

Luminescência

Propriedades Ópticas de Materiais

Prof. Humberto

(Material adaptado de M. Fox – Cap.5 e R. Tilley – Cap.9)

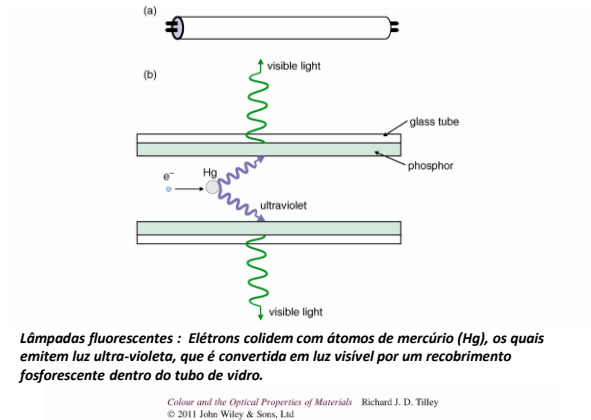
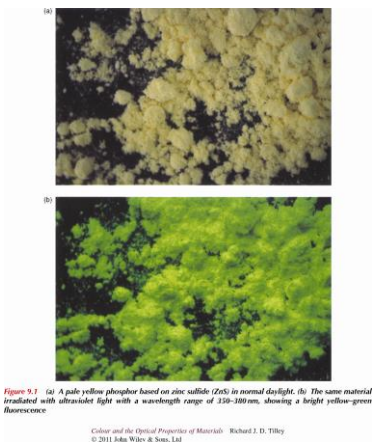
Introdução / Motivação

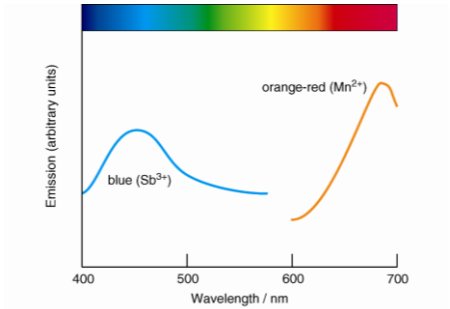
Quais as diferenças e semelhanças entre pirilampus e vagalumes?





ZnS

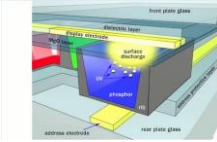
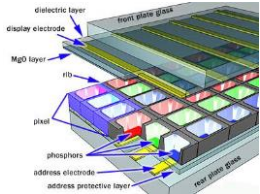




Espectro de emissão do Sb^{3+} (emissão azul) e Mn^{2+} (emissão no laranja e vermelho) em um tubo de lâmpada fosforescente.

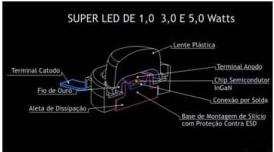
Colour and the Optical Properties of Materials Richard J. D. Tilley
© 2011 John Wiley & Sons, Ltd

TV a plasma

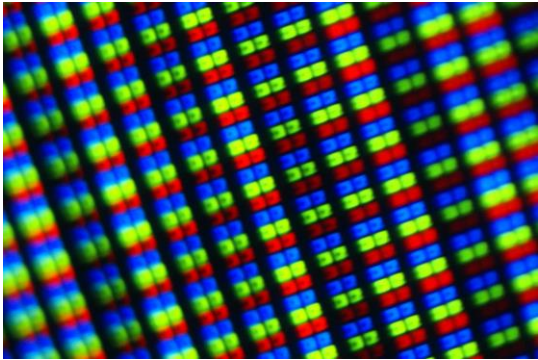


TV a plasma: processo parecido com o de uma lâmpada fluorescente.
Geração da luz UV => produzida por uma descarga em gás (plasma).
Materiais fosforescentes dos pixels: azul, verde e vermelho
(dopagem com diferentes elementos)

		
LED	Fluorescent	Incandescent
1 Watt	= 3 Watt	= 15 Watt
3 Watt	= 7 Watt	= 35 Watt
5 Watt	= 11 Watt	= 50 Watt
7 Watt	= 15 Watt	= 70 Watt
9 Watt	= 19 Watt	= 90 Watt
12 Watt	= 25 Watt	= 120 Watt
15 Watt	= 31 Watt	= 150 Watt
18 Watt	= 36 Watt	= 180 Watt



Pixels – TV LED



7 October 2014

The Nobel Prize in Physics 2014

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2014 to

Isamu Akasaki

Hiroshi Amano

Shuji Nakamura

Haga University, Nagoya, Japan

Haga University, Japan

University of California,

Santa Barbara, CA, USA

for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled

bright and energy-saving white light sources

New light to illuminate the world

This year's Nobel Laureates are rewarded for

having invented a new energy-efficient and envi-

ronment-friendly light source – the blue light-

emitting diode (LED). In the spirit of Alfred Nobel

the Prize rewards an invