

3

ASPECTOS EXPERIMENTAIS

Para analisar as propriedades ópticas dos moduladores de intensidade desenvolvidos nesta tese foram realizadas medidas de fotocorrente, transmissão e de campo próximo.

A medida de fotocorrente, como seu nome indica, é uma medida de corrente fotogerada. Quando a luz que incide na região ativa de uma estrutura de MQW semicondutora é absorvida, produz-se uma geração de pares elétron-buraco, os quais, ao ser aplicado um determinado campo elétrico são expulsos para fora da região de poços, gerando desta forma uma fotocorrente.

A medida da fotocorrente pode ser realizada em duas geometrias diferentes, uma com incidência da luz de forma paralela às camadas epitaxiais, que chamaremos fotocorrente no plano. A outra, com incidência de luz perpendicular às camadas epitaxiais, que chamaremos fotocorrente perpendicular.

O sinal de transmissão é utilizado para calibrar a medida de fotocorrente em unidades absolutas. Neste tipo de medida, é de vital importância saber se o material do substrato absorve a radiação incidente na mesma faixa de operação da região ativa da estrutura crescida. Sendo assim, o substrato deverá ser corroído totalmente.

O perfil do campo próximo é medido somente em guias de onda. A medida consiste em obter a imagem do campo eletromagnético na saída do dispositivo. A geometria dessa imagem fornece informações tais como o número de modos que se propagam no guia e o fator de acoplamento óptico.

A seguir encontra-se uma breve descrição da montagem experimental de cada uma destas medidas. O software que foi desenvolvido para automação das diferentes experiências encontra-se descrito nos apêndices A e B.

3.1

Fotocorrente

A medida de fotocorrente consiste em incidir luz de diferentes comprimentos de onda e medir a corrente foto gerada. Esta medida foi realizada com dois tipos de geometria: incidência perpendicular e incidência paralela às camadas epitaxiais. A montagem e o *software* usados na medida de fotocorrente foram desenvolvidos como parte do trabalho desta tese. A configuração da montagem é apresentada na figura 3.1. A janela tracejada da figura 3.1 mostra a posição da amostra para as duas geometrias de fotocorrente utilizadas. A fonte de luz branca é uma lâmpada halógena que opera com 12 Volts e dissipa uma potência de 250 Watts. A luz incide no monocromador que possui uma rede de difração com densidade de 600 linhas por milímetro. A escolha da rede de difração apropriada depende do comprimento de onda de operação do dispositivo. Por exemplo, a rede de difração Oriel 74069, opera entre 900 e 2800 nm com comprimento de onda central em 1600 nm. Esta rede foi usada para as medidas de fotocorrente nas estruturas de *InAlAs/InGaAs*. Enquanto a rede Oriel 74067, usada para medir as estruturas de *AlGaAs/GaAs*, opera entre 600 e 2500 nm com comprimento de onda central em 1000 nm.

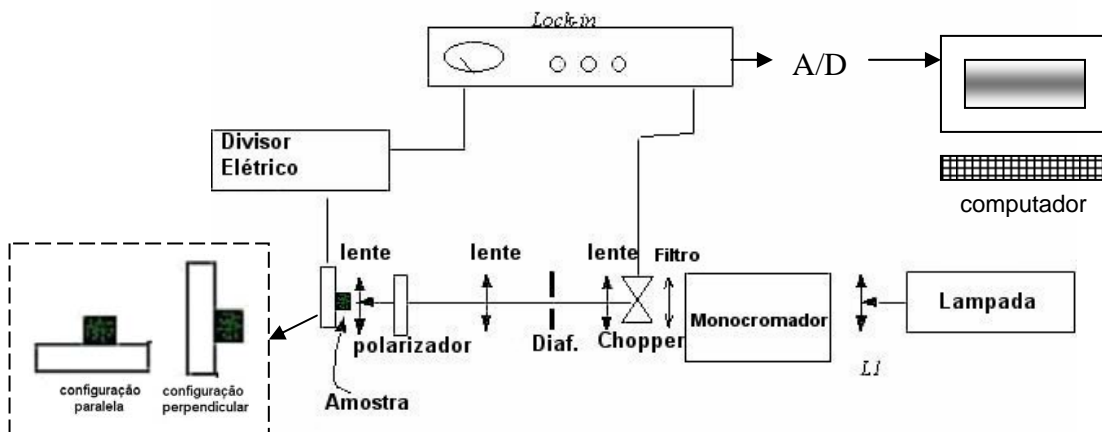


Figura 3.1 Configuração da experimento de fotocorrente

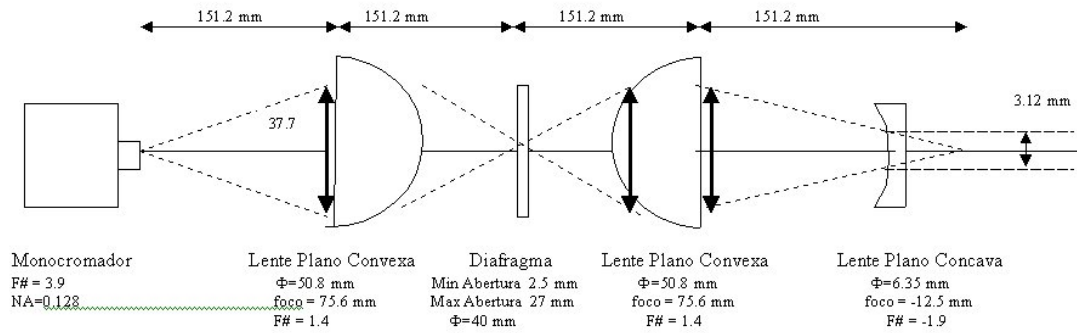


Figura 3.2. Geometria do sistema de lentes utilizado para acoplar o feixe .

Na saída do monocromador é usado um filtro que corta a difração de segunda ordem da rede de difração. Após a luz ser modulada pelo *chopper*, com frequência = 511 Hz, ela segue a trajetória da geometria de lentes da figura 3.2. O sinal fotogerado passa por um circuito em T, onde é recortado o sinal DC que vai ser pré-amplificado e ao mesmo tempo permite aplicar tensão reversa na amostra. O dispositivo pré-amplificador é um EG&G *Judson* modelo PA-7.

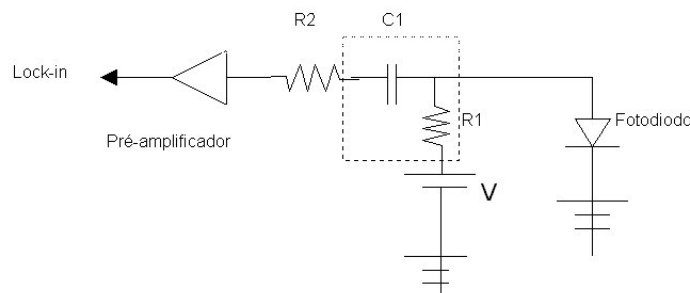


Figura 3.3. Circuito usado para polarizar o dispositivo e bloquear o sinal DC.

A amostra está representada na figura 3.3 pelo diodo. As resistências $R1$ e $R2$ são de $1,47 \times 10^3$ ohm e 750 ohm, respectivamente, e a capacitância $C1$ é de $0,1 \mu\text{F}$. A voltagem varia entre 0 e 5 volts.

3.2

Campo próximo

A medida do campo próximo é uma medida que se realiza na face de saída do dispositivo. A figura 3.4 mostra o plano correspondente às medidas de campo próximo e campo distante. Esta figura pretende enfatizar a localização do plano da medida de campo próximo. A imagem do campo próximo em guias permite avaliar a eficiência de acoplamento óptico (Σ), e o fator de confinamento óptico (Γ) [Inoue, 1985; Artiglia, 1989].

