

2

Amplificador óptico semiconductor

O dispositivo semiconductor em questão será estudado, analisando-se como ocorre o processo de ganho e saturação, a geração de ruído pelo amplificador, e como este pode converter comprimentos de onda.

2.1

Conceitos básicos

O amplificador óptico semiconductor, SOA, é um dispositivo optoeletrônico capaz de amplificar a luz que o atravessa, sob determinadas condições. Este é construído, na sua forma mais básica, por uma junção $p - n$ feita de materiais semicondutores de maneira similar à diodos lasers [1].

Historicamente, os SOAs surgiram dos lasers semicondutores, já que estes funcionam como amplificadores antes de chegar ao limiar de operação; portanto, os primeiros amplificadores foram justamente lasers polarizados logo abaixo do limiar [2].

A luz que se propaga através do SOA é amplificada através de um processo denominado de emissão estimulada [1–3,12,13]. Este fenômeno ocorre numa região de ganho, dita ativa. Em princípio, a região de depleção que é formada na junção de material $p - n$ funciona como a região ativa [12]. No ítem 2.3.2, será mostrado que os amplificadores são construídos de estruturas mais sofisticadas. Os SOAs são classificados em dois tipos principais:

Fabry-Perot (FPA) Quando o dispositivo possui faces que refletem parcialmente a luz para dentro do dispositivo, exatamente como um diodo laser; são polarizados abaixo do limiar.

Travelling-Wave (TWA) A luz se propaga uma única vez no meio de ganho. Também é denominado de amplificador de ondas propagantes ou viajantes¹.

¹Como os *Travelling-Wave* são os mais difundidos, e pelo fato dos amplificadores utilizados nesta dissertação serem deste tipo, a análise será limitada a amplificadores deste tipo.

Os amplificadores de *Fabry-Perot* possuem ganho extremamente sensível à variações na temperatura e ao comprimento de onda de entrada [3, 14] e sua largura de banda de amplificação é relativamente pequena ($\Delta\nu \sim 100GHz$, [2]) para o uso em comunicações ópticas [2]. Uma largura de banda maior é preferencial para a amplificação de sinais de banda larga, pois o ganho pode ser considerado plano no espectro do sinal [2]. Portanto, este tipo de amplificador foi preterido pelos do tipo de ondas propagantes para este fim [1, 2], embora estes SOAs sejam dispositivos de fácil fabricação, pois são construídos exatamente como diodos lasers.

Para que o dispositivo opere como um amplificador de ondas propagantes, as faces da região ativa devem possuir camadas anti-reflexivas para eliminar a cavidade [2, 12] podendo, além disso, ter suas faces cortadas no ângulo de máxima transmissão (de *Brewster*), reduzindo-se ainda mais as reflexões na interface [2, 3, 12]. Outras soluções incluem: separar mecanicamente as ondas de entrada e saída, angulando a região ativa [2] ou adicionar uma camada de material, dito transparente, entre a camada ativa e os filmes anti-reflexivos [1, 2]. Neste caso, o feixe de luz se abre espacialmente nesta região, pois não é guiado, e, o que é refletido continua a ser espalhado, fazendo com que a luz que volta à camada ativa seja cada vez menor. Tais abordagens para a construção de SOAs deste tipo podem ser vistas nas Figuras 2.1 e 2.2, respectivamente.

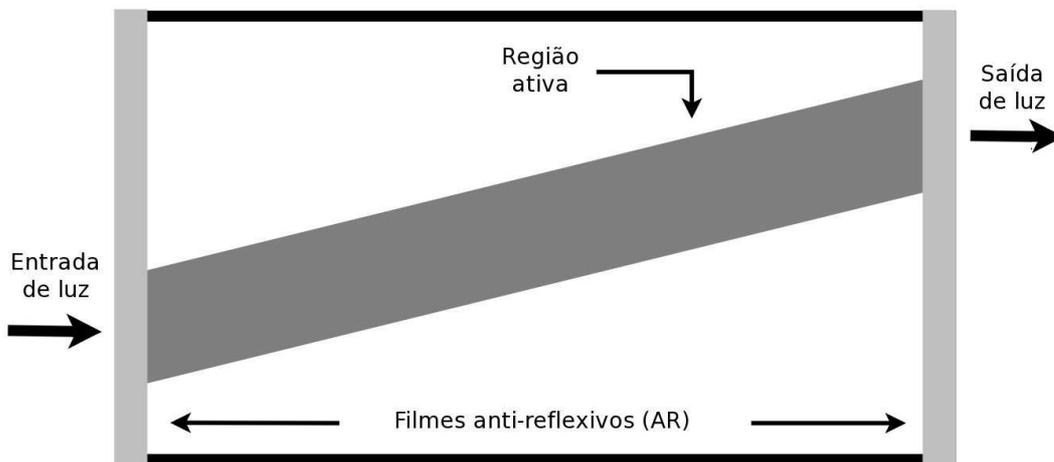


Figura 2.1: Estrutura de região ativa angulada para a construção de amplificadores de ondas propagantes.

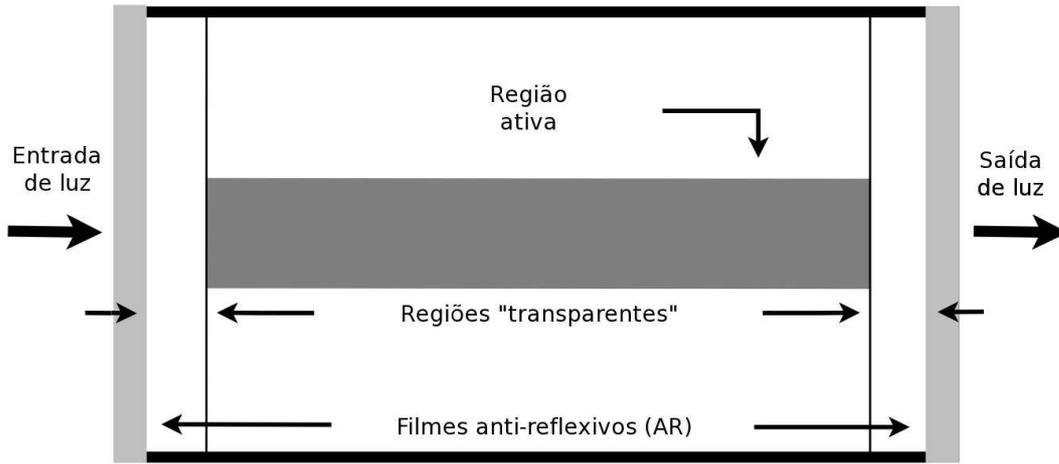


Figura 2.2: Estrutura de material transparente para a construção de amplificadores de ondas propagantes.

Um amplificador óptico semiconductor obtém ganho através de transições entre bandas de energia, que são as regiões de valores de energia permissíveis para os portadores [15]. Em um semiconductor, três principais processos de transição entre bandas podem ocorrer, assumindo-se um sistema simplificado de dois níveis [1–3, 16]: absorção, emissão espontânea e emissão estimulada. Estas transições estão ilustradas, de maneira simplificada, na Figura 2.3. Elas ocorrem entre as bandas de condução e de valência. A diferença entre as energias destas duas bandas é denominada de energia de *bandgap*.

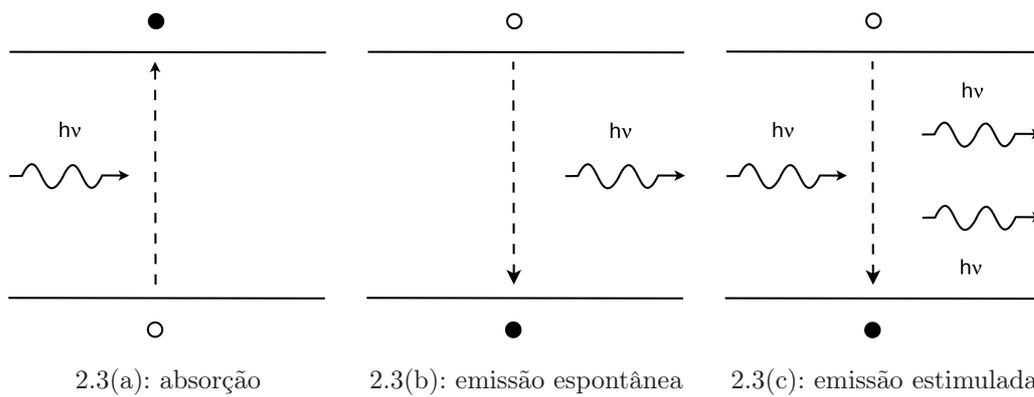


Figura 2.3: Transições radiativas principais entre bandas em um semiconductor. A banda superior é a de condução e a inferior a de valência. Os círculos vazios representam lacunas, enquanto os preenchidos representam elétrons. $h\nu$ é a energia do fóton, onde h é a constante de Planck e ν é a frequência óptica.

