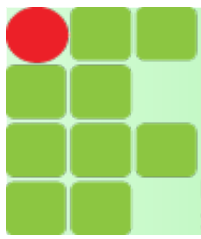


INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Campus São José – Área de Telecomunicações

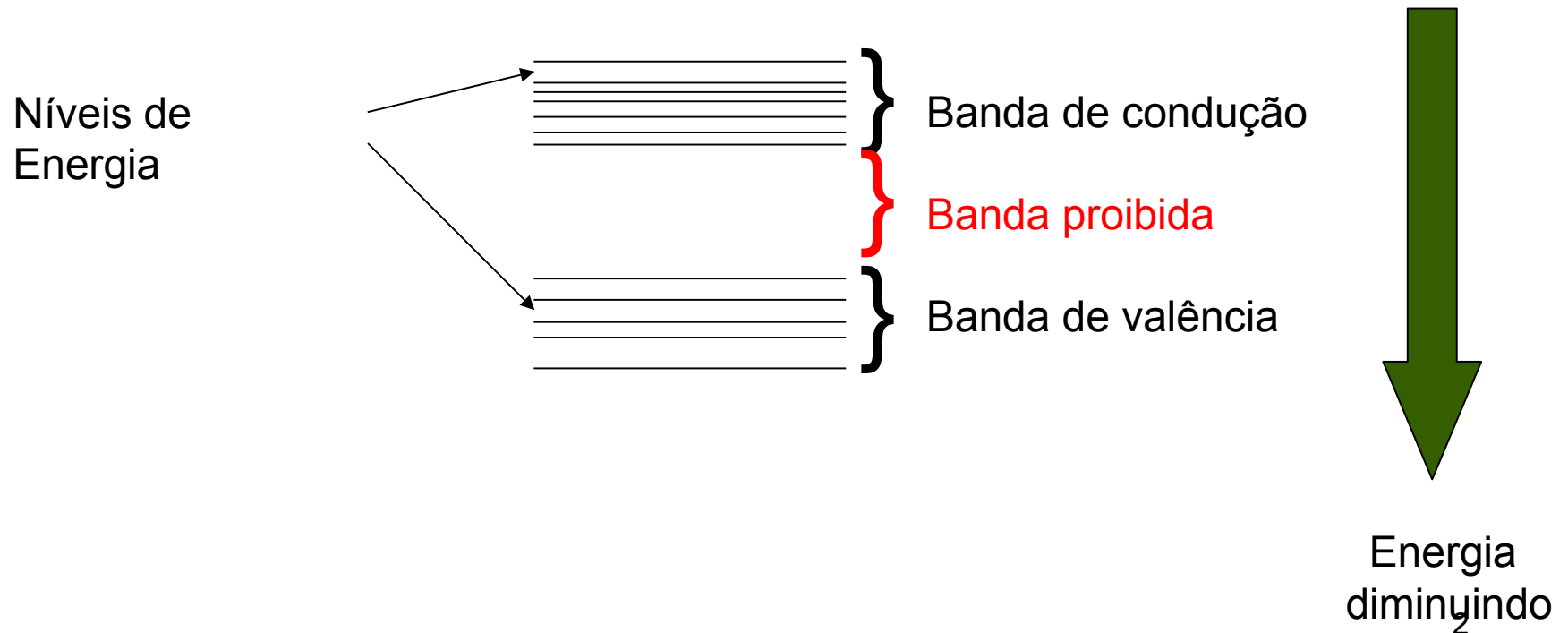
Fonte luminosas e Fotodetectores

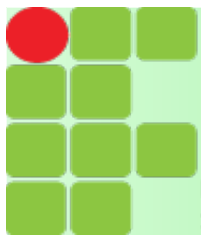


Geração da luz

Bandas de Energia

Em um material semiconductor os elétrons ocupam níveis de energia que estão agrupados em duas bandas: banda de condução e banda de valência.



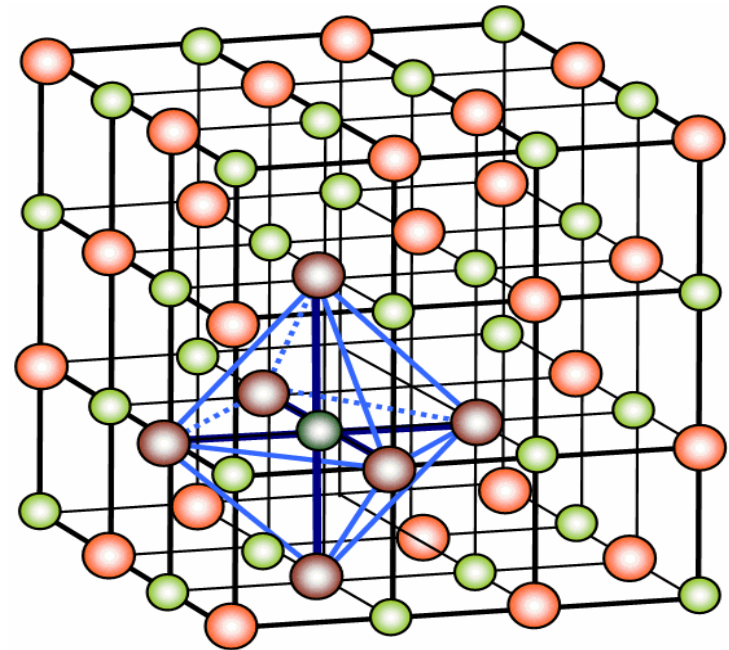


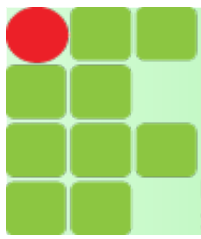
Geração da luz

Os elétrons dos níveis pertencentes a banda de valência estão presos as ligações covalentes da rede cristalina do material.

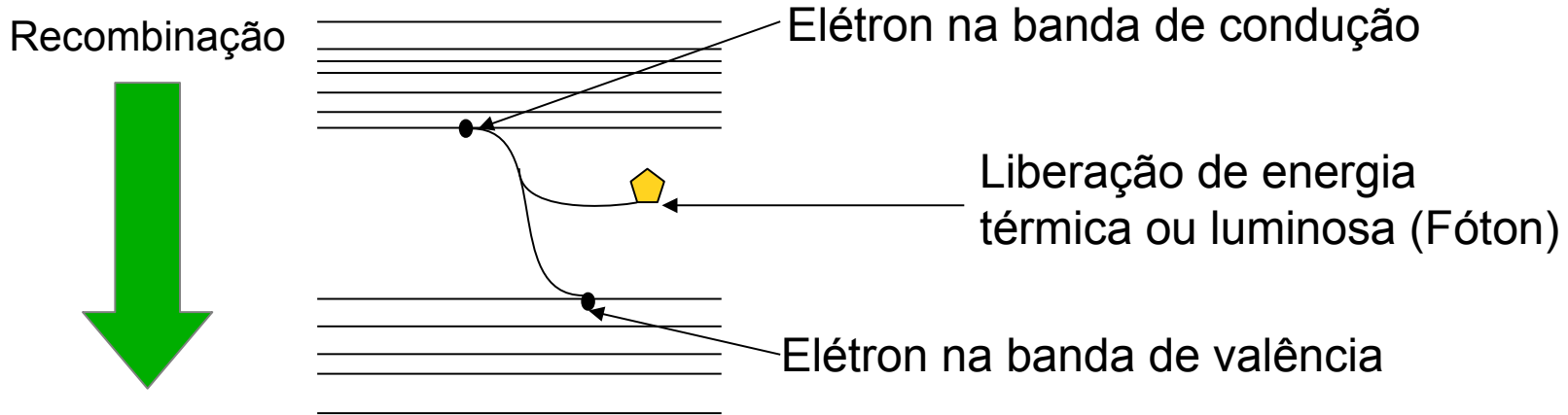
Os elétrons dos níveis da banda de condução estão livres para circular no material.

Entre as duas bandas mencionadas existe uma terceira, denominada banda proibida. Esta banda é um intervalo de níveis de energia que os elétrons não podem ocupar.





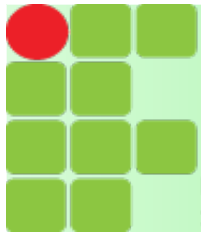
Geração da luz



Toda vez que um elétron volta a banda de valência, isto é, se “recombina” com uma lacuna, é liberada energia na forma de fóton ou calor.

Fóton é um pacote de energia, é a estrutura da luz no seu modelo corpuscular.

A luz nos semicondutores é gerada através da liberação de fótons nas recombinações.



Geração da luz

O comprimento de onda dos fótons depende da diferença entre os níveis de energia da banda passante e da banda de valência (E_g). Conforme indica a seguinte equação:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g}$$

onde:

E_g - energia da banda proibida em eV

1 eV corresponde a $1,602 \times 10^{-19}$ J

h – constante de Planck $6,63 \times 10^{-34}$ J.s

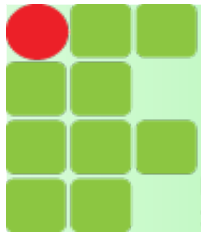
c – velocidade da luz $3,00 \times 10^8$ m/s

$h.c = (6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8) / 1,602 \times 10^{-19} = 1,24 \mu\text{m}$

Ex:

Diodos de Gálio $E_g = 1,43$ eV $\lambda \cong 0,87 \mu\text{m}$

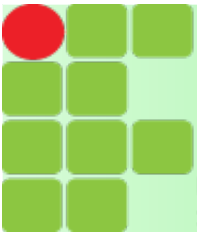
Fosfato de Índio $E_g = 1,35$ eV $\lambda \cong 0,92 \mu\text{m}$



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

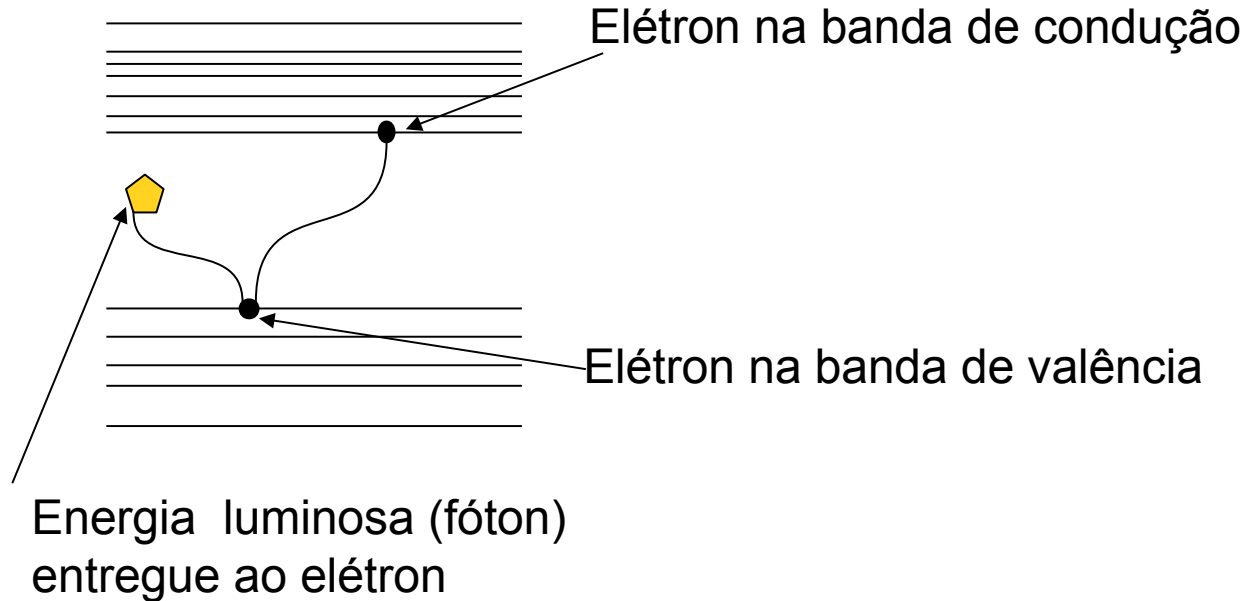
Geração da luz

Ex: Qual a diferença máxima de energia entre a banda de condução e a banda de valência dos semicondutores que liberam luz nos λ s de: 1310 nm, 1550 nm.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Geração de corrente a partir da luz

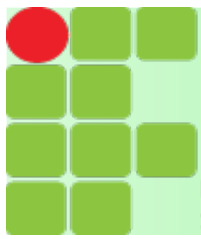


A passagem de um elétron da banda de valência para a banda de condução ocorre quando o elétron adquire energia suficiente para ultrapassar a banda proibida.

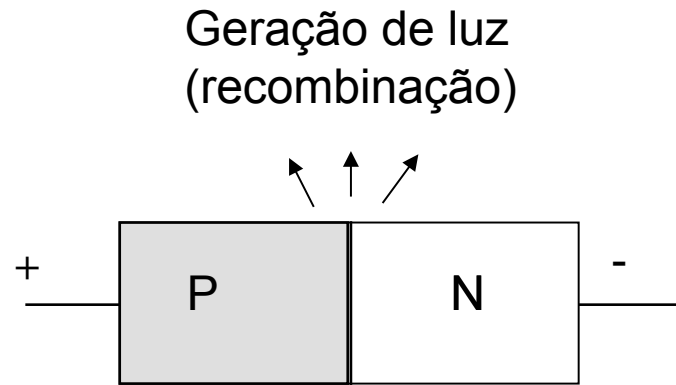
Ex:

Diodos de Gálio $E_g = 1,43 \text{ eV}$, $\lambda \approx 0,87 \mu\text{m}$

Fosfato de Índio $E_g = 1,35 \text{ eV}$, $\lambda \approx 0,92 \mu\text{m}$

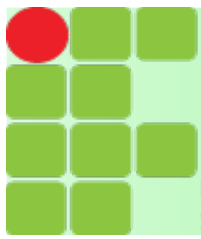


Junção PN

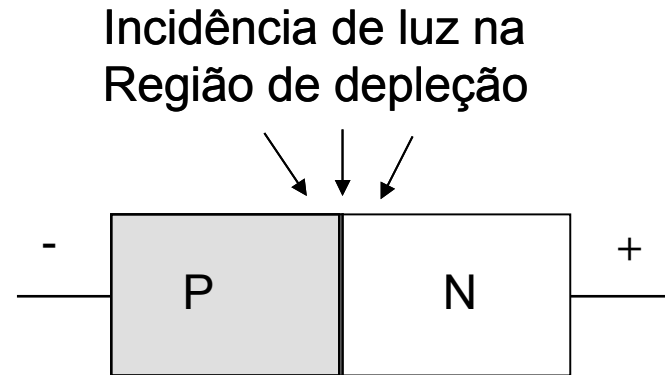


Polarização direta: as correntes de portadores majoritários são criadas em ambos os lados de junção.

Quando uma junção PN é polarizada diretamente, correntes de portadores majoritários ocorrem em ambos os lados da junção. Como resultado destas correntes surge na região de depleção uma alta concentração de lacunas e elétrons, tal concentração provoca um grande número de recombinações. Em alguns tipos de semicondutores há geração de luz (fotogeração).



Junção PN

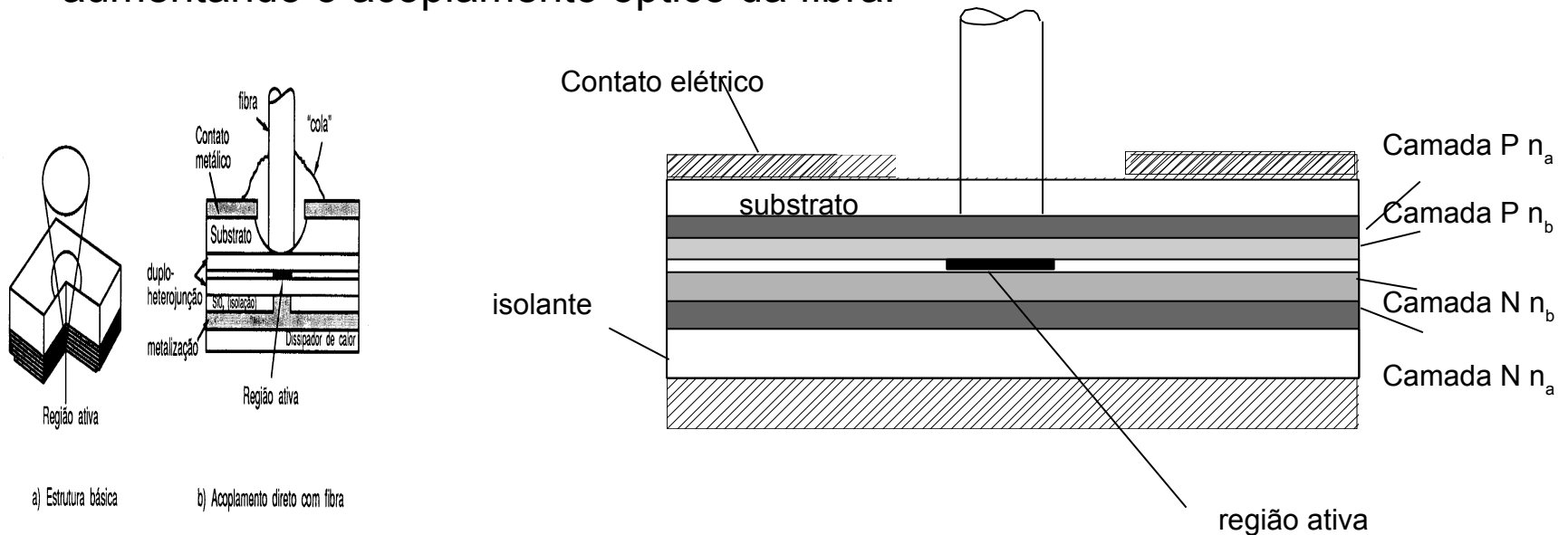


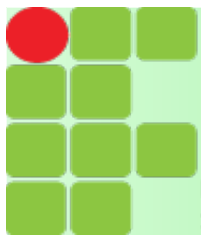
Polarização reversa, correntes de portadores minoritários são criadas em função da incidência de luz na região de depleção

Na polarização reversa da junção PN não há injeção de portadores de um lado para o outro e a corrente fica limitada a geração de novos portadores na região central. Estes portadores, em alguns semicondutores, são criados pela absorção de fótons. Sendo este o princípio utilizado nos fotodetectores.

LED de Heterojunção

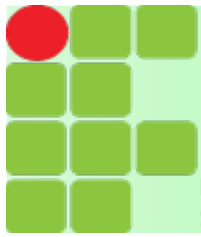
É um diodo onde a junção PN é formada por materiais que possuem estrutura com índices de refração diferentes. A estrutura serve para direcionar a luz, diminuindo o espalhamento e consequentemente aumentando o acoplamento óptico da fibra.





LASER - (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation - Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação).

No diodo laser a intensidade luminosa é amplificada através da realimentação da luz gerada. O fóton gerado pela emissão espontânea interage com outro elétron na banda de condução, induzindo-o a recombinar-se com uma lacuna. Isto é possível devido a estrutura do diodo que produz uma cavidade ressonante onde os fótons ficam confinados devido a sucessivas reflexões.



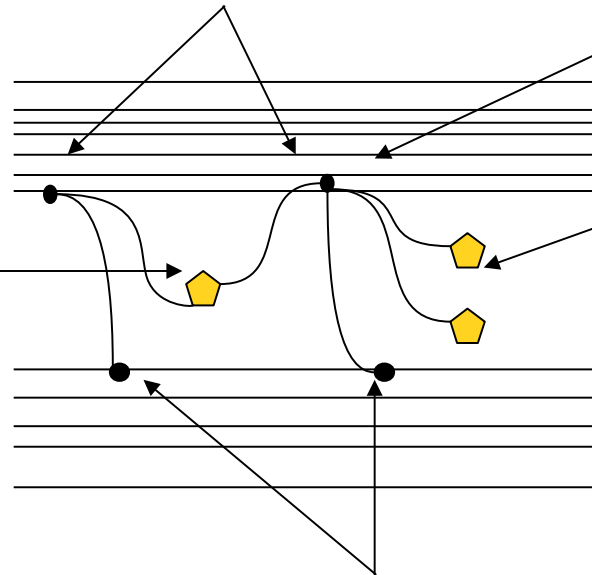
Laser

Interação fóton – elétron
na banda de condução

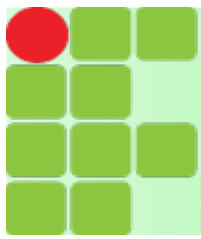
Elétrons na banda de condução

Liberação de energia
térmica ou luminosa (Fóton)

Liberação de dois
fótons com mesmo λ

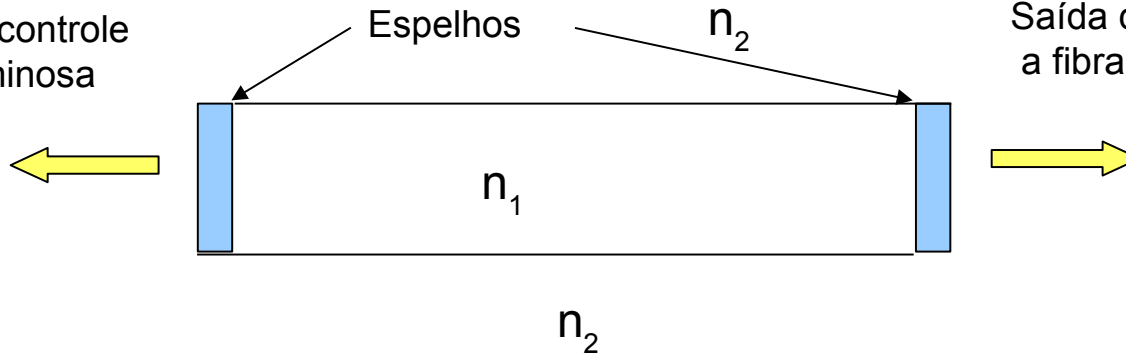


Elétrons na banda de valência



Laser

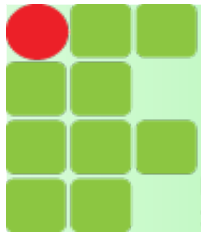
Saída de luz para controle
da intensidade luminosa



Saída de 5% da Luz para
a fibra.

A região ativa do Laser é uma cavidade ressonante tipo Fabry-Perot, delimitada por dois espelhos com reflexibilidade próxima de 100%. A maioria dos fótons que atingem os espelhos é refletida de volta para a região ativa e interagem com elétrons da banda de condução, gerando novos fótons. Estes novos fótons apresentam mesmo comprimento de onda do fóton que lhe deu origem.

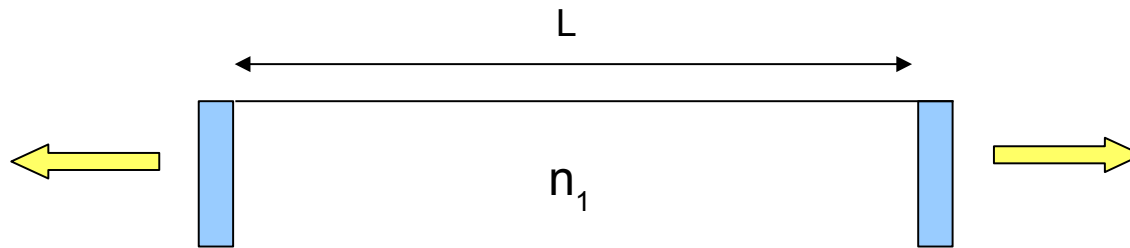
A recombinação fóton-elétron também amplifica a intensidade luminosa, pois após a interação o elétron decai liberando dois fótons, o original e mais um).

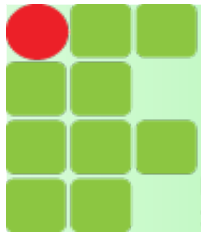


Nem todos os fótons gerados na cavidade FP serão amplificados, apenas aqueles que o comprimento da cavidade corresponda a um múltiplo inteiro da metade do λ do fóton.

$$L = m \cdot \frac{\lambda}{2}$$

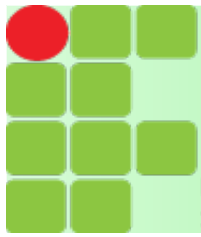
Onde m é um número inteiro.



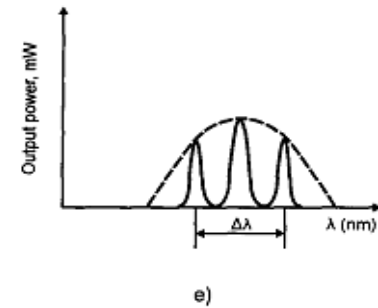
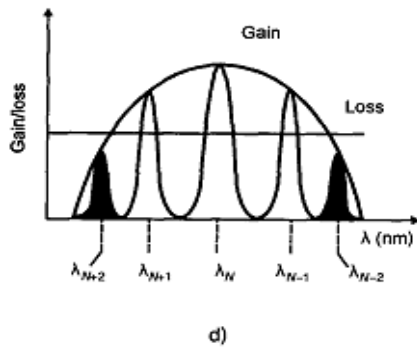
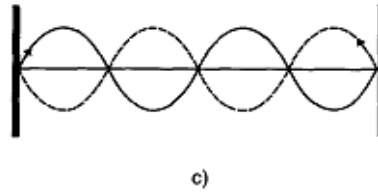
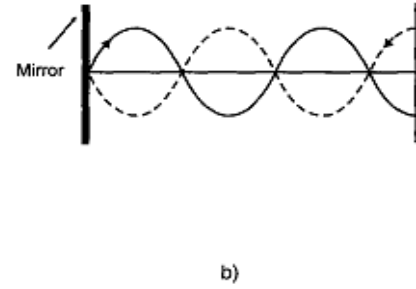
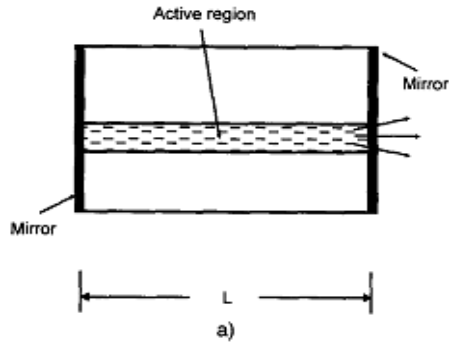


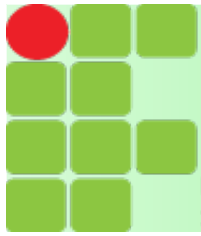
Laser

A seleção de λ s na cavidade de FP torna a largura espectral do laser menor do que a dos LEDs e, mesmo na faixa de operação do laser apenas alguns λ s são amplificados. Em função disso a luz do laser é mais coerente, possui menos λ s e diminui a dispersão nas comunicações ópticas, permitindo maiores distâncias entre Tos e Ros e o emprego de maiores taxas de transmissão.



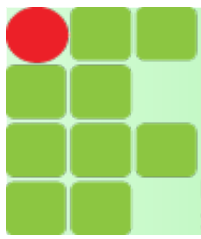
Laser - Largura espectral





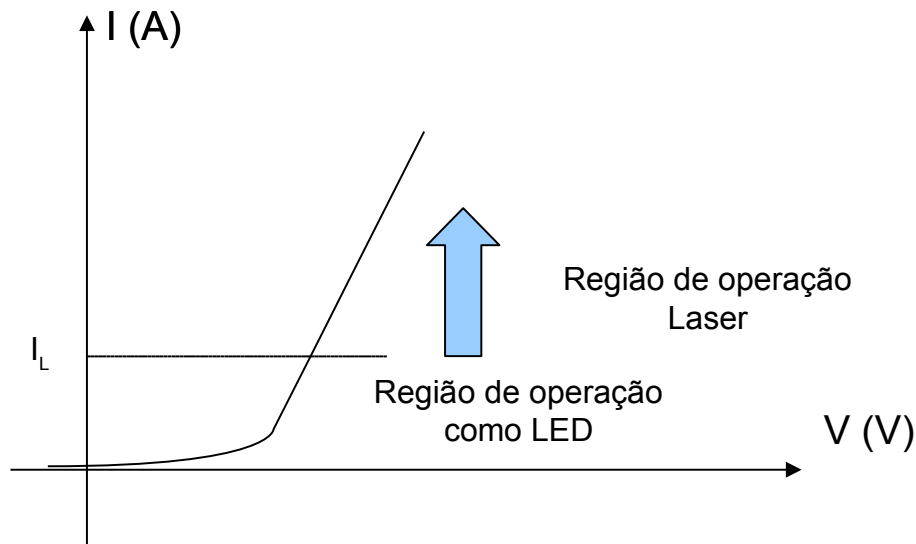
Laser

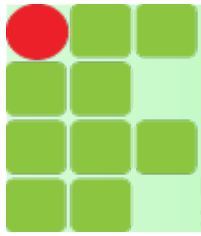
- 1) Um Laser possui $L = 775 \mu\text{m}$ e opera com $\lambda = 1550\text{nm}$. Qual a largura espectral entre o segundo modo abaixo e segundo modo acima do comprimento de onda de operação do Laser?
- 1) Um Laser possui $L = 195,25 \mu\text{m}$ e opera com $\lambda = 1562\text{nm}$. Qual a largura espectral entre o segundo modo abaixo e segundo modo acima do comprimento de onda de operação do Laser?



Laser

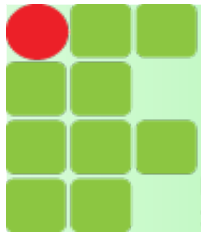
O efeito de amplificação da luz, “efeito laser”, na cavidade ressonante de um Laser só inicia após a população de fótons dentro da cavidade ultrapassar um certo limiar. Portanto, o efeito laser nos diodos só inicia após a corrente direta ultrapassar a corrente de limiar (I_L). Abaixo dessa corrente o diodo opera como um LED.





Laser

Os diodos lasers operam sempre acima da corrente de limiar, diferenciando os níveis alto e baixo dos sinais digitais através da intensidade de luz gerada. O funcionamento acima da corrente limiar é necessário para diminuir o tempo de subida do pulso luminoso, pois o tempo gasto para gerar um número de fótons suficientes para o início do efeito laser provocaria um tempo de subida maior do sinal. Um transmissor com tempo de subida maior aumenta a dispersão do sinal luminoso, limitando a taxa de transmissão a ser transmitida.



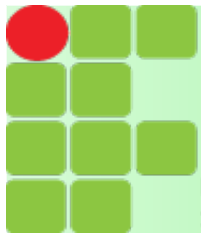
Laser

A resposta do laser modifica com o aumento da temperatura. O λ central e a largura espectral aumentam. Para diminuir as variações desses parâmetros são necessários circuitos de controle de temperatura.

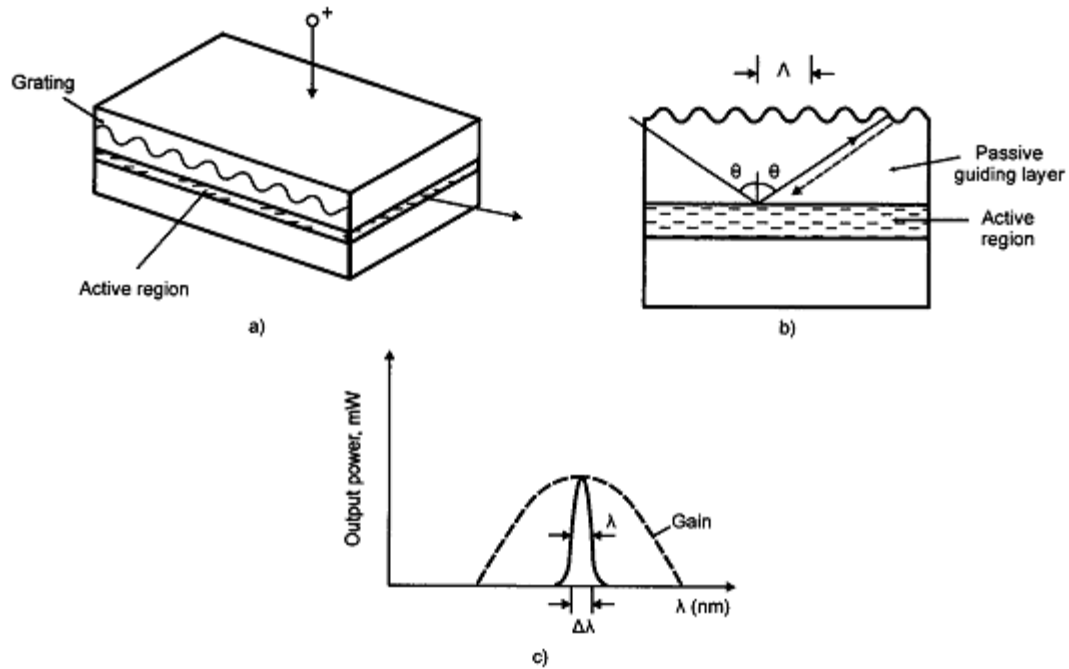
Os diodos Laser podem ser classificados em diodos multimodo e monomodo. Diodos multimodo são aqueles em que o pulso de luz gerado é composto por vários λ s. Enquanto que os diodo monomodo geram um pulso de luz com uma largura espectral menor.

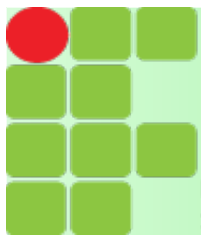
Os diodos DFB e DBR são os diodos monomodo mais comuns.

Nos diodos DFB (distributed feedback) a maior seleção dos λ s que irão compor o pulso de saída é obtida pela inserção de uma grade de difração na estrutura do diodo. A grade restringe o conjunto de λ s que serão amplificados.



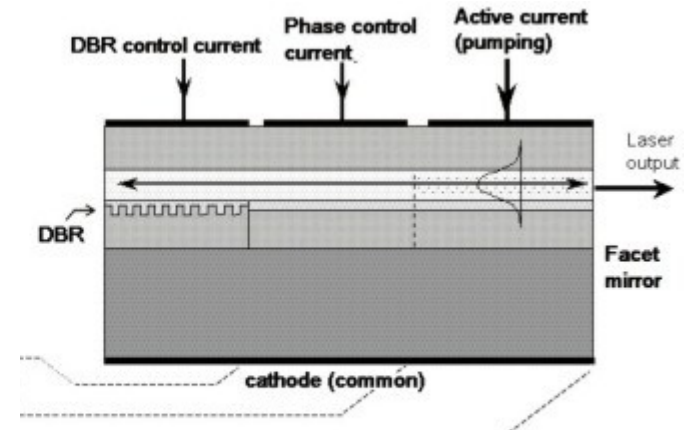
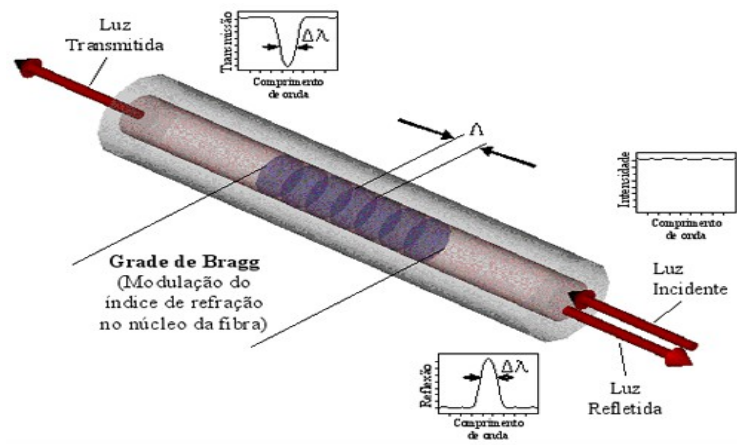
Laser DFB

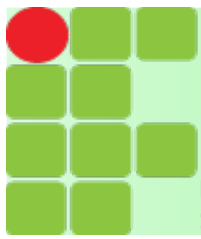




Laser DBR

O diodo DBR (distributed Bragg reflector) aumenta a seleção dos λ s através da inserção na região ativa de uma grade de Bragg. A grade de Bragg é obtida pela variação do índice de refração ao longo do comprimento da cavidade FP. Somente alguns λ s conseguem atravessar a grade, sendo os demais refletidos.



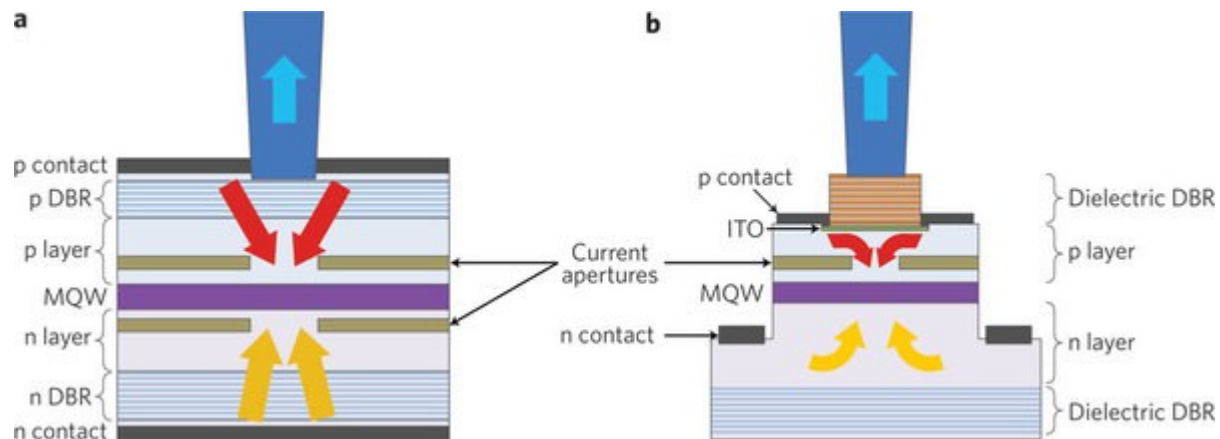


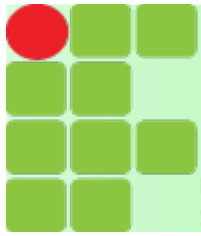
VCSEL

O VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) – laser com cavidade ressonante vertical e emissão de luz pela superfície.

Possui região ativa pequena quando comparado com a de outros LASERs, necessitando de espelhos com alta refletividade. A região pequena visa obter o comportamento da luz como Fóton e não como onda.

Os espelhos da cavidade do VCSEL é formado por uma pilha de camadas com índices de refração diferentes (Grade de Bragg)

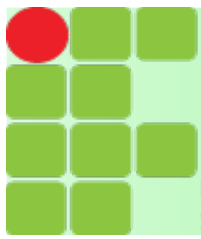




VCSEL

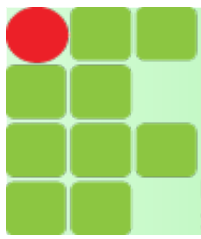
O VCSEL é um laser com custo de fabricação menor que vem substituindo o uso do LED em comunicações ópticas de curta e média distância.

Possui potências ópticas maiores, suporta taxas de transmissão superiores e luz de saída mais direcionada do que os diodos LED. Também apresenta maior estabilidade em relação a temperatura do que outros tipos de Laser.



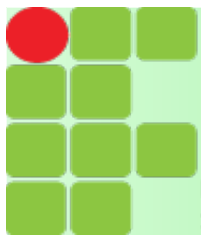
Fontes luminosas comparação entre LED, VCSEL e LASER

	LED	VCSEL	LASER
Potência óptica	Menor (1 μ W a 1 mW)	Média (dezenas de mW)	Maior (algumas centenas de mW)
Taxa de transmissão	Menor (< 1 Gbps)	Média (> 1Gbps)	Maior (10, 40 Gbps)
Largura espectral ($\Delta\lambda$)	Maior (dezenas a centenas de nm)	Média (dezenas de nm)	Menor (centenas de pm a alguns nm)
Circuito excitadores	Mais simples e baratos	Complexidade e custo intermediários	Mais complexos e caros
Perda por acoplamento com a fibra	Maior (> 10 dB)	Médio (próximo a 10dB)	Menor (entre 3 e 6 dB)

