado de responsividade que é atribuído a absorção no InP e não é desejável ao funcionamento do fotodetector. A medida que o comprimento de onda aumenta a absorção no InP torna-se desprezível e o fotodiodo em 1300nm tem uma responsividade compatível com a estrutura e que pode ser calculada pela equação 1.9. Fótons com comprimento de onda superior a 1700nm não têm energia suficiente para serem absorvidos no InGaAs o que resulta em fotocorrente praticamente nula.

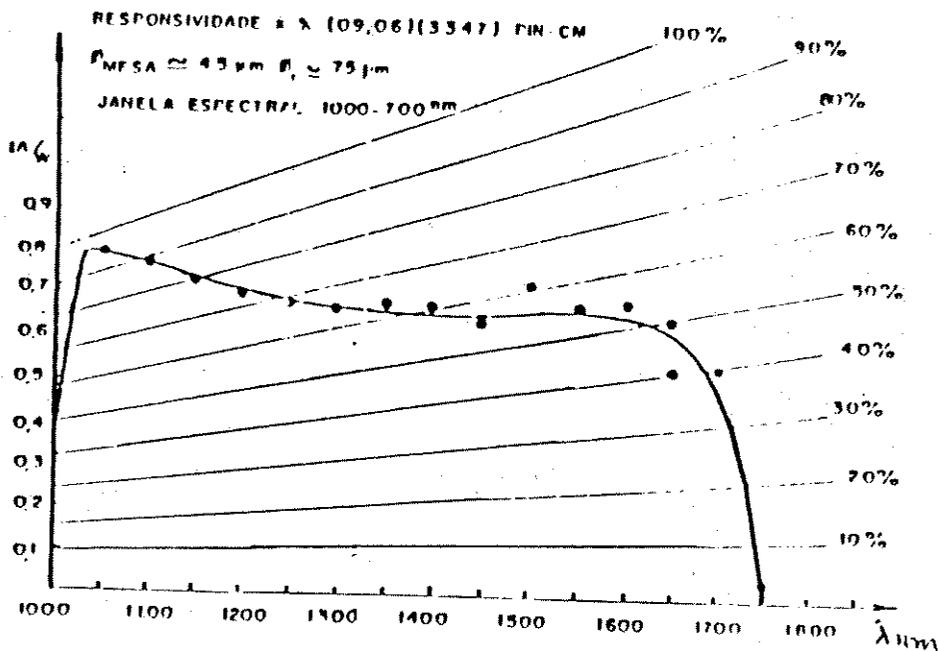


Figura 5.12: Variação da responsividade com o comprimento de onda.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA

5.2.1 TÉCNICAS DE MEDIDA

A caracterização dinâmica de fotodetectores consiste em medirmos a resposta em frequência do fotodetector. Esta medida pode ser feita de forma direta, com uma fonte de luz modulada em intensidade cuja frequência de modulação é variável, ou indiretamente, através da transformada de Fourier de uma resposta a um impulso.

A caracterização por via direta apresenta duas alternativas de implementação:

- i) Fonte de luz cuja resposta em frequência é conhecida.
- ii) Batimento de dois ou mais sinais ópticos.

Na caracterização direta da resposta em frequência observamos duas dificuldades básicas:

- i) Lasers que tenham resposta em frequência suficientemente alta para permitir a medida da resposta em frequência do fotodetector
- ii) Estabilidade dos feixes ópticos de lasers semicondutores de modo a permitir o batimento de forma controlada.

Na caracterização indireta a principal limitação é a dificuldade em conhecermos a forma do pulso de resposta para podermos calcular de maneira precisa sua transformada de Fourier.

A medida da resposta em frequência de fotodetectores pelo batimento de dois feixes de luz foi proposta inicialmente por Piccari e colaboradores [2] e consiste em se combinar dois feixes de luz monocromática em dois comprimentos de onda diferentes, λ_1 e λ_2 , e incidí-los sobre o fotodetector sob teste. Como a fotocorrente resultante é proporcional ao módulo quadrático da soma dos campos, o batimento resultará em duas frequências :

- i) Soma das frequências (c/λ_1 e c/λ_2)
- ii) Diferença das frequências (c/λ_1 e c/λ_2).

Controlando precisamente os comprimentos de onda emitidos, de maneira a fixar um dos comprimentos de onda e variar o outro, podemos determinar a resposta em frequência do fotodetector pin. O arranjo experimental da medida de resposta em frequência pelo batimento de dois feixes esta mostrado na figura 5.13.

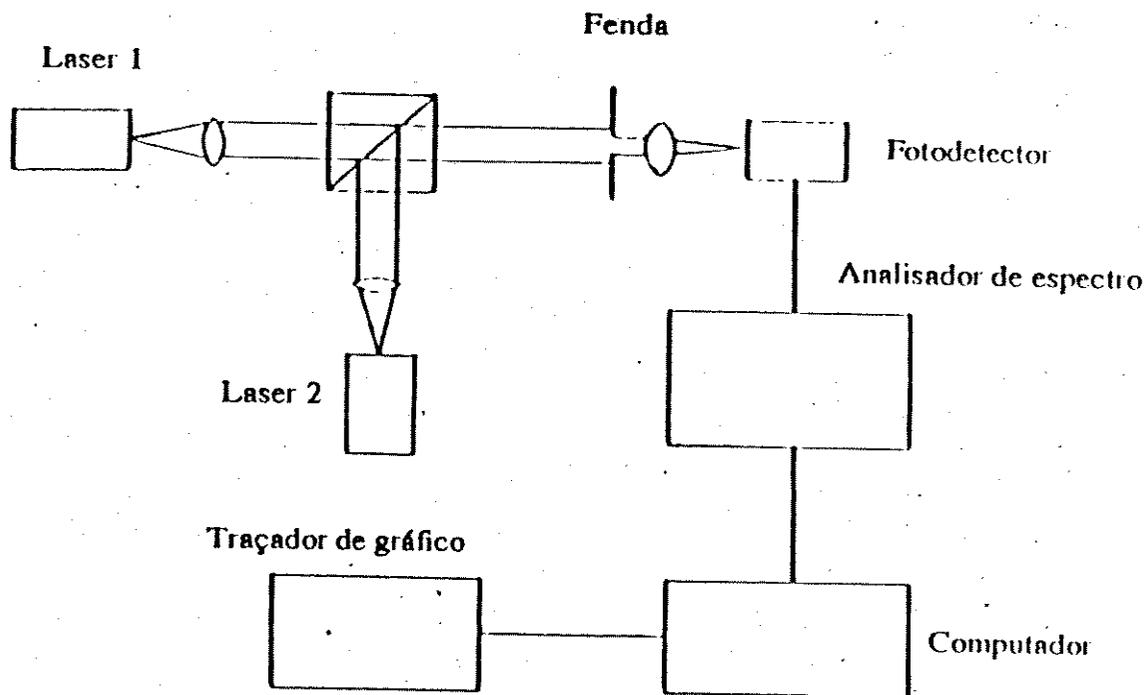


Figura 5.13: Arranjo experimental para medição da resposta em frequência pelo método do batimento de dois feixes de luz monocromática.

Uma variante da técnica de batimento de dois feixes de luz é a técnica que se baseia na conversão FM-AM através de um interferômetro [3]. A figura 5.18 ilustra a técnica de medição da resposta em frequência pela conversão FM-AM em interferômetro. A modulação em intensidade sobre o laser DFB provoca uma modulação em frequência na luz emitida [4] e portanto uma modulação em frequência do campo. O campo emitido incide em um

interferômetro cuja diferença no tempo de propagação entre os diferentes caminhos ópticos é um múltiplo do período do sinal que modula o laser, desta forma são transmitidos pelo interferômetro e fazem batimento no fotodetector sinais ópticos de comprimento de onda ligeiramente diferente. A amplitude da fotocorrente resultante do batimento dos campos transmitidos é:

$$I_{\text{fot}} = 1/2C |E(t) + E(t-\tau)|^2 \quad (5.2)$$

Como as amplitudes do campo $E(t)$ e $E(t-\tau)$ não variam, as variações em amplitude, em função da frequência na fotocorrente, observadas através de um analisador de espectro elétrico serão atribuídas a resposta em frequência do fotodetector e sua montagem.

Alternativamente a medida da resposta em frequência pelo batimento de luz monocromática de comprimentos de onda diferente, quer de fontes diferentes quer através de interferômetros, podemos usar o espectro de ruído branco gerado pelo batimento da emissão espontânea amplificada proveniente de amplificadores ópticos [5].