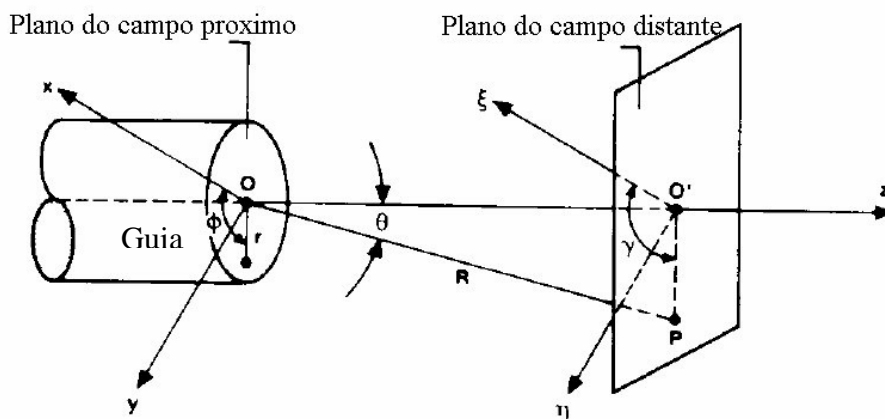


Figura 3.4. Geometria do campo próximo e do campo distante. O plano da imagem está paralelo ao plano xy. z é o eixo de propagação do campo.

A experiência de campo próximo foi desenhada e desenvolvida como parte de trabalho desta tese. A figura 3.5 mostra a configuração da montagem utilizada. O sistema pode ser descrito em três partes.

- 1) Sistema de lançamento do feixe: A fonte de luz é um laser *pigtail* da empresa *Thorlabs* (LPS-SMF28-1550DFB-FC). Usa-se um colimador para fazer a propagação do feixe no ar (*Newport* F-col-9-15), este feixe tem um diâmetro de 0.5 mm. Segue um polarizador de 20 mm de diâmetro (*Melles Griot* 03-FPI012) e uma lente objetiva de abertura numérica 0.2; todos eles dispostos sobre uma plataforma ajustável nas três coordenadas X, Y e Z.
- 2) Suporte da amostra: O suporte da amostra foi desenhado como mostra a figura 3.6. Este porta-amostra está fixado no posicionador do meio e faz movimentos somente no plano XY. A direção de movimento de cada motor

está indicado pelos sistemas de coordenadas 3D observados na figura 3.5. Um sistema de pontas é usado para aplicar uma diferença de potencial à amostra. O contato negativo é feito na base do suporte e o contato positivo é feito acima da amostra, na região metalizada.

- 3) Sistema de recepção: A imagem na saída do dispositivo é captada por uma lente objetiva de abertura numérica de 0.2. A face de saída do dispositivo deve estar localizada no foco da objetiva, desta forma o feixe se propaga paralelamente ao eixo óptico. Depois é usada uma lente acromática de precisão para acoplar o feixe numa fibra óptica. A fibra óptica está conectada a um fotorreceptor *New Focus* (2011 FC ou 2010 FC). O fotorreceptor é um amplificador de transimpedância de ganho variável com baixo ruído. O sinal detectado é medido via Lock-in (*Stanford Research Systems* SR510). Um gerador de sinais de baixa distorção é usado para polarizar a amostra (*Stanford Research Systems* DS360). O processamento do sinal é feito usando um *software* desenvolvido especificamente para esta tese. O programa está descrito no apêndice A.