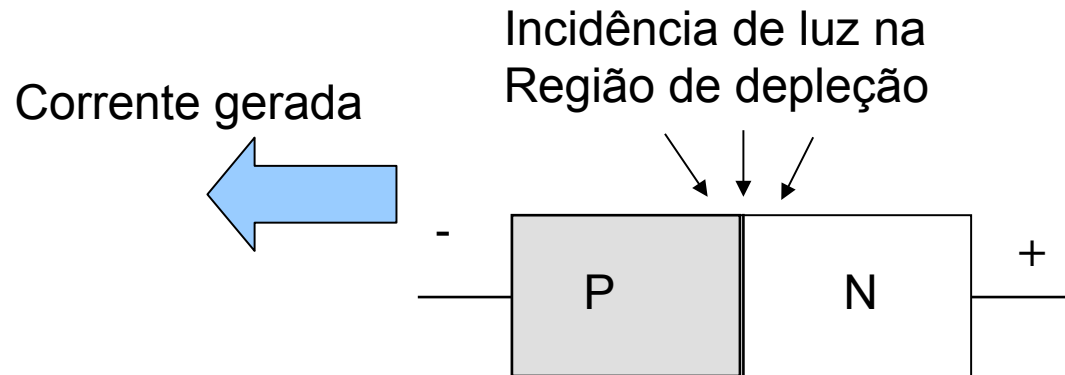


Fontes luminosas comparação entre LED, VCSEL e LASER

	LED	VCSEL	LASER
Corrente de limiar	Não	SIM	SIM
Relação corrente potência	Mais linear	Menos linear	Menos linear
Sensibilidade a temperatura	Mais estável, não necessita de circuitos de controle	Mais instável, a variação de temperatura provoca grandes variações na corrente, necessita de circuitos de controle	Mais instável, a variação de temperatura provoca grandes variações na corrente, necessita de circuitos de controle
Divergência do Feixe óptico	maior	médio	menor
Tempo de vida	maior	médio	menor
Custo	maior	médio	menor

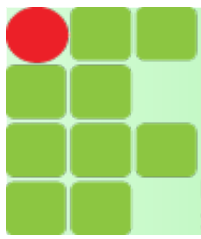


Fotodetectores



Polarização reversa, correntes de portadores minoritários são criadas em função da incidência de luz na região de depleção.

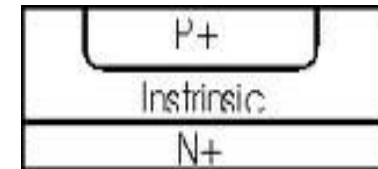
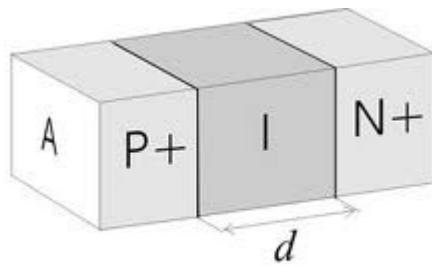
Com o diodo polarizado reversamente a corrente que circulará pelo mesmo será a corrente de escuro, resultante da absorção de energia do meio externo pelos elétrons, e a corrente gerada pela absorção de energia luminosa, a fotocorrente. Nos diodos fotodetectores é necessário garantir uma boa diferença entre o valor da fotocorrente e da corrente de escuro, pois apenas a fotocorrente carrega a informação do sistema de comunicação.



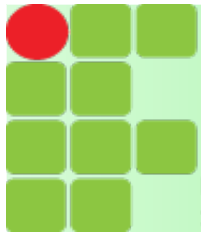
Fotodetectores

Os fotodetectores mais comuns em comunicações ópticas são os diodos PIN e os diodos de avalanche APD.

Os fotodetectores PIN são constituídos de três camadas semicondutoras, uma P, uma I (de intrínseca) ou π e outra N.



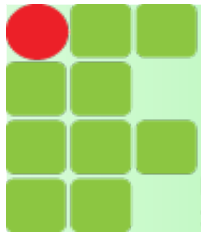
O objetivo da camada intrínseca é aumentar a região de depleção e diminuir a capacitância parasita do diodo. Geralmente a camada I é levemente dopada, tornando-se uma camada P ou N. Para diferenciar a camada intrínseca das demais, as camadas P e N são representadas com um sinal de + para indicar que são fortemente dopadas.



Semicondutor e energia da banda de valência:

semicondutor	E_g (eV)	Determine o comprimento de onda de corte dos seguintes semicondutores:
Si	1,17	a) Si; b) InP; d) InGaAs
Ge	0,775	
GaAs	1,424	Esses semicondutores podem ser utilizados como “fotodetectores” em quais janelas de transmissão?
InP	1,35	
InGaAs	0,75	
InGaAs	0,75	

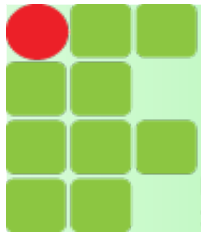
A luz com $\lambda > \lambda_c$ atravessa o semicondutor sem interagir com sua estrutura. Isto é o semicondutor é transparente para a luz.



Fotodetectores - PIN

A camada I é mais larga do que as camadas P e N. O tamanho da camada I deve atender os compromissos entre as necessidades de aumentar a região de depleção e a necessidade de manter o tempo de resposta do diodo em níveis baixos.

Os diodos PIN operam com tensões reversas próximas a 10V e são mais utilizados nas janelas de 850 e 1310 nm.

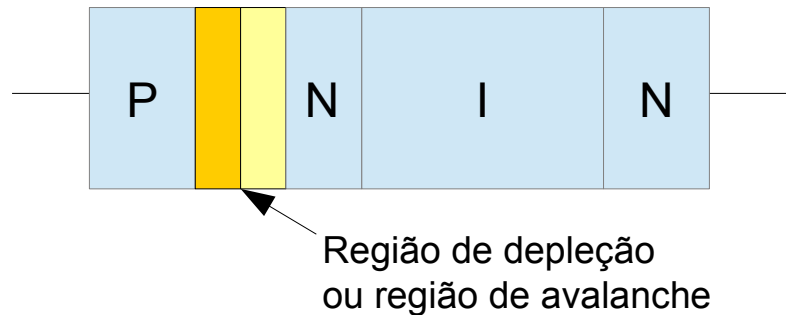


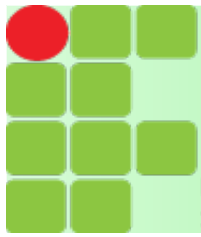
Fotodetectores - APD

Diodos de avalanche – APD (avalanche photodiode)

Esses diodos apresentam ganho de corrente interno. Após a geração dos elétrons e lacunas os mesmos são acelerados pelo campo elétrico existente na região de depleção e colidem com a estrutura cristalina, liberando outros elétrons.

Para o fotodetector operar no modo avalanche a tensão aplicada ao mesmo é próxima da sua tensão de ruptura.





Fotodetectores - APD