5.2.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As medidas de resposta em frequência dos fotodetectores, neste trabalho, foram feitas através de duas técnicas:

- i) Medida direta com uma fonte de luz cuja resposta em frequência é previamente conhecida.
- ii) Medida por batimento : Conversão FM-AM e batimento de emissão espontânea amplificada.

Para a medida da resposta em frequência o fotodetector foi soldado em um pequeno suporte cerâmico, conforme ilustra a figura 5.14.

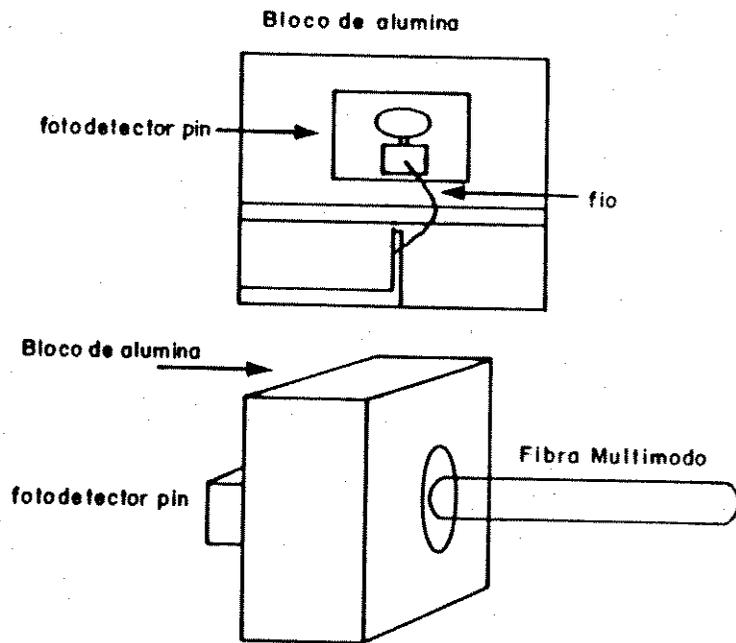


Figura 5.14: Fotodetector soldado em suporte cerâmico.

Este conjunto foi montado em um bloco metálico cujo acesso elétrico foi feito através de microlinha casa de 50Ω e conector SMA, conforme esta mostrado na figura 5.15.

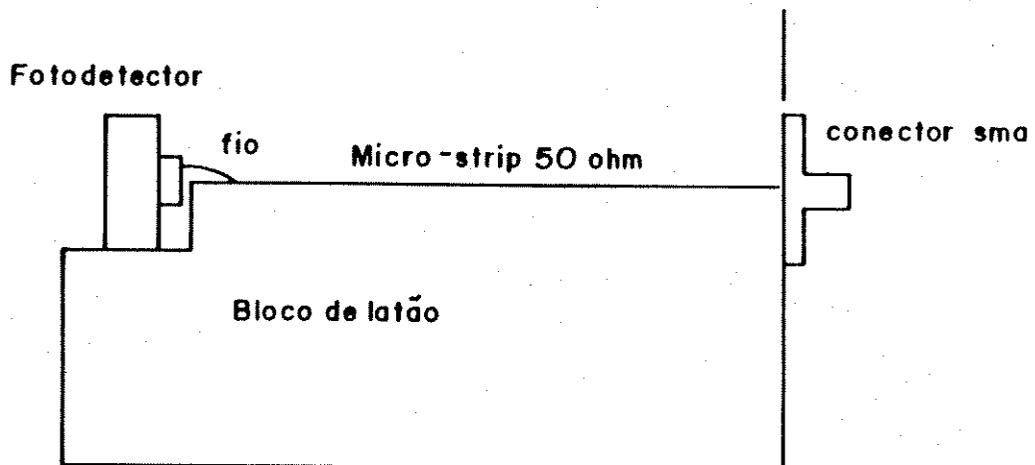


Figura 5.15: Conjunto para medida da resposta em frequência.

A medida da resposta em frequência do fotodetector pin com fonte óptica de resposta em frequência conhecida foi feita com um analisador de componentes ópticos HP8702, cujo arranjo experimental de medida esta mostrado na figura 5.16.

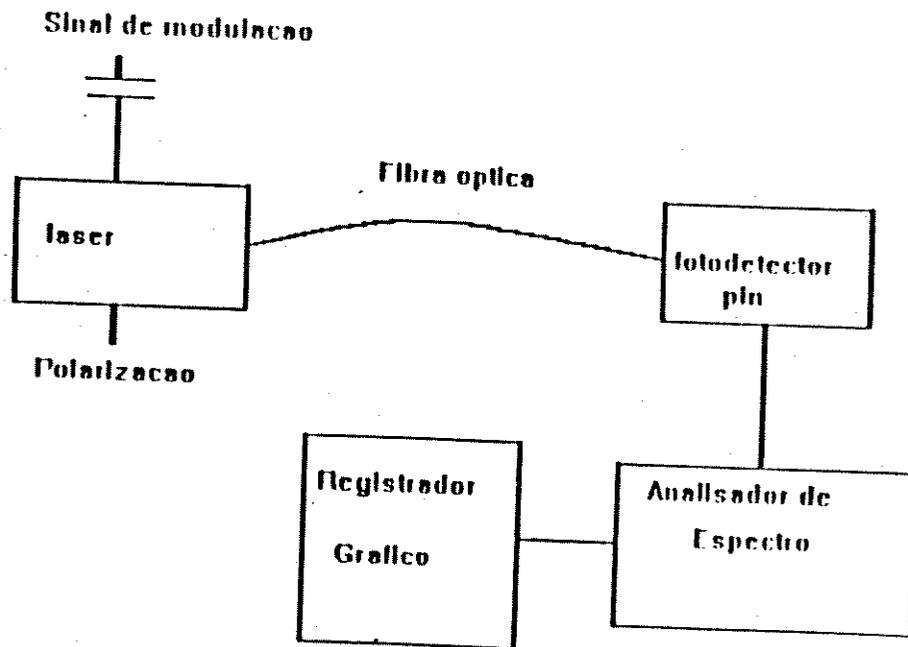


Figura 5.16: Arranjo experimental para medida da resposta em frequência através de fonte óptica com resposta em frequência conhecida.

A figura 5.17 mostra os resultados da medida de resposta em frequência do fotodetector pin submontado, pelo método da fonte óptica de resposta em frequência conhecida. Bandas passantes superiores a 6 GHz foram observadas para polarização reversa da ordem de $-6V$.

A figura 5.18 apresenta o arranjo experimental para medida da resposta em frequência pelo método interferométrico convertendo FM óptico em AM elétrico no fotodetector pin.

Os resultados experimentais da medida de resposta em frequência pelo método interferométrico estão mostrados na figura 5.19. As medidas foram realizadas para quatro polarizações diferentes: $0V$, $-2V$, $-4V$, $-6V$.

Sabemos da equação 4.18 que a capacitância de um fotodetector pin é inversamente proporcional a tensão reversa aplicada e sabemos também que a resposta em frequência é afetada pela capacitância do fotodetector. Constatamos através das medidas apresentadas na figura 5.17 e 5.19 que há um aumento da frequência de corte a medida que a polarização reversa aumenta uma vez que a capacitância esta diminuindo.

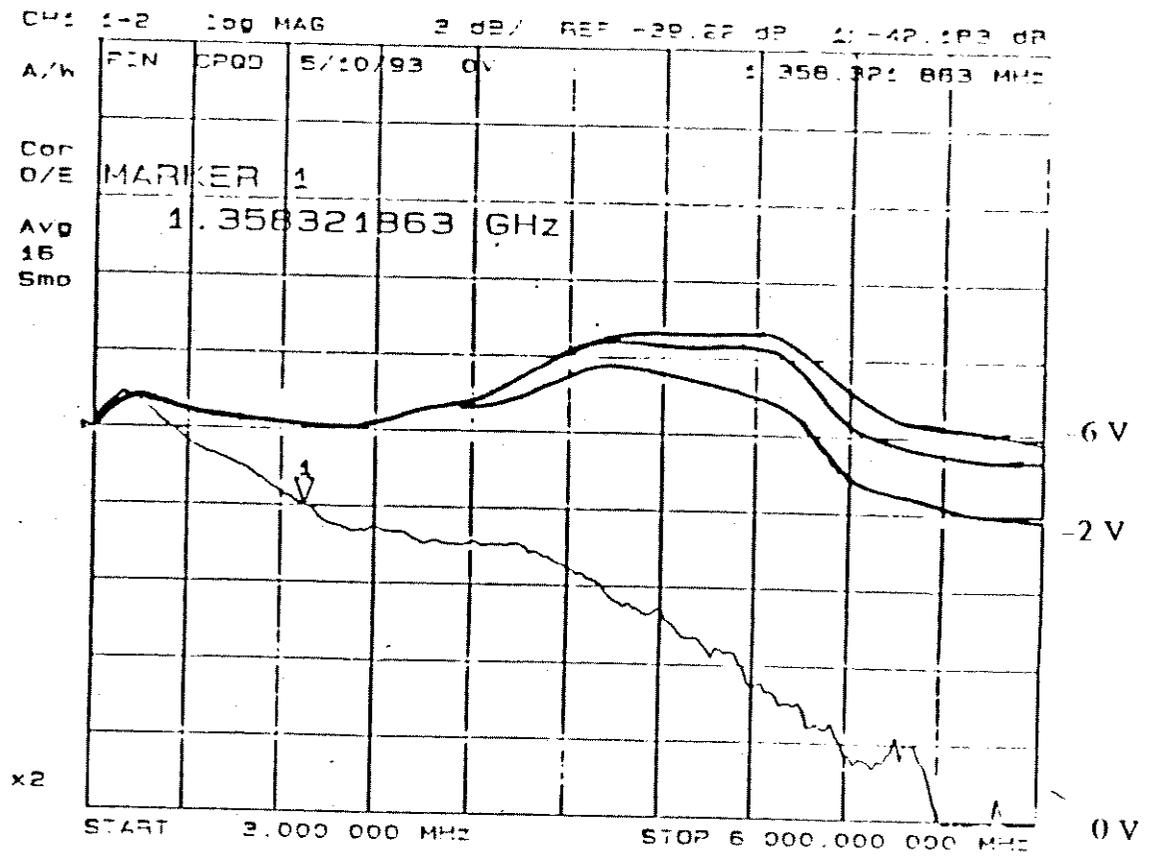


Figura 5.17: Resposta em frequência medida pela técnica da fonte óptica de resposta em frequência conhecida.

A medida da resposta em frequência pela conversão FM-AM foi realizada seguindo-se a abordagem proposta por Wang e co-autores [6] cujo diagrama esquemático esta mostrado na figura 5.18.

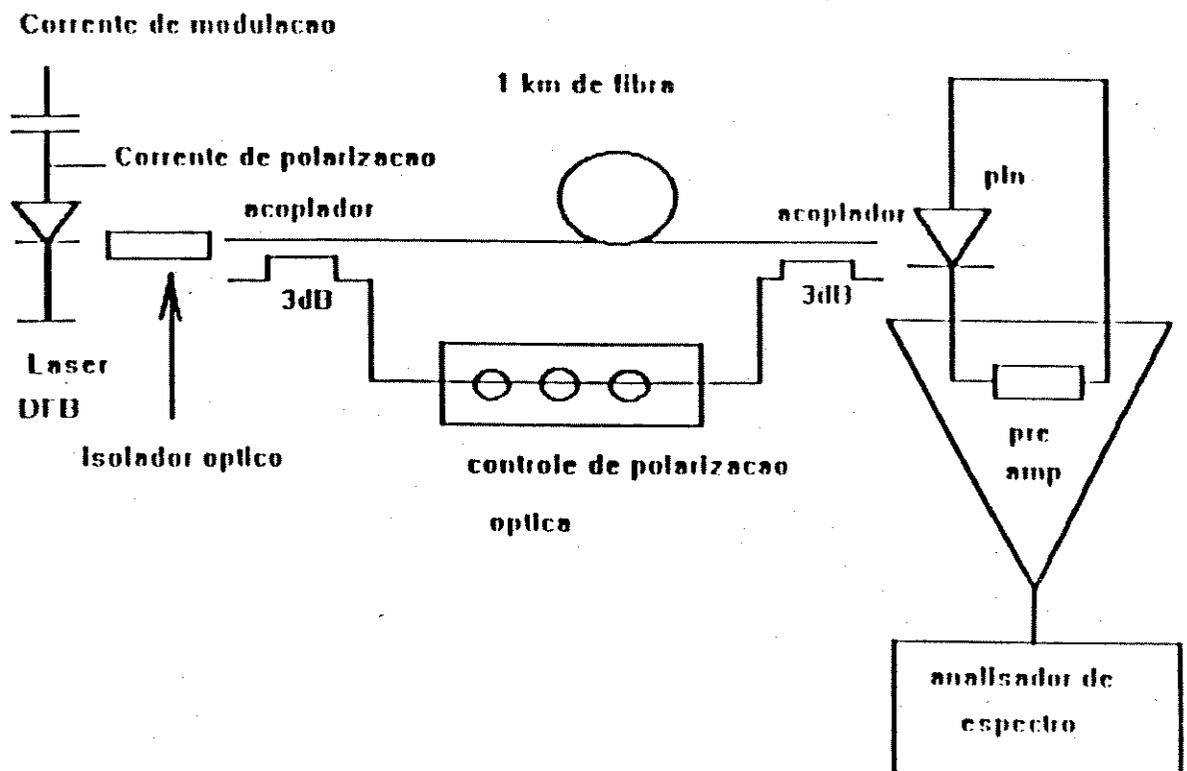


Figura 5.18: Arranjo experimental para medida da resposta em frequência pela técnica da conversão FM-AM.

As medidas de resposta em frequência pela conversão FM-AM em interferômetro foram realizadas até 3GHz, devido a limitações na relação sinal/ruído do analisador de espectro elétrico. Os resultados de caracterização estão mostrados na figura 5.19. Observamos uma boa concordância quantitativa com os resultados obtidos com uma fonte óptica de resposta em frequência conhecida.

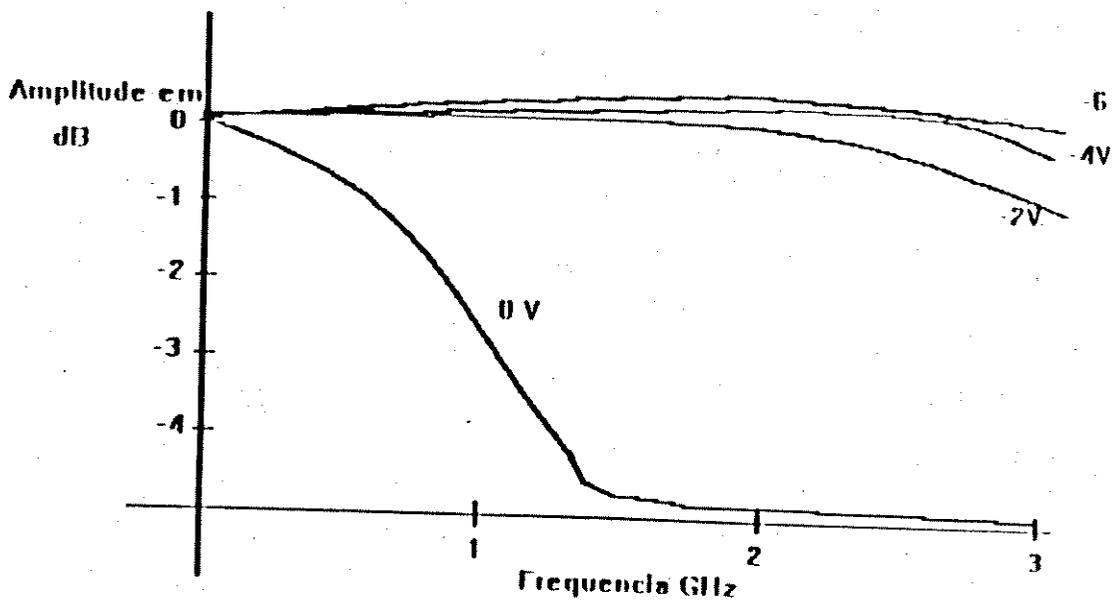


Figura 5.19: Resultados experimentais de resposta em frequência obtidos pela medida interferométrica.

A referência [5] propõe a medida da resposta em frequência de fotodetectores pelo batimento da emissão espontânea amplificada de amplificadores ópticos semicondutores. Embora o princípio básico da medida seja o mesmo, neste trabalho a resposta em frequência foi medida pelo batimento da emissão espontânea de um amplificador óptico a fibra dopada com érbio. O arranjo experimental da medida está mostrado na figura 5.20.

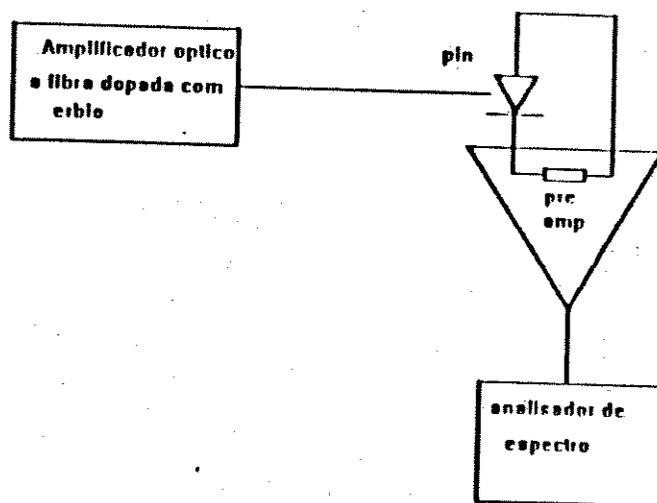


Figura 5.20: Arranjo experimental para medida da resposta em frequência do fotodiodo por batimento da emissão espontânea amplificada.

Os resultados experimentais obtidos com o mesmo fotodetector são semelhantes aos obtidos usando as outras duas técnicas mencionadas, estes resultados estão mostrados na figura 5.21.

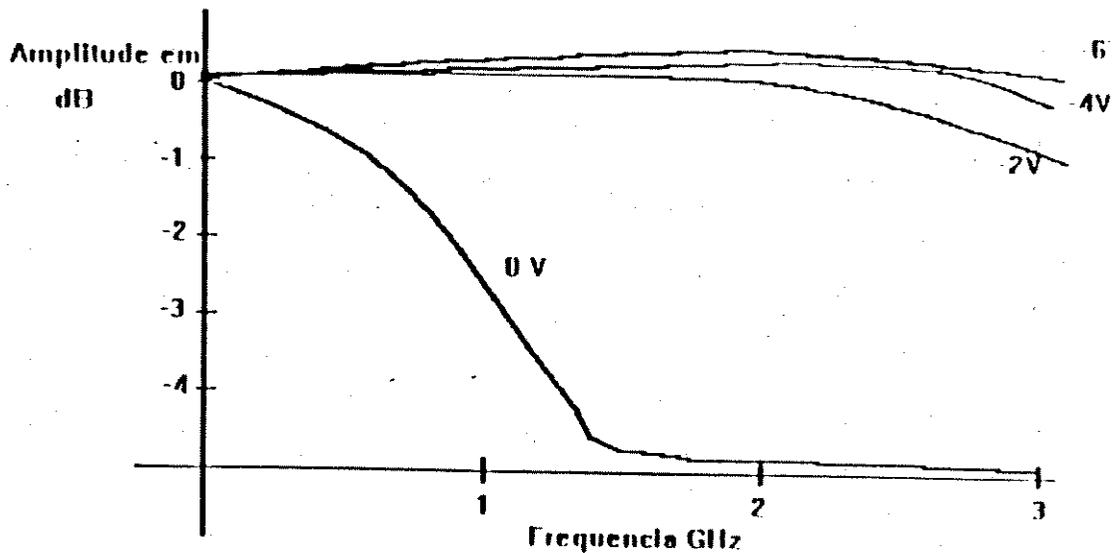


Figura 5.21: Resultados experimentais da medida de resposta em frequência através do batimento da emissão espontânea amplificada.

É importante avaliarmos em que medida os resultados experimentais mostram limitação do fotodetector, por exemplo tempo de trânsito, ou dos componentes reativos parasitários associados a montagem. Para tanto calculamos a resposta em frequência através de um modelo de circuito elétrico e do simulador spice. O modelo de circuito elétrico para análise da resposta em frequência do fotodetector está mostrado na figura 5.22. Neste modelo a fonte de corrente I_{det} modela a conversão optoelétrica, R_{sh} modela a corrente de fuga na polarização reversa, C_{det} modela a capacitância do fotodetector, R_s é a resistência em série com o fotodiodo, L_{fio} é a indutância do fio que liga o fotodetector ao "chip-carrier" cerâmico, C_{mont} é a capacitância do "chip-carrier" cerâmico e L_{mont} a indutância do fio que liga o "chip-carrier" a microlinha de acesso ao fotodetector.

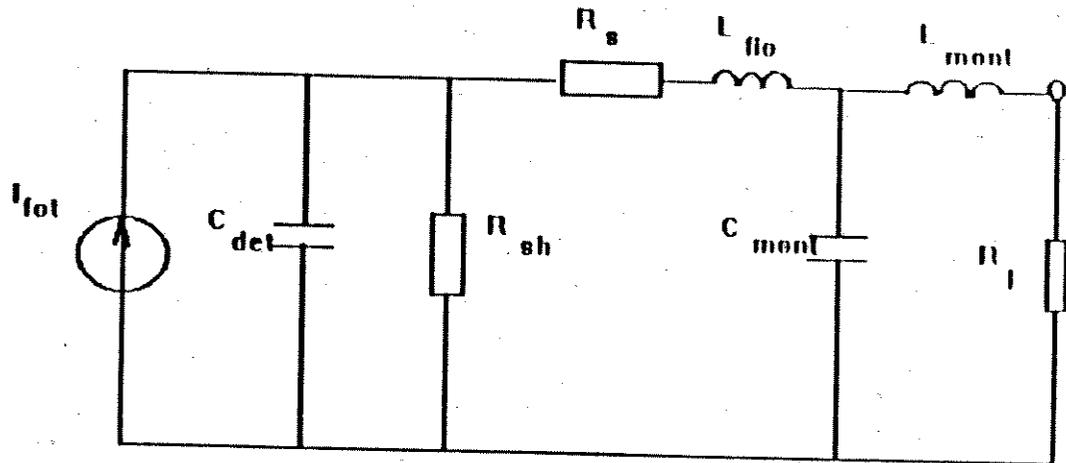


Figura 5.22: Modelo de circuito elétrico para fotodetector pin submontado e acoplado a uma carga de 50Ω .

Os valores usados na simulação foram obtidos dos componentes nos quais se mediu a resposta em frequência:

- Fotocorrente $1\mu\text{A}$,
- $R_{sh} = 4\text{V}/10\text{pA} = 410^{11}\Omega$,
- $C_{det} = 0,4\text{pF}$
- $R_s = 30\Omega$
- $L_{fio} = 1\text{nH}$
- $C_{mont} = 0,1\text{pF}$
- $L_{mont} = 1\text{nH}$
- $R_l = 50\Omega$.

A figura 5.23 mostra o resultado de simulação da resposta em frequência para indutância de montagem de 1nH (a) e (b) para 3nH .

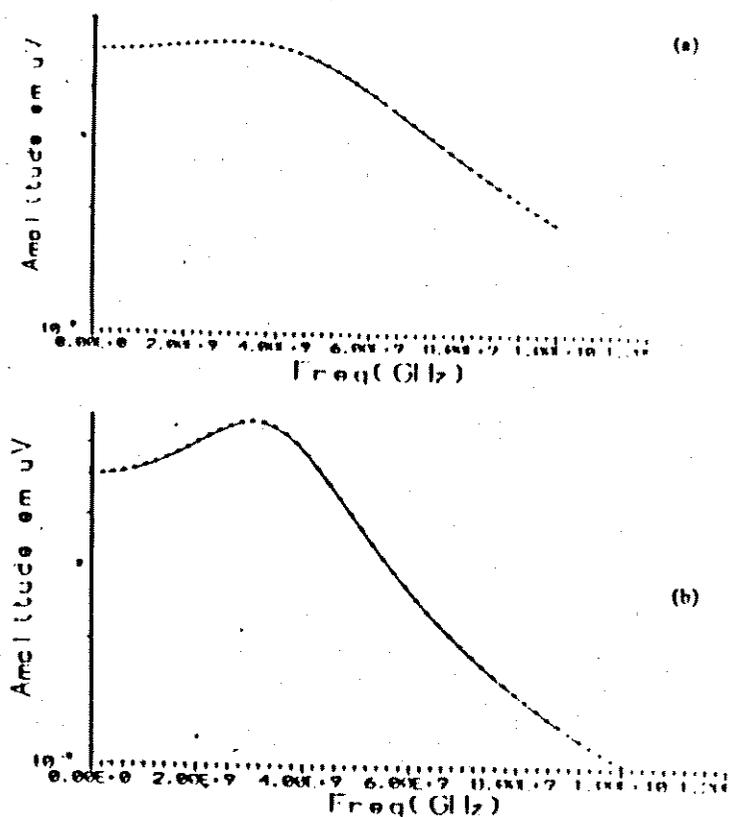


Figura 5.23: Resposta em frequência obtida por simulação no spice. (a) Indutância de montagem de 1nH. (b) Indutância de montagem de 3nH

Destes resultados verifica-se o forte peso que a montagem, principalmente a indutância, tem na resposta em frequência do fotodetector. Observa-se também a concordância que as medidas de resposta em frequência guardam com a simulação, o que nos induz a afirmar que a resposta em frequência pode ser aumentada pela otimização da montagem, e que a limitação imposta pelo tempo de trânsito fica desprezível face as limitações impostas pela montagem.

5.3 REFERÊNCIAS

1. S. M. Sze, "Physics of semiconductor devices", John Willey & Sons, 1981.
2. L. Piccari e S. Spano, "New method for measuring ultrawide frequency response of optical detectors", Electronics Letters, vol 18, n 13, 1982.
3. E. Einchen e A. Silletti, "Bandwidth Measurements of ultrahigh frequency optical detectors using interferometric FM sideband technique", Journal of Lightwave Technology, vol 1t-15,n 10, 1987.
4. R. Linke, " Modulation induced transient chirping in single frequency lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-21, n6, 1985.

5. E. Einchen, J. Schlafer, W. Rideout, J. McCabe, "Wide bandwidth receiver/photodetector frequency response measurements using amplified spontaneous emission from a semiconductor optical amplifier", *Journal of Lightwave Technology*, vol 8, n 6, 1990.
6. J Wang, V. Krüger, B. Schwarz, K. Petermann, "Measurements of frequency response of photoreceivers using self-homodyne method", *Electronics Letters*, vol 25, n 11, 1989.

Capítulo 6

CONFIABILIDADE

A análise dos dados de teste de vida acelerado por temperatura em dispositivos eletrônicos deve ser feita através da distribuição log-normal [1], no entanto o entendimento dos fenômenos físicos que levam os mecanismos de falha a seguirem uma distribuição log-normal não está completamente estabelecidos.

Reynolds [1] sugere que este fato é uma consequência dos mecanismos de falha seguirem a lei de Arrhenius. Neste capítulo apresentaremos as funções estatísticas associadas a distribuição log-normal, que serão empregadas na análise dos dados de teste de vida acelerado bem como os resultados experimentais obtidos com testes de vida acelerado por temperatura em fotodiodos pin na estrutura mesa coberta descrita em 3.3.

6.1 FUNÇÕES ESTATÍSTICAS

As funções estatísticas importantes à análise dos dados de teste de vida através de uma distribuição qualquer são:

- Função de densidade de probabilidade
- Função de falha acumulada
- Função de confiabilidade
- Taxa de falha.

6.1.1 FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE

Para uma dada variável aleatória, por exemplo o tempo, t , a função de densidade de probabilidade é definida como sendo a função que exprime, no intervalo de tempo dt , a probabilidade, $f(t).d(t)$, que um dispositivo tem de falhar no intervalo $[t,t+dt]$. A função de densidade de probabilidade de falha, para a distribuição log-normal, é dada por [2]:

$$f(t) = e^{[-1/\sigma^2 \cdot \ln(t/t_m)^2]} / (t \cdot \sigma \cdot (2\pi)^{1/2}) \quad (6.1)$$

Onde:

t = tempo, variável aleatória,

t_m = tempo médio de vida

σ = desvio padrão.

6.1.2 FUNÇÃO DE FALHA ACUMULADA

A função de falha acumulada $Q(t)$ exprime a probabilidade de um dispositivo falhar em um tempo menor que t. De uma forma geral $Q(t)$ é dada por:

$$Q(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (6.2)$$

Substituindo (6.2) em (6.1) temos:

$$Q(t) = \int_0^t e^{[-1/\sigma^2 \cdot \ln(t/t_m)^2]} / (t \cdot \sigma \cdot (2 \cdot \pi)^{1/2}) \cdot dt \quad (6.3)$$

Que pode ser escrita na forma:

$$Q(t) = [1 + \operatorname{erf}(1 / (2^{0.5} \cdot \sigma) \cdot \ln(t/t_m))] \quad (6.4)$$

Com :

$$\operatorname{erf}(z) = 2/\pi^{0.5} \int_0^z e^{-\delta^2} d\delta \quad (6.5)$$

6.1.3 FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE

A função de confiabilidade $R(t)$ exprime a probabilidade de um dispositivo funcionar corretamente por t unidades de tempo.

$$R(t) = 1 - Q(t) \quad (6.6)$$

Substituindo (6.4) em (6.6) temos :

$$R(t) = 1/2 \operatorname{erfc}((1/(\sqrt{2} \cdot \sigma) \cdot \ln(t/t_m))) \quad (6.7)$$

Pois :

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) \quad (6.8)$$

A função de erro complementar pode ser aproximada pelo algoritmo proposto em [3]:

$$\text{erfc}(z) = 1/(1 + \sum_1^6 a_n z^n)^{16} \quad (6.9)$$

Com os coeficientes a_n dados em [3].

6.1.4 TAXA DE FALHA

A taxa de falha $\lambda(t)$ é uma função tal que $\lambda(t).dt$ nos dá a probabilidade de um dispositivo falhar no intervalo de tempo dt , dado que ele sobreviveu um período t .

$$\lambda(t) = f(t)/(1 - Q(t)) \quad (6.10)$$

Para a distribuição log-normal :

$$\lambda(t) = (\sqrt{2}.\exp(-1/(2.\sigma^2).(\ln(t/t_m)^2)))/(\sqrt{\pi}.t.\sigma.\text{erfc}((1/(1.\sqrt{2}.\sigma).\ln(t/t_m))) \quad (6.11)$$

6.2 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS

De acordo com a equação (6.1) a distribuição log-normal é caracterizada pelos parâmetros da população : média μ e desvio padrão σ .

Se, na equação (6.4) $Q(t) = 0,5$, então :

$$\text{erf} [1/(\sqrt{2}.\sigma).\ln(t/t_m)] = 0$$

$$\text{Logo } t = t_m$$

$$\text{Mas } \mu = \ln(t_m)$$

$$\text{Então } t_m = e^\mu.$$

A variância da variável aleatória $\ln(t)$ pode ser obtida pela seguinte expressão :

$$\sigma_{\ln(t)} = E(\ln(t) - E(\ln(t)))^2$$

$$\sigma_{\ln(t)} = E(\ln(t))^2 - \mu^2 \quad (6.13)$$

A esperança de $\ln(t)$ é dada por :

$$E(\ln(t)) = \int_0^{\infty} \ln(t) / (\sigma t \sqrt{2\pi}) \exp(-(\ln(t/t_m))^2 / (2\sigma^2)) dt \quad (6.14)$$

E a variância de $\ln(t)$ sendo dada por [4]:

$$v_{\ln(t)} = \sigma^2$$

O tempo médio até a falha, τ é calculado pela equação (6.15) [2].

$$\tau_f = t_m e^{(\sigma^2/2)} \quad (6.15)$$

E a variância do tempo médio até a falha pela equação (6.15) [2].

$$v_{\tau_f} = t_m^2 e^{\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \quad (6.16)$$

A técnica mais frequentemente usada para os estimadores de média e desvio padrão de uma população de ensaio de vida acelerado analisada pela distribuição log-normal é a técnica gráfica [5]. Estes estimadores também podem ser obtidos pela técnica da estimação por máxima verossimilhança [6], que não será abordada neste texto.

6.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O teste de vida foi realizado com $-5V$ de polarização à três temperaturas : $100^\circ C$, $130^\circ C$ e $150^\circ C$. As amostras que foram submetidas a teste de vida acelerado não passaram por nenhum teste preliminar de seleção, por exemplo do tipo "burn-in".

A estimativa do tempo de vida e do desvio padrão, para cada temperatura será feita usando o método gráfico da distribuição log-normal. O modelo para descrever o comportamento do tempo de vida do fotodetector com a temperatura será o modelo de Arrhenius [7] : o tempo médio de vida dos fotodetectores diminui com o aumento da temperatura de funcionamento, segundo a expressão (5.16).

$$t_m = C.e^{(E_a/kT)} \quad (6.17)$$

Onde:

t_m = tempo de vida médio,

C = constante de proporcionalidade,

E_a = energia de ativação em eV,

k = constante de Boltzmann, $8,63 \cdot 10^{-5}$ eV/K,

T = temperatura em K.