Absorção Um fóton incidente na região ativa poderá ser absorvido por um elétron da banda de valência, e este passará para a banda de condução. Isto ocorre somente se o fóton incidente possuir energia igual ou superior à energia do *bandgap*.

Emissão Espontânea A banda de condução é um estado excitado, i.e., um elétron nesta banda não está em equilíbrio [3]. Há, portanto, uma probabilidade não-nula de que um elétron deste nível se recombinem com uma lacuna da banda de valência, dando origem a um fóton de direção e fase aleatórias. Este processo é a origem do ruído em amplificadores ópticos, e não pode ser evitado, sendo intrínseco ao dispositivo [1].

Emissão Estimulada Quando um fóton incidente possui energia que esteja entre os níveis de quase-Fermi das bandas de condução e de valência, e havendo elétrons disponíveis na banda de condução, pode ocorrer que este fóton interaja com um elétron, causando a recombinação radiativa deste com uma lacuna da banda de valência. Desta recombinação há a criação de um novo fóton que é uma exata réplica do incidente, tendo as mesmas características deste: comprimento de onda (portanto energia), fase e polarização.

A emissão estimulada em SOAs é iniciada com um bombeio elétrico. Isto é conseguido através da corrente de polarização do SOA, pois no equilíbrio térmico, há poucos portadores na banda de condução de uma junção $p - n$ [2, 12, 13]. Ao se polarizar uma junção diretamente, ocorre uma difusão de portadores pela junção [13]. A difusão coloca os elétrons e lacunas frente a frente, devido à diminuição da barreira de potencial.

Quando a injeção de corrente é pequena ou nula, o SOA funciona como um detector [8], pois absorve todos os fótons incidentes e os converte em sinais elétricos. SOAs podem, inclusive, ser utilizados para fins de detecção e amplificação simultânea [17–22]. À medida que a corrente injetada aumenta, o fenômeno de emissão estimulada cresce; e, quando iguala-se à soma da absorção, emissão espontânea e perdas, tem-se uma condição denominada de transparência [1]. Na transparência, o sinal passa pelo SOA sem ser amplificado nem atenuado; este comporta-se como um amplificador de ganho unitário. Quando a corrente injetada é tal que o efeito de emissão estimulada seja dominante aos de absorção, de emissão espontânea e de todas as perdas envolvidas [23], ocorre a chamada condição de inversão de população, que possibilita o ganho no dispositivo [1]. O nome “inversão de população” se origina da maior ocupação de portadores na camada de condução quando comparado à ocupação da camada de valência.

2.2 Ganho

Ganho é uma figura de mérito de amplificadores, definida como a razão entre uma grandeza de saída por uma de entrada. Em SOAs, o ganho interno é resultado da diferença líquida entre a emissão estimulada e os outros processos somados às perdas no interior do semiconductor. Ou seja, quando a probabilidade de se ter emissão estimulada é maior que as probabilidades de absorção e de emissão espontânea somadas às perdas. O ganho material por unidade de comprimento, g_m , em uma primeira aproximação, é função linear da densidade de portadores na camada de condução [1–3]:

$$g_m(n) = a(n - n_0), \quad (2-1)$$

onde, a é a variação do ganho em relação a n , o ganho *diferencial*; n é a densidade de portadores na região ativa e n_0 é a densidade de portadores na transparência. Definindo g como o ganho interno, tem-se [2]:

$$g(n) = \Gamma v_g g_m(n) = \Gamma v_g a(n - n_0). \quad (2-2)$$

Na equação 2-2, Γ é o fator de confinamento do campo óptico na região ativa e v_g é a velocidade de grupo do campo incidente. O ganho interno é a taxa de emissão estimulada. O ganho líquido interno, g_L , é o ganho interno menos as perdas internas. Assim [1],

$$g_L(n) = g(n) - \alpha_t, \quad (2-3)$$

onde α_t representa as perdas totais no dispositivo, e é a soma das perdas no semiconductor com as perdas devido à refletividade residual das faces do amplificador.

O ganho do amplificador, i.e., do dispositivo todo, é determinado através da integração da potência ao longo do amplificador, pois, pela Lei de Beers [2]:

$$\frac{\partial P(n, z')}{\partial z'} = g_L(n) P(n, z'). \quad (2-4)$$

A potência $P(n, z')$ inclui a potência de todos os sinais de entrada. A integração resulta em:

$$P(n, z) = P_{in} e^{g_L(n)z}. \quad (2-5)$$

Definindo G como sendo a razão das potências de saída e entrada:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (2-6)$$

e, como, $P_{out}(n, L) \equiv P(n, z)|_{z=L} = P_{in} e^{g_L(n)L}$, onde L é o comprimento do amplificador, G é:

$$G(n, L) = \frac{P_{in} e^{g_L(n)L}}{P_{in}} = e^{g_L(n)L}. \quad (2-7)$$

2.2.1

Saturação de ganho

No ítem 2.2, assumiu-se ganho *linear*. Esta análise é apenas correta para “pequenos sinais”; sinais mais fortes que esses saturarão o amplificador, fazendo com que a análise prévia deva ser adaptada.

A saturação de ganho ocorre quando o ganho do dispositivo se torna não-linear; isto resulta da quantidade finita de portadores disponíveis para que haja ganho, i.e., à medida que a potência de sinal aumenta, a disponibilidade de portadores na região ativa diminui ao ponto de acarretar uma redução do ganho do amplificador [1–3].

Isto pode ser entendido pela dependência do ganho interno com a potência de entrada [2]. Quando a potência incidente no amplificador se aproxima da potência de saturação - definida como a potência para a qual o ganho cai à metade - o amplificador deixa de ser linear com a potência, i.e., o ganho decai com um aumento de potência [2]. Para o ganho total, G [3]:

$$G = \frac{G_0}{1 + \frac{P_{in}}{P_{sat,in}}}, \quad (2-8)$$

onde, G_0 é o ganho não-saturado, chamado de ganho para “pequenos sinais”; $P_{sat,in}$ é a potência de saturação de entrada.

Além dos sinais de entrada no SOA, o ganho deste também é influenciado pelo ruído gerado internamente pelo processo de amplificação [1, 12], que será descrito no ítem 2.2.2;

Uma curva de exemplo, para um ganho de “pequenos sinais” de 1000 ou 30dB pode ser vista na Figura 2.4.

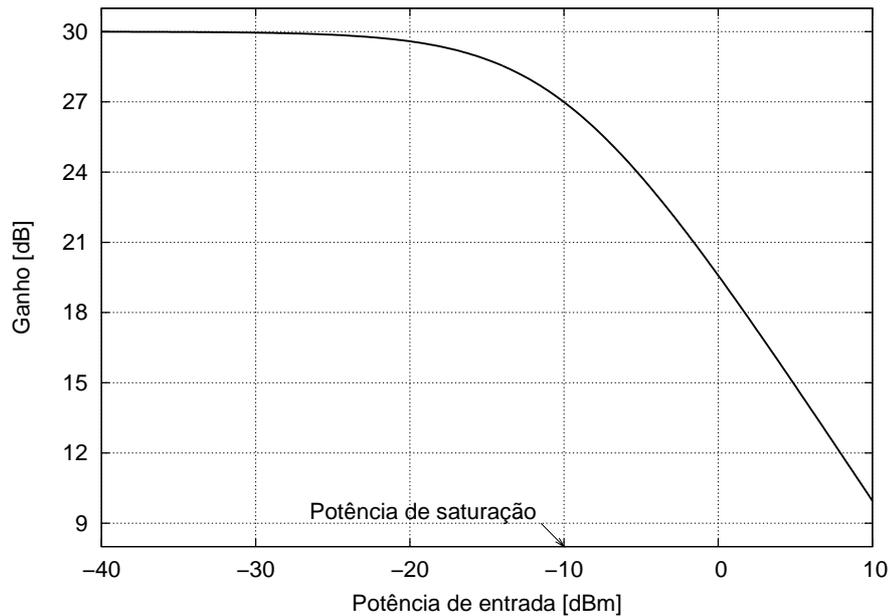


Figura 2.4: Exemplo de curva de saturação de ganho, para $G_0 = 30 \text{ dB}$. A potência de saturação de entrada é de -10 dBm , conforme indicado.

A saturação de ganho pode distorcer consideravelmente o sinal e, por isso, é um fator limitante para a aplicação de SOAs em enlaces multicanais [1, 2], devido aos efeitos prejudiciais da intermodulação e modulação imposta por outros canais [24]. Estes efeitos só são possíveis porque os SOAs possuem tempos de resposta muito rápidos, da ordem do *nanossegundo* [12], o que faz com que as variações em amplitude presentes em um sinal sejam percebidos em outro. Esta característica de distorção de sinal fez com que os SOAs fossem preteridos em relação aos EDFAs para a amplificação de vários canais WDM [2, 12]. Todavia, é este comportamento que permite a estes amplificadores operarem como conversores de comprimento de onda [1–3, 12].

2.2.2 Ruído do amplificador

Todos os amplificadores ópticos produzem ruído originado pela emissão espontânea [1–3]; o ruído dominante em SOAs é a ASE - *Amplified Spontaneous Emission*: ela surge no SOA como resposta à emissão espontânea, que é amplificada em seguida no dispositivo. A origem da ASE está, pois, na associação de duas transições de portadores em amplificadores ópticos:

1. Emissão espontânea, que gera fótons de vários comprimentos de onda dentro da banda de emissão do SOA, com fases aleatórias; e,
2. Emissão estimulada subsequente à emissão espontânea, que amplifica os fótons gerados pela transição anterior.

Os fótons gerados por emissão espontânea possuem uma grande gama de valores de comprimento de onda [1]. Então, o que se segue é um espectro de fótons de fases e direções aleatórias que são amplificados por todo o espectro de ganho. Este é um fenômeno incoerente, em oposição à emissão estimulada, que, por preservar a frequência e a fase do fóton original, é coerente.

A ASE pode ser um limitante grave para a operação em redes ópticas, podendo se acumular em uma cadeia de amplificadores. Ademais, se a injeção de portadores for muito alta, o SOA pode ficar auto-saturado, i.e., saturado pela própria emissão espontânea [12].

O ruído em um SOA pode ser quantificado pelo fator de ruído, n_{sp} ; este é a razão entre a densidade de portadores na banda de condução pela diferença entre as densidades de portadores nas bandas de condução, n_2 , e de valência, n_1 [2]:

$$n_{sp} = \left(\frac{n_2}{n_2 - n_1} \right). \quad (2-9)$$

Como, na eq. 2-9, o valor de n_1 nunca será zero [25], o fator de ruído do SOA sempre será maior que 1. A densidade espectral de potência da ASE (co-propagante) pode ser dada por [26]:

$$S_{ASE} = \int_0^L S_{esp} \exp \left[\int_z^L g_L dz' \right] dz, \quad (2-10)$$

onde S_{esp} é a taxa de emissão espontânea por unidade de comprimento em um único comprimento de onda, e é definida por [26]:

$$S_{esp} = g_m n_{sp} \frac{hc}{\lambda'}, \quad (2-11)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo. O valor total de potência de ruído na saída do amplificador é [26]:

$$P_N = \int^{\Delta\lambda} S_{ASE} d\lambda' \quad (2-12)$$

$$P_N = \int^{\Delta\lambda} \left[\int_0^L S_{esp} \exp \left(\int_z^L g_L dz' \right) dz \right] d\lambda', \quad (2-13)$$

onde $\Delta\lambda$ é o intervalo de comprimentos de onda no qual o fenômeno da ASE ocorre.

2.2.3

Dinâmica de ganho

A densidade de portadores na região ativa é função de vários parâmetros, não sendo constante durante a operação de um sinal modulado; esta depende das taxas de: injeção, emissão estimulada e de recombinação de portadores [2, 3]. A variação do número de fótons é função das emissões estimulada e espontânea menos a taxa de perda de fótons [2]. As variações da densidade de portadores e de fótons formam um sistema de equações de taxa [2, 3]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I}{Vq} - gS - \frac{n}{\tau_R} \quad (2-14)$$

$$\frac{dS}{dt} = gS + gn_{sp} - \frac{S}{\tau_S}, \quad (2-15)$$

onde, I é a corrente injetada no amplificador, q é a carga do elétron e, V é o volume da região ativa. S é o número de fótons na região ativa, e n_{sp} é o fator de ruído do amplificador; τ_R é o tempo de vida médio de portadores, devido à recombinação destes, dado por [2, 3]:

$$\tau_R^{-1} = A_{nr} + Bn + Cn^2, \quad (2-16)$$

onde, A_{nr} é o coeficiente de recombinação não-radioativa, devido a efeitos de superfície, defeitos ou impurezas [27], B é o coeficiente de recombinação radiativa [13, 28], e C é o coeficiente de recombinação de Auger. Por fim, τ_S é o tempo médio de vida dos fótons, definido como [2]:

$$\tau_S^{-1} = v_g \alpha_t = v_g (\alpha_{int} + \alpha_r), \quad (2-17)$$

onde, α_{int} é o coeficiente das perdas internas do amplificador e α_r é o coeficiente de perdas devido à refletividade residual nas faces do amplificador.

Estes tempos de vida são os fatores determinantes das frequências máximas de amplificação ou de conversão de comprimento de onda. O valor de τ_R restringiria a operação de SOAs a taxas de poucos *Gbps* [4, 8, 29, 30], já que este tempo é de aproximadamente 500 *ps* [4]. Entretanto, a dinâmica do ganho varia também com a emissão estimulada [29, 31]. Pode-se definir um tempo de vida efetivo que leva em consideração também a influência da densidade de fótons na região ativa [29, 32, 33]:

$$\tau_e^{-1} = \frac{dR_{esp}}{dn} + \frac{d}{dn}(gSv_g), \quad (2-18)$$

onde, R_{esp} é a taxa de emissão espontânea, dada por $R_{esp} = gn_{sp}$, e o segundo termo é o recíproco do tempo relacionado às transições estimuladas. O tempo de vida efetivo indica o quão rápido a densidade de portadores pode ser modulada [31].

Durante a operação de um sinal pulsado que sature o amplificador, o tempo de resposta de algum outro sinal na “subida” do pulso é dado pela taxa de emissão estimulada [34], que é alta; quando o pulso “desce”, a limitação da modulação é dada pelo tempo de *recuperação de ganho* [29,30,34], pois não há sinal no amplificador [35]. Este tempo é dado por [29,35]:

$$\tau_g^{-1} = \tau_{nr}^{-1} + R_{esp} S, \quad (2-19)$$

onde $\tau_{nr} = A_{nr}^{-1}$ é o tempo de recombinação não-radiativa.

Então, de modo a reduzir o tempo de recuperação do ganho, deve-se aumentar a taxa de emissão estimulada [30], seja por aumentar a corrente de polarização [31] ou pelo uso de outro sinal incidente no SOA. Aumentar o tamanho da região ativa do SOA também atinge este objetivo [8,36], já que este suportará uma maior corrente para uma mesma densidade de corrente, por ter maior volume. Entretanto, um amplificador mais longo tem sua largura de banda óptica de ganho reduzida [2,8]. O limite para a redução do tempo de recuperação acontece quando a ASE satura o amplificador [36].

2.2.4

Espectro de ganho e largura de banda

O processo de ganho no SOA também é função do comprimento de onda [1,2,13,14,23,37,38]. O ganho interno do SOA pode ser modelado como tendo perfil parabólico, e onde o comprimento de onda de pico λ_p é função da densidade de portadores [14,23]. De [23]:

$$g_m(n, \lambda) = a(n - n_0) + b[\lambda - \lambda_p(n)]^2, \quad (2-20)$$

e,

$$\lambda_p(n) = \lambda_0 + (n - n_0) \frac{d\lambda}{dn}, \quad (2-21)$$

onde, b é uma constante relacionada à largura espectral do ganho [23] e λ_0 é o comprimento de onda de pico na transparência [38]. Outros modelos, como os cúbico ou Lorentziano, são mais acurados em sua aproximação do espectro de ganho e também podem ser utilizados [38].

A menor frequência que pode ser amplificada corresponde à energia $h\nu_{min} = E_c - E_v = E_g$, a diferença entre as energias das bandas de condução (E_c) e valência (E_v), e E_g é a energia do *bandgap*; então, a inversão de população ocorrerá primeiro para esta frequência, ν_{min} [12].

À medida que a injeção de portadores se torna maior, os elétrons ocuparão níveis de energia mais altos, e sinais com comprimentos de onda menores poderão ser amplificados [12]. Então, pode-se inferir que o fator $d\lambda/dn$ da eq. 2-21 é menor que zero, o que é comprovado experimentalmente [14, 23].

A *largura de banda* de um amplificador é o intervalo de frequências (ou comprimentos de onda) nos quais o ganho do dispositivo cai à metade de seu valor máximo. Para SOAs, a largura de banda do ganho interno é independente do ganho máximo [39], enquanto o ganho do amplificador é proporcional ao comprimento deste [14]. Os valores de frequências que percebem ganho internamente são determinados pelos níveis de quase-Fermi das bandas de valência e de condução. De [39]:

$$\frac{E_g}{h} < \nu_{amp} < \frac{E_{fc} - E_{fv}}{h}, \quad (2-22)$$

onde E_{fc} e E_{fv} são os níveis de quase-Fermi das bandas de condução e valência. Este intervalo representa as frequências que podem ser amplificadas internamente.

2.3

Materiais e estruturas

As características operacionais de um SOA como: ganho, espectro de ganho etc., são função também do tipo de material utilizado para se construir o SOA [1] e da estrutura deste [2].

2.3.1

Materiais

O comprimento de onda do ganho não é o único fator na escolha dos materiais para a construção do diodo [23]; o parâmetro de “casamento de rede” entre os materiais envolvidos também desempenha papel fundamental na escolha dos materiais [2, 13]. Por isto, para a emissão de luz na “janela” de telecomunicações de 1550 nm, os materiais utilizados para a construção dos amplificadores são: InP-InGaAsP e InGaAs-InGaAsP [1, 23].

2.3.2 Estruturas

Como citado no ítem 2.1, nos primeiros lasers, uma junção $p - n$ foi utilizada com sua camada de depleção como região ativa, ou de ganho. Entretanto, tal abordagem apresenta inúmeras desvantagens, como o pouco confinamento da luz e dos portadores. Estas características fizeram os primeiros lasers serem operados com refrigeração forçada [2, 13, 23]. Somente com o advento de novas estruturas que confinam, ao mesmo tempo, o campo óptico e os portadores, foi possível a operação à temperatura ambiente [23], além de apresentarem menores valores de correntes de limiar [13, 23].

Por isto, na prática, não se utiliza uma simples junção $p - n$ [1, 2, 12, 13] para se construir um SOA; é usada uma camada extra entre as camadas p e n de modo a confinar o ganho em uma camada menor, a *ativa*. A camada ativa é intrínseca, i.e., não dopada, ou pouco dopada [2, 3].

Comumente, fabrica-se um SOA fazendo uma construção chamada *heteroestrutura*, que é uma interface entre materiais semicondutores de diferentes *bandgaps*, i.e., as diferenças de energias entre as bandas de valência e condução não são iguais [2]. Com um *bandgap* menor, a heteroestrutura gera uma maior densidade de portadores na região ativa do dispositivo [2, 13], ocasionando um maior valor de índice de refração.

Os diagramas de bandas de energia por camada de um SOA podem ser vistos nas Figuras 2.5 (a) e (b) para os casos de uma simples junção $p - n$, ou *homojunção* e para uma dupla heteroestrutura ou *heterojunção*.