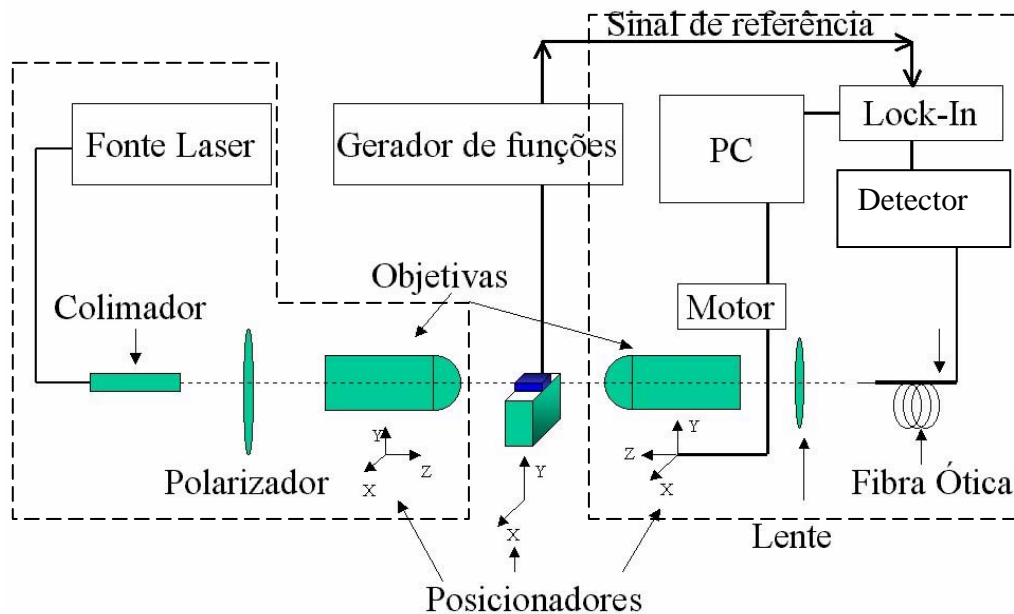


Figura 3.5. Esquema da experiência usada para medir o campo próximo em guias de onda.

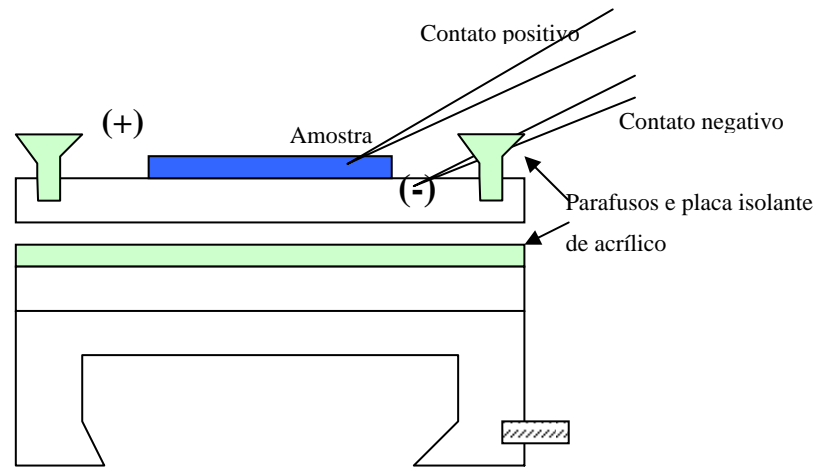


Figura 3.6. Desenho lateral do suporte da amostra.

A figura 3.7 mostra a foto do sistema de campo próximo implementado no LabSem.

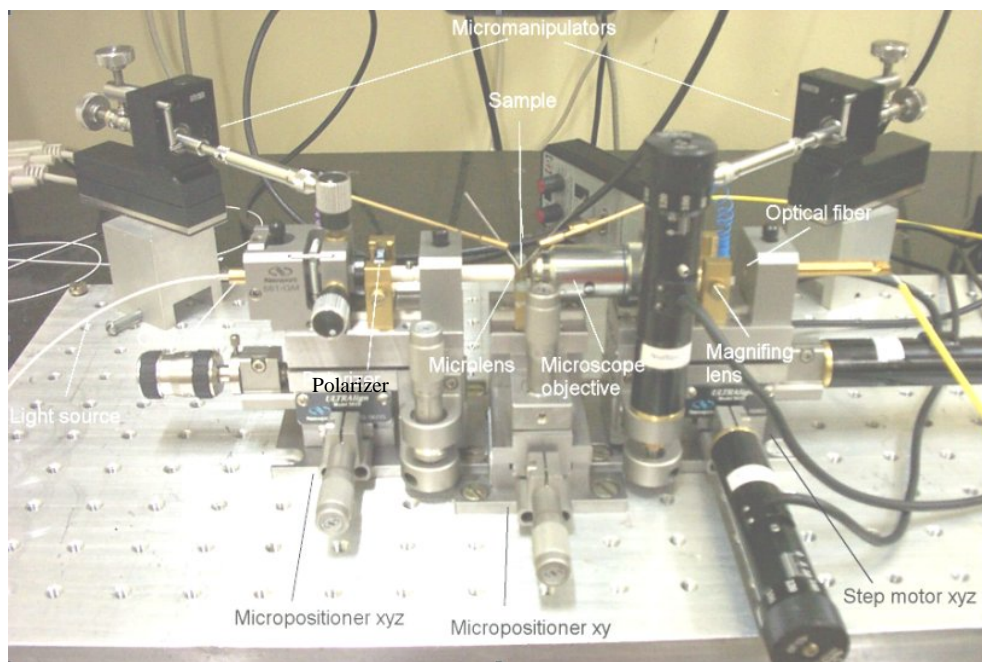


Figura 3.7. Foto da montagem para a medida de campo próximo em LabSem

3.3

Transmissão

A medida de transmissão é feita para obter o valor do coeficiente de absorção em unidades absolutas. A medida consiste em fazer passar a radiação incidente através da estrutura. A figura 3.8 apresenta um esquema da forma como é implementada a medida.

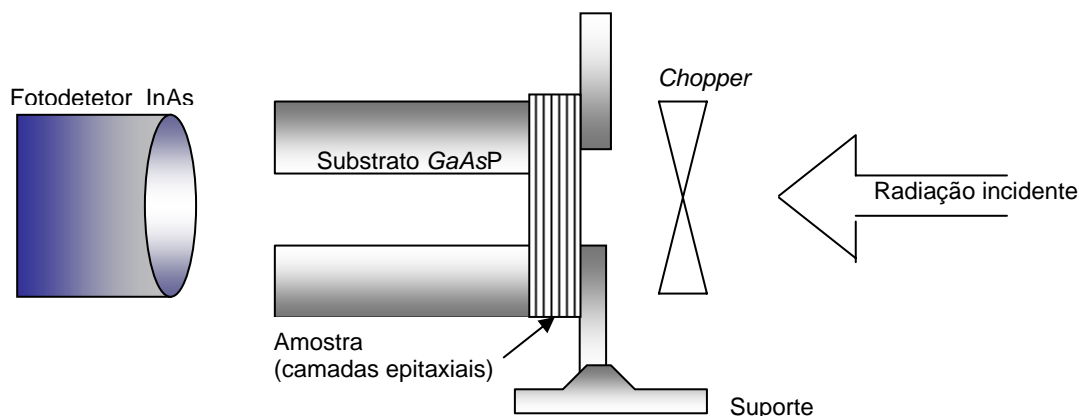


Figura 3.8. Geometria da montagem da medida de transmissão.

O processo de obtenção do coeficiente de absorção varia de acordo com o material que vai ser analisado, pois pode ocorrer que o material do substrato absorva na mesma faixa de operação da estrutura, o que prejudica a medida. Logo o substrato deverá ser corroído. Em particular, este processo deve ser realizado em amostras crescidas sobre substratos de GaAs. Para corroer o substrato de GaAs, foram usadas duas soluções. A primeira é composta por hidróxido de amônia e peróxido de hidrogênio: NH_4OH : H_2O_2 , numa proporção 20:100. Esta solução é muito instável à temperatura ambiente por isso, sua temperatura de manipulação deve ser de 10 °C. Ela tem uma taxa de corrosão de 1.33 nm/min e deve ser trocada a cada 15 minutos. A segunda parte da corrosão se faz com uma solução que seja seletiva. A solução seletiva é composta por uma solução *buffer* misturada com peróxido de hidrogênio numa proporção 7:1. A solução *buffer* consiste em mistura de citrato de potássio (28%) com uma solução de ácido cítrico (20%). A figura 3.8 mostra o exemplo de um substrato corroído.

Antes que a radiação incida na amostra, ela passa por um *chopper* para ser modulada. Depois, quando a radiação cruza a estrutura, ela é substancialmente absorvida pela camada ativa. O sinal transmitido é detectado por um sensor de *InAs* (EG&G J12TE2) e transmitido para um amplificador *Lock-in*. Finalmente, o sinal é digitalizado por uma placa A/D e estes dados vão ser salvos. O modelo matemático para estimar os valores do coeficiente de absorção varia com cada material, conforme foi explicado no capítulo anterior.