6.3.1 DISTRIBUIÇÃO DE FALHAS

As amostras foram ensaiadas a três temperaturas diferentes, 100°C, 130°C, 150°C, com 68, 51 e 84 fotodetectores respectivamente. Definimos a falha de um fotodetector como sendo o aumento de 1 ordem de grandeza na corrente de escuro. O tempo de vida médio foi obtido graficamente através de gráfico da distribuição de falhas acumulada.

A distribuição de falhas e a função de falhas acumulada para a amostra testada a 100°C esta mostrada na tabela 1. O gráfico de distribuição de falhas acumuladas esta mostrado na figura 6.2 a partir do qual foi estimado o tempo de vida médio em 250.000 horas.

Tempo em horas	Falha	Falha acumulada %
290	2	3
580	2	6
870	2	9
1428	1	10
2200	3	15
2357	1	16
3480	1	18
5000	1	19
6844	1	21
7420	1	22
12800	1	24
15287	1	25
16667	1	27

Tabela 6.1: Distribuição de falhas para a amostra testada a 100°C

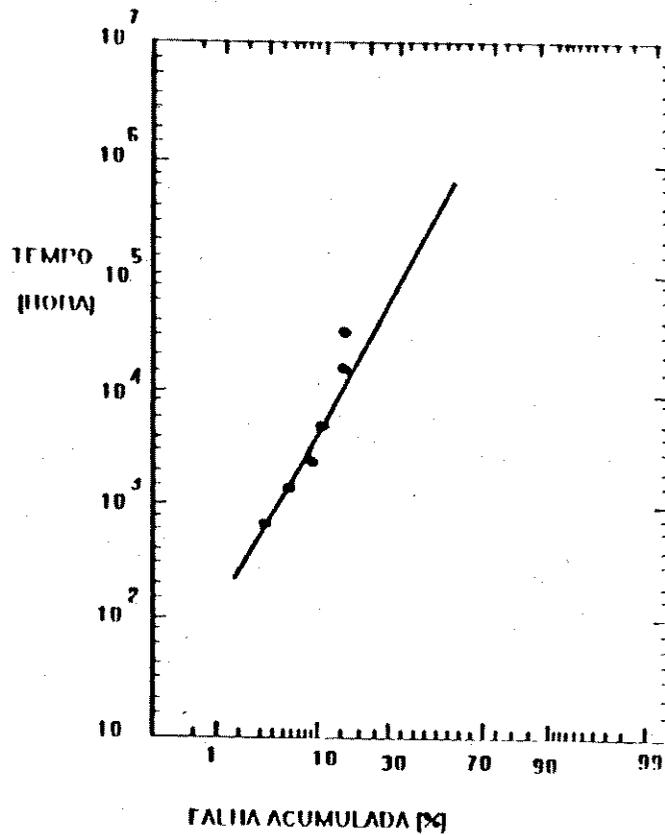


Figura 6.1: Distribuição log-normal da taxa de falha acumulada para os dados da tabela 6.1

Os dados de distribuição de falhas e de falha acumulada para a amostra testada a 130°C, -5V, estão mostrados na tabela 6.2. O gráfico da função de falha acumulada está mostrado na figura 6.2. O tempo de vida médio obtido da figura 6.2 é de 38.000 horas.

Tempo em hora	Falha	Falha acumulada %
659	1	2
989	1	4
1625	1	6
2860	1	8
8640	1	10
9635	1	12
10340	1	14

Tabela 6.2: Distribuição de falhas da amostra testada a 130°C

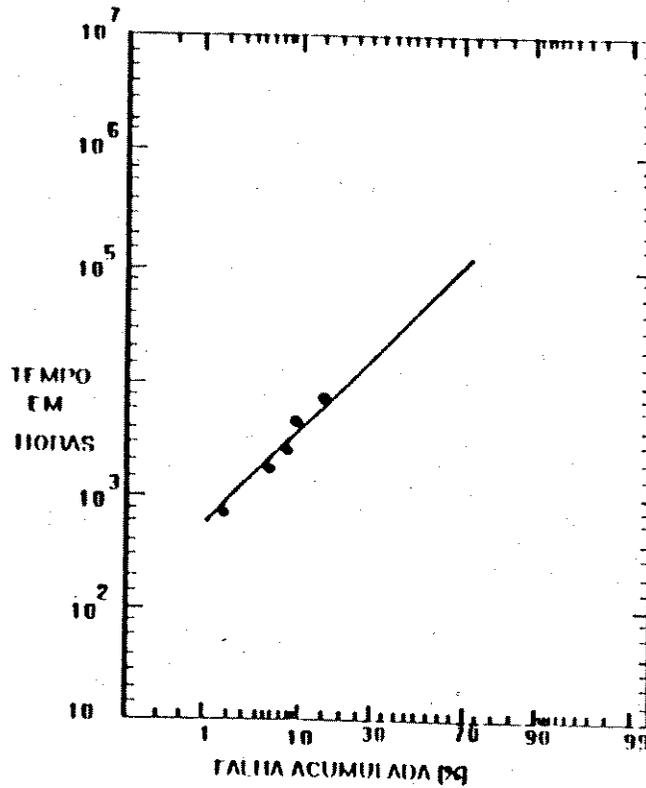


Figura 6.2: Distribuição log-normal da taxa de falha acumulada para os dados da tabela 6.2

A distribuição de falhas da amostra testada a 150°C esta mostrada na tabela 6.3. A figura 6.3 apresenta o gráfico da distribuição log-normal para a amostra testada a 150°C. Do gráfico da figura 6.3 obtemos o tempo de vida médio da amostra testada a 150°C : 15.000 horas.

Tempo em hora	Falha	Falha acumulada %
496	3	4
565	1	6
687	1	7
1132	1	8
1724	1	10
2037	1	11
2191	1	12
2713	3	16
3349	1	18
4893	2	20
6979	2	23
7790	4	27
8222	2	30
8799	2	32
9208	1	33
9879	1	34

Tabela 6.3: Distribuição de falhas da amostra testada a 150°C

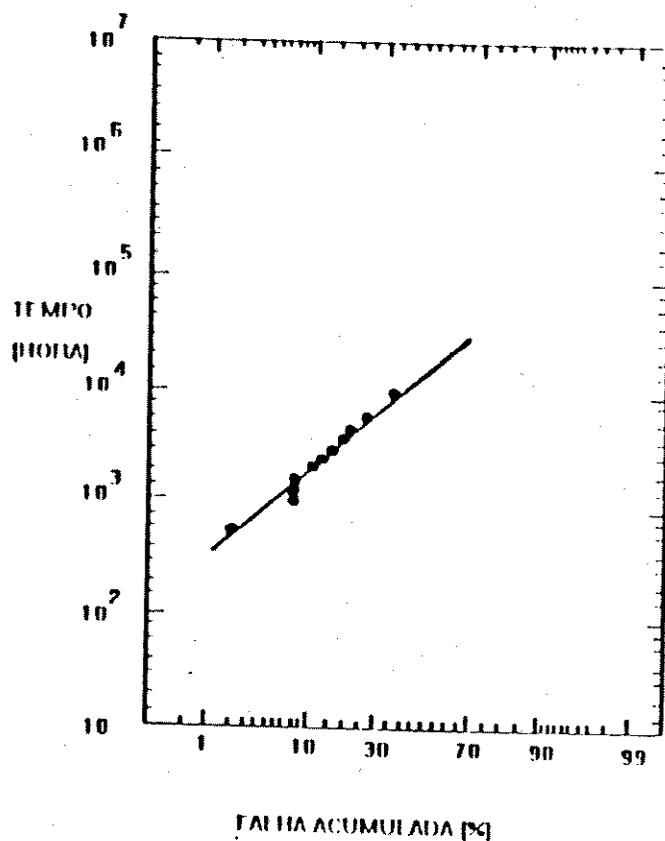


Figura 6.3: Gráfico da distribuição log-normal de falhas dos dados da tabela 6.3

Dos gráficos das figuras 6.1, 6.2, 6.3 podemos montar a tabela 6.4 de temperatura e tempo de vida médio. Aproximando estes dados pela equação 6.17 obtemos energia de ativação de 0,77eV e o tempo de vida médio a temperatura ambiente de 1.10^8 horas. Estes resultados são comparáveis aos melhores resultados de confiabilidade obtidos com fotodetectores planares [8]. Apresentamos na figura 6.3 o gráfico de Arrhenius obtido com os dados da tabela 6.3, através deste gráfico podemos estimar o tempo de vida médio desde a temperatura ambiente até 150°C.