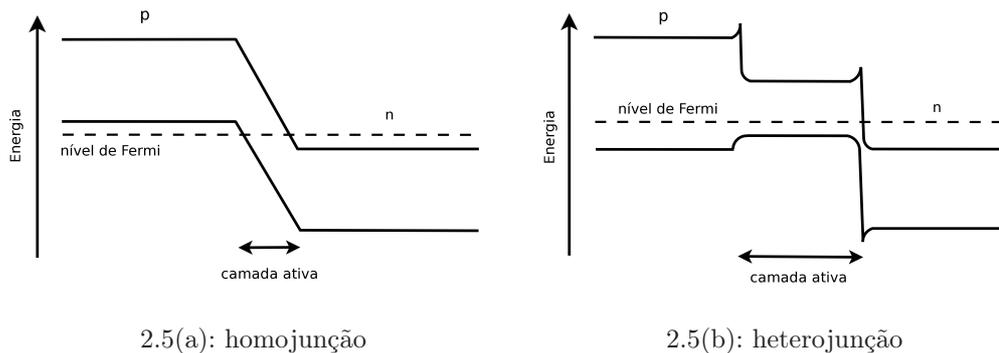
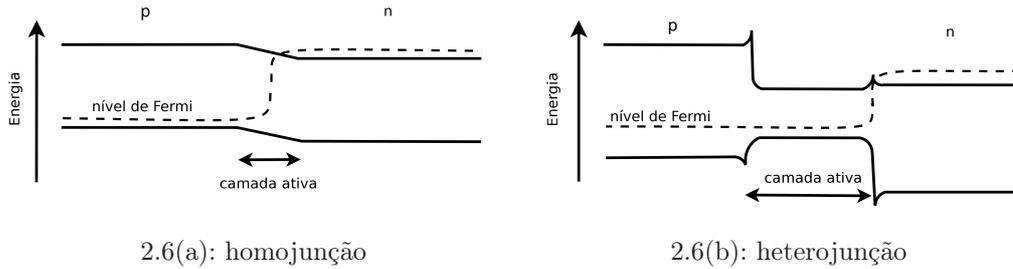


Figura 2.5: Diagrama de bandas de energia para uma homojunção e uma dupla heterojunção, no equilíbrio térmico.

Os diagramas de energia mudam após a aplicação da polarização direta nas junções. As Figuras 2.6 (a) e (b) retratam essas situações. Pode-se ver que nesta condição os portadores estão mais próximos.



2.6(a): homojunção

2.6(b): heterojunção

Figura 2.6: Diagrama de bandas de energia para uma homojunção e uma dupla heterojunção, polarizadas diretamente.

A utilização de dupla heteroestruturas é, então, duplamente vantajosa: a diferença brusca de *bandgaps* entre os materiais ajuda a confinar os portadores na camada ativa e, como a camada ativa apresenta um índice de refração ligeiramente maior que das camadas *p* e *n*, tornando-se um guia de onda dielétrico [2]. Por estas razões, em geral, os amplificadores são construídos de dupla heteroestruturas, para um confinamento maior da luz e dos portadores [1, 2, 12]. Uma outra vantagem das heteroestruturas foi a possibilidade da operação à temperatura ambiente, pois o confinamento de portadores ocasionou uma menor densidade de corrente, permitindo a operação do dispositivo montado sob um dissipador [23].

No tocante às dimensões da região ativa, um SOA pode ser classificado como *Bulk* ou *Quantum-confined*:

Bulk Quando as dimensões físicas da região ativa são bem maiores que o comprimento de onda de *de Broglie* [1, 16], definido por: $\lambda_B = \hbar/p$, onde \hbar é a constante de Planck e p é o momento do portador.

Quantum-confined Quando uma ou mais dimensões da região ativa se torna comparável ao λ_B , ocorrerá a quantização do movimento dos portadores. Divide-se em: *quantum well*, *quantum-dash* ou *quantum wire*, e, *quantum dot*.

Dispositivos do tipo *quantum-well* são aqueles cujo confinamento de portadores ocorre em uma única direção [1, 2, 13, 39]. Já os *quantum-dash* confinam os portadores em duas direções [39, 40]. Por fim, os *quantum-dot* são regiões onde o confinamento é nas três dimensões, chamando-se este local de ponto quântico [39]. Pode se construir uma estrutura que contenha várias dessas regiões em seqüência, denominando-se o dispositivo de múltiplos poços, fios ou pontos quânticos [1, 39].

No que tange ao movimento dos portadores, nos dispositivos do tipo *bulk*, os portadores se movimentam de maneira livre pelo material; então, a densidade de estados de energia, neste caso, é contínua [1]. Enquanto nos *Quantum-confined* o movimento dos portadores fica restrito à direção do confinamento [13,39], então a energia cinética nesta região se torna quantizada; havendo, então, a quantização da densidade dos estados de energia [1,13,16]. Esta diferença na densidade de estados de energia leva a alterações nas taxas de recombinação e de irradiação [13]; para os *quantum-confined*, por exemplo, gera um espectro de ganho diferencial mais plano [1], o que faz estes dispositivos apresentarem larguras de banda de ganho maiores que os *bulk* [1]. Estas estruturas também apresentam um maior confinamento do campo óptico [3].