3.4

Processamento de guias de onda

Para fabricar guias de ondas semicondutor se utiliza o processo de fotogração. Vários trabalhos publicados contêm informação detalhada do procedimento que é desenvolvido no LabSem [Pires, 1998; Racedo, 2000; Tribuzy, 2001]. Uma sinopse do processo é apresentada a seguir.

Colagem Amostra	Chapa 5min - 120°C. Uma pequena gota de fotoresina é usada para colar a amostra num suporte metálico quadrado revestido de ouro.
1ª Máscara	Chapa 2 min - 110°C
Abre a fenda para depositar o metal.	HMDS 40s – 4000 rpm. A solução em xileno é um solvente orgânico promotor da adesão da fotoresina.
	AZ-5214 40s@4000rpm . A fotoresina é um solvente de proteção
	Chapa 1min - 110°C
	Exposição à luz ultravioleta. 145s - 5.5 mW/cm ² . Usa-se a alinhadora de máscara Karl Asus M4.
	Revelação KOH : H ₂ O (1:4) 40 s. Solução de hidróxido de potássio em água. Usa-se para retirar a fotoresina da região sensibilizada pela luz ultravioleta. Processo chamado de revelação.
Plasma	1min. O plasma é feito de oxigênio ionizado. As partículas deste plasma bombardeiam a superfície da amostra já fotograçada para eliminar possíveis sujeiras.
1ª Metalização	HCl : H ₂ O (1:1) 45 s. Solução de ácido clorídrico em água. A solução retira partículas oxidantes da superfície da amostra.

Deposição de Cromo e Ouro	Cr (300Å).
	Au (1000Å)
Lift-off	Acetona quente 10min. Retira o metal da superfície das regiões não sensibilizadas pela luz ultravioleta
Colagem amostra	Chapa 5min -120°C. Idem.
2ª Máscara	Chapa 2 min -110°C.
Proteção da região do contato metálico.	HMDS 40s - 4000rpm . idem.
	Shipley-1400-17: 40s - 4000rpm. Se usa em processos de corrosão de geometrias finas. Como é o caso de guias de onda na faixa menor que 7 µm.
	Chapa 30min - 115°C. Processo de secagem da fotoresina Shipley.
	Exposição à luz ultravioleta. 75s - 5.5 mW/cm ² . Idem.
	Revelação KOH: H ₂ O (1:4) 40 s. Idem
	Forno 30min -130°C. Processo de endurecimento da fotoresina Shipley.
Corrosão	A solução usada para corroer varia de acordo ao material.
Formação da mesa do guia de Onda.	Para corroer AlGaAs/GaAs se usa a solução de ácido sulfúrico em peróxido de hidrogênio e água: H ₂ SO ₄ : H ₂ O ₂ : H ₂ O (8 : 7 : 80)
	Para corroer InAlAs/InGaAs se usa a solução de ácido fosfórico em peróxido de hidrogênio e água: H ₃ PO ₄ : H ₂ O ₂ : H ₂ O. (1 : 7 :37). Detalhes da curva de corrosão podem ser observados nas figuras 3.7 e 3.8.
	Acetona quente 2 min + 2 min. Retira a fotoresina.
Colagem amostra	Chapa 5min -120°C. Idem
Planarização	PIX-110 40s - (4000=2µm / 3000=2.6µm) rpm.
	A polimida PIX-110 protege os lados laterais do guia de onda.
	Chapa 45s -130° C + 45s -160° C. Processo de endurecimento da polimida antes da exposição a raios ultravioleta.
	AZ-5214 40s - 4000rpm .
	Chapa 2min - 110°C
	Exposição à luz ultravioleta.. 145s - 5.5 mW/cm ²
	Revelação HOH: H ₂ O (1:2) 45s + 45s. Idem.
	H ₂ O por 1 min e fazer <i>dry spin</i> . Consiste em usar o <i>spinner</i> para

	homogeneizar e secar a polimida.
	Acetona quente 2 min + 2 min. Idem.
	Forno 30min por 200°C + 60min por 350°C.
	Processo de secagem da polimida.
Colagem amostra	Chapa 5min -120°C. Idem.
3ª Máscara	Chapa 2 min - 110°C
	<i>HMDS</i> 40s – 4000 rpm . Idem
Proteção de toda a amostra exceto a região dos guias.	AZ-5214 40s - 4000rpm . Idem
	Chapa 1min - 110°C. Idem.
	Exposição à luz ultravioleta por . 29s - 5.5 mW/cm ² . Idem.
	Revelação <i>HOH</i> : <i>H₂O</i> (1:4) 40 s. Idem
2ª Metalização	<i>HCl</i> : <i>H₂O</i> (1:1) 45 s. Idem
Deposição de Titânio e ouro. contato p	<i>Ti</i> (300Å)
	<i>Au</i> (2000Å)
<i>Lift-off</i>	Acetona quente 10min. Idem
Desbaste	Bromo-Metanol (4%) . <i>Br₂</i> : <i>CH₃OH</i> . Se faz pelo lado do substrato. Se raspa com uma lixa d'água até a superfície ficar polida.
3ª Metalização	<i>HCl</i> : <i>H₂O</i> (1:1) 45 s. Idem.
Contato n	<i>Ti</i> (100Å)
	<i>Au</i> (50Å)
	<i>Ge</i> (30Å)
	<i>Ni</i> (100Å)
	<i>Au</i> (2000Å)

Para realizar a corrosão dos diferentes materiais, são utilizadas as curvas de calibração mostradas nas figuras 3.9 e 3.10. Em particular, para corroer as amostras de *AlGaAs/GaAs* desta tese, foi usada a proporção 8:7:80 de *H₂SO₄:H₂O₂:H₂O* a temperatura ambiente, que corresponde a uma taxa de corrosão de 112Å/s. Para as amostras de *InAlAs/InGaAs* foi utilizada a proporção 1:8:37 de *H₃PO₄:H₂O₂:H₂O* a temperatura ambiente, esta composição proporciona uma taxa de corrosão da ordem de 28 Å /min.

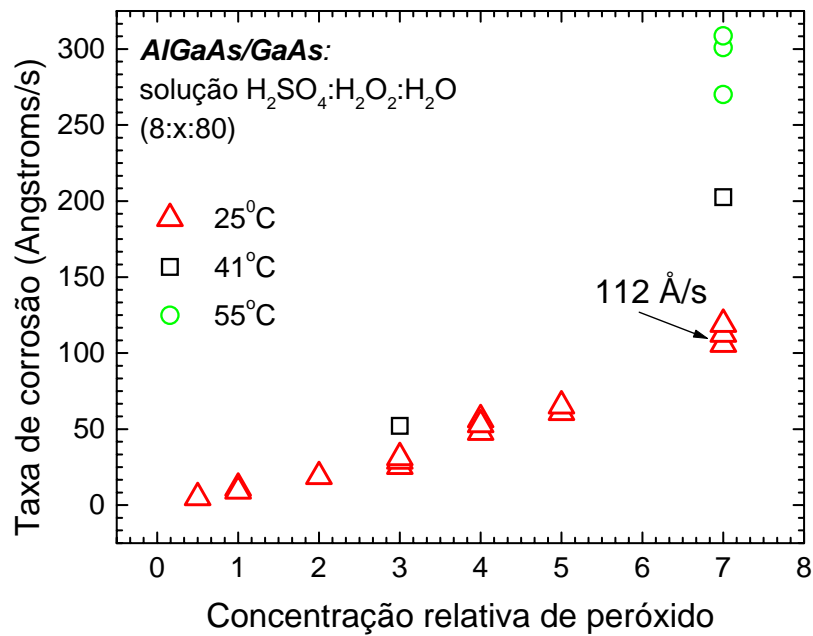


Figura 3.9. Curva de calibração para corrosão de *AlGaAs/GaAs*.

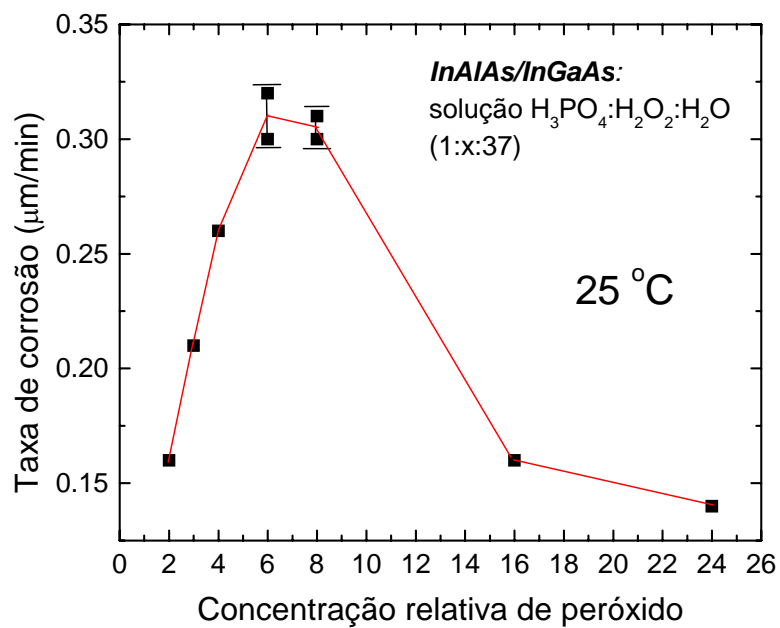


Figura 3.10. Curva de calibração para corrosão de *InAlAs/InGaAs*.

Os desenhos das máscaras usadas neste trabalho são mostrados na figura 3.11. A região cinza do desenho é a parte metalizada da máscara, que protege a região da luz ultravioleta.

A figura 3.11(a) corresponde à primeira máscara usada no processo de fotogração. A região mais clara desta figura, corresponde ao buraco aberto para realizar a deposição da região metálica encarregada de gerar o campo elétrico no interior da estrutura. A figura 3.11(b) mostra a geometria da máscara usada para proteger a região dos guias antes da corrosão, nesta máscara é decidida a largura de mesa dos guias de onda. Como pode ser observado na figura 3.11(b), as larguras de mesa utilizadas são 3, 5 e 7 μm . A terceira máscara é mostrada pela figura 3.11(c), nesta máscara é descoberta a região onde vão ser feitos os contatos ôhmicos do dispositivo.

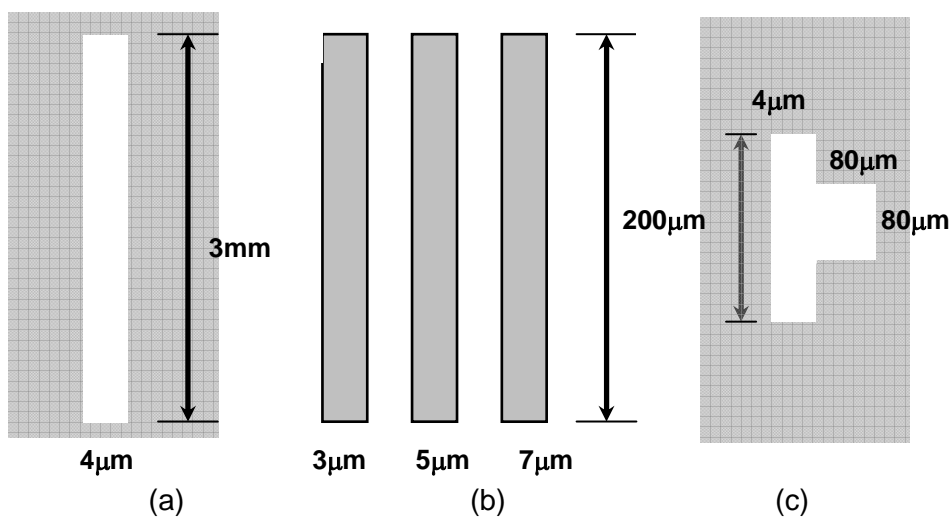


Figura 3.11 . Máscaras utilizadas no processamento de guias de onda.