Temperatura °C	Tempo de vida (hr)
100	250000
130	38000
150	15000

Tabela 6.4: Tempos de vida médio para diferentes temperaturas

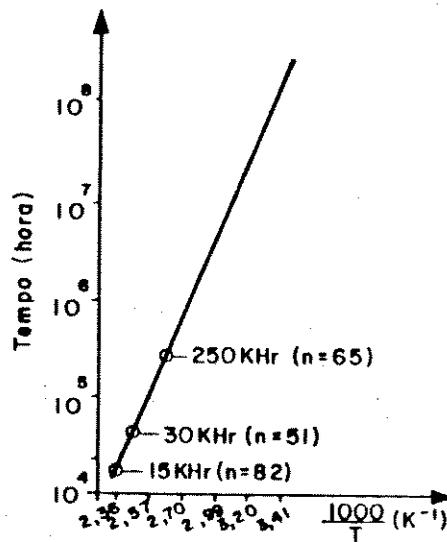


Figura 6.4: Gráfico de Arrhenius para os dados de teste de vida acelerado.

Os dados apresentados neste trabalho podem ser comparados aos publicados por Skrimshire [9], que também realizou testes de vida acelerado em fotodetectores mesa passivados com poliimida e obteve energia de ativação de 1 eV, e tempo máximo de vida a 150°C/-5V de 1000 horas. Nossos resultados são muito superiores: 15.000 horas de tempo de vida médio e energia de ativação de 0,77eV nas mesmas condições. Atribuímos estes resultados a estrutura mesa coberta com junção exposta no InP e não no InGaAs como na referência [9].

A figura 6.5 mostra o comportamento da corrente de escuro medida a temperatura ambiente, em função do tempo para a amostra testada a 150°C/-5V [8].

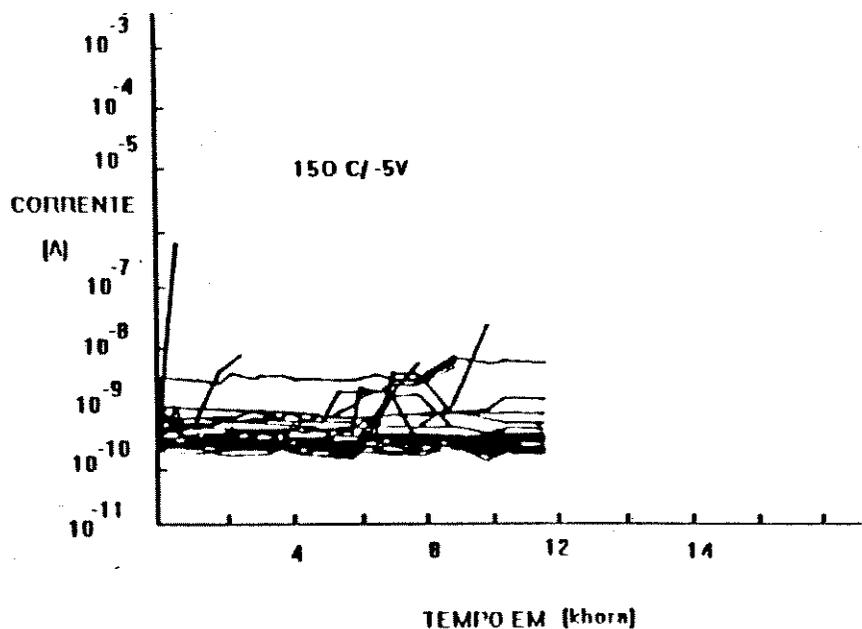


Figura 6.5: Variação da corrente de escuro medida a temperatura ambiente em função do tempo para a amostra testada a 150°C

A maior parte dos fotodetectores desta amostra não apresenta um significativo aumento na corrente de escuro. No entanto há dispositivos que têm um acentuado aumento na corrente de escuro. Nestes dispositivos foi observada uma redução na corrente de escuro, a níveis próximos dos iniciais, quando submetidos a armazenamento a alta temperatura, 300°C, por 24 horas.

Este mecanismo de falha pode ser associado a difusão e ao acúmulo de íons móveis da poliimida sobre o perímetro da junção como proposto por Kuhara e co-autores em [10]. Mukai e co-autores [12] relatam degradação durante testes de vida de dispositivos passivados com poliimida devido a contaminação por Na⁺ ao nível de vários ppm. A poliimida empregada na passivação dos fotodetectores apresentados neste trabalho têm um nível de contaminação bem menor, <0,1ppm. Esse baixo nível de contaminação associado a junção p-i expor-se no InP resultou em uma estrutura de fotodetector confiável e potencialmente de baixo custo.

6.4 REFERÊNCIAS

1.F. H. Reynolds, "Thermally accelerated aging of semiconductor componentes", Proc IEEE, 62, 1974.

2. A.S. Jordan " A comprehensive review of log-normal failure distribution with application to LED reliability", *Microelectronics Reliability*, vol 18, 1978.
3. M. Abramowitz, I.A. Stegun, *Handbook of mathematical functions*, NBS, Applied Mathematics series, 1970.
4. Y.L. Maksodian *Probability and Statistics with applications*, International Textbook, 1969.
5. D.S. Peck, O. D Trapp, *Accelerated testing handbook*, Technology Associates, 1986.
6. J. Aitchinson, J.A. Brown, "The lognormal distribution", Cambridge University Press, 1957.
7. J.S. Pereira, P.J. Shieh, A. Gobbi, P. Malberti, T.E. Santos, E. Sato, F. Borin, "Confiabilidade de fotodetectores pin em InGaAs passivados com poliimida, SBMICRO, B.Horizonte, 1991.
8. J.S. Pereira, P.J. Shieh, A. Gobbi, P. Malberti, T.E. Santos, E. Sato, F. Borin, N. Patel "Reliability of InGaAs/InP photodiodes passivated with polyimide", 31st Annual Proceedings of Reliability Physics, Atlanta, USA, 1993.
9. C.P. Skrimshire, J.R. Farr, D.F. Sloam, M.J. Robertson, P.A. Putland, J.C.D. Stokoe, R.R. Sutherland, "Reliability of mesa and planar InGaAs pin photodiodes", *IEE Proceedings*, Pt-J, vol 137, n 1, 1991.
10. Y. Kuhara, H. Terauchi, H. Nishizawa, "Reliability of InGaAs/InP long-wavelength pin photodiode passivated with polyimide thin film", *Journal of lightwave Technology*, vol-LT4, 1986.
11. K. Mukai, A. Saiki, K. Yamanaka, S.Hamada e S. Shoji, "Planar multilevel interconnection technology employing a polyimide ", *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol SC-13,1978.

Capítulo 7

APLICAÇÕES

Neste capítulo apresentaremos os resultados de aplicação dos fotodetectores pin construídos na tecnologia mesa coberta.

Serão mostrados dois tipos de aplicação :

- Receptores ópticos para sistemas de comunicação óptica.
- Conjuntos de fotodetectores integrados monoliticamente e dispostos linearmente para interconexão óptica (array linear).

7.1 RECEPTORES ÓPTICOS

Os primeiros receptores construídos com os fotodiodos pin apresentados neste trabalho visavam sistemas de comunicações ópticas plesiócronicos com taxas de linha de 45Mb/s e 172Mb/s, sistemas conhecidos comercialmente como ELO-34 e ELO-140.

Os receptores foram montados com pré-amplificadores de baixo ruído, na configuração transimpedância e implementados na tecnologia híbrida de filme fino [1].

O diagrama elétrico do receptor óptico de transimpedância esta mostrado na figura 7.1.

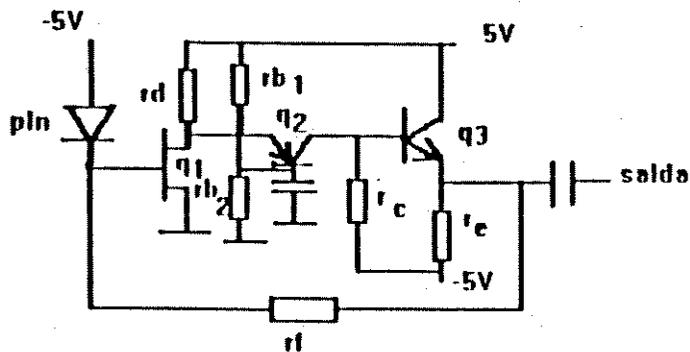


Figura 7.1: Receptor óptico transimpedância para recepção em ELO-34 e ELO-140

O circuito de entrada do pré-amplificador foi implementado com um fet de GaAs de baixo ruído. O fet e o transistor pnp formam uma configuração cuja principal propriedade é manter o ganho de tensão constante com a frequência.

A frequência de corte de um receptor óptico do tipo transimpedância, como o da figura 7.2 pode ser calculada pela equação 7.1:

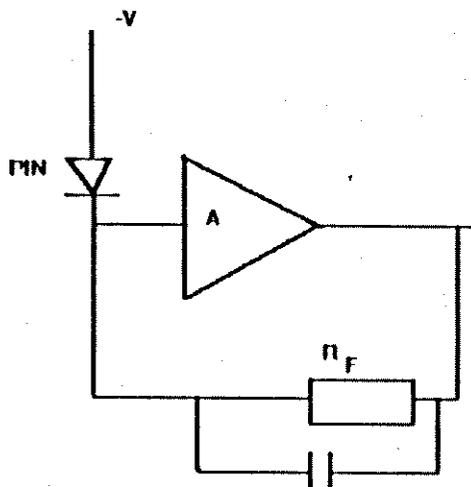


Figura 7.2: Receptor óptico transimpedância

$$f_{-3dB} = A / (2\pi R_f (C_{det} + C_{in} + A \cdot C_{Rf})) \quad (7.1)$$

Onde :

A = ganho de tensão de malha aberta,

R_f = resistor de realimentação,

C_{det} = capacitância do fotodetector,

C_{in} = capacitância de entrada do amplificador,

C_{Rf} = capacitância paralela ao resistor de realimentação.

A importância do ganho de tensão ser constante com a frequência pode ser avaliada pela equação 7.1 .

O principal parâmetro de avaliação de desempenho do receptor óptico é a sensibilidade, definida como sendo a mínima potência fotodetectada para uma dada taxa de erro, em sistemas de transmissão digital, ou a mínima potência fotodetectada para uma dada relação sinal/ruído, em sistemas analógicos.

Os valores de sensibilidade, para taxa de erro de 1.10^{-9} , são equivalentes aos obtidos em receptores comerciais com fotodetectores planares. A tabela 7.1 apresenta os resultados de medida de sensibilidade para os receptores ópticos com pré-amplificador de transimpedância e fotodiodos pin na estrutura mesa coberta.

Taxa	45 Mb/s		172 Mb/s	
	Este trab.	Comerc.	Este trab.	Comerc.
Sensibil.	-48dBm	-46dBm	-41dBm	-40 dBm

Tabela 7.1: Comparação dos valores de sensibilidade para receptores ópticos

Foi implementado um receptor óptico para 2,5Gb/s, usando fotodetector pin na estrutura mesa coberta e amplificador de transimpedância monolítico. Um aspecto crítico nesta implementação é a capacitância do fotodiodo. Para esta implementação foi necessário reduzir a capacitância do fotodiodo de 0,7pF para 0,4pF a -4V. Essa redução foi obtida diminuindo-se a dopagem residual do InGaAs e do InP para níveis da ordem $1.10^{15}cm^{-3}$, mantendo-se, no entanto, a geometria do fotodetector. Este resultado é previsto pela equação 4.18.

A resposta a uma seqüência de pulsos correspondente a taxa de 2,5Gb/s esta mostrada na figura 7.3 : foram obtidos tempos de subida e descida inferiores a 200ps (cada) .

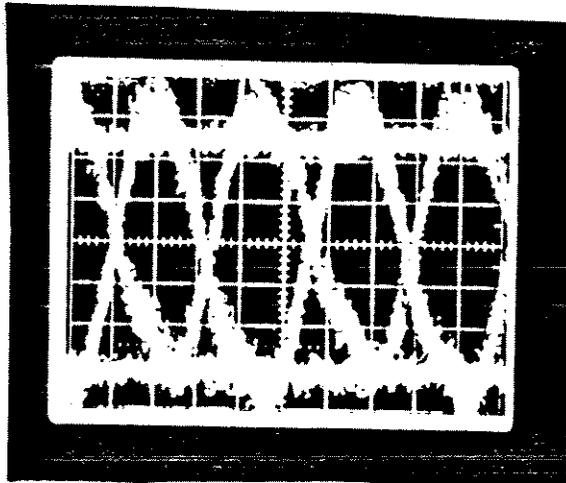


Figura 7.3: Resposta do receptor óptico a uma seqüência de pulsos correspondente a taxa de 2,5Gb/s

7.2 “ARRAYS” LINEARES

Interconexão óptica é uma emergente área de aplicação para componentes optoeletrônicos. Uma primeira abordagem para aplicação de interconexão óptica é a ligação paralela, por exemplo em painéis traseiros de equipamentos.

Observando as etapas de processo de fabricação do fotodetector pin na estrutura mesa coberta vemos que os fotodetectores têm seus anodos isolados por construção e seus catodos comuns e que se separarmos uma barra teremos um conjunto monoliticamente integrado de fotodetectores com anodos isolados e catodos comuns. Esse conjunto forma um “array” (na falta de uma palavra mais adequada na língua portuguesa) linear de fotodetectores [2]. Este dispositivo encontra aplicação na recepção paralela de sinais ópticos, notadamente em curtas distâncias. O nível de interferência (crosstalk) de um dispositivo em outro é da ordem de -40dB, conforme mostrado na referência [2].

7.3 REFERÊNCIA

1. V. Corso, Relatório Interno TELEBRÁS, 1991.

2. J.S.Pereira, M. Giansante, C. Coghi, A. Gobbi, H. Godoi, "Linear array of FP-DCPBH lasers and InGaAs/InP pin polyimide passivated photodiodes for optical interconnection", Anais do VI SBMICRO, Campinas, 1993.

Capítulo 8

CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentamos uma estrutura de fotodetector pin que procura reunir a pequena complexidade de processamento tecnológico da estrutura mesa com o desempenho e confiabilidade da estrutura planar com camada de topo de InP.

Foi desenvolvido um modelo que permite calcular a corrente de escuro e a capacitância através dos parâmetros de construção: geometria e dopagem.

Correntes de escuro da ordem de 100pA em junções com diâmetro de 85 μ m e dopagens residuais de $5 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ portadores residuais no InGaAs e InP foram regularmente obtidas com esta estrutura. Valores menores de concentração residual resultaram em correntes de escuro de até 10pA. Este resultado e a construção de fotodetectores de diferentes diâmetros nos mostraram que a condução superficial na estrutura mesa coberta é muito pequena.

Apresentamos neste trabalho os arranjos experimentais para medida da corrente de escuro, capacitância e responsividade.

Foi apresentado um procedimento de cálculo da resposta em frequência limitada pelo tempo de trânsito, neste cálculo foram linearizadas as equações de continuidade para determinadas condições.

Foi feita uma revisão das técnicas de medida da resposta em frequência em fotodetectores.

Medimos a resposta em frequência por três destas técnicas:

- Fonte de luz modulada diretamente, com resposta em frequência conhecida.
- Conversão FM-AM através de interferômetro.
- Batimento de emissão espontânea amplificada oriunda de amplificador óptico a fibra dopada com érbio.

Os resultados experimentais mostraram boa concordância e revelaram que os valores medidos para resposta em frequência estão limitados a montagem do fotodetector, fios de acesso ao componente, e não no tempo de trânsito dos portadores fotogerados.

A confiabilidade dos fotodetectores apresentados neste trabalho se mostrou superior a qualquer outro resultado publicado de confiabilidade de fotodetectores pin na estrutura mesa e comparável aos melhores resultados, dos disponíveis na literatura, de fotodetectores planares.

Receptores ópticos construídos com os fotodetectores apresentados neste trabalho mostraram desempenho semelhante ao encontrado em receptores comerciais.

Demonstramos a potencialidade desta estrutura, mesa coberta, para implementação de “arrays” lineares monolíticos, para uso em interconexão óptica.

Por fim, esta estrutura, é também, potencialmente de baixo custo de produção industrial.

Jorge Salomão Pereira, dezembro de 1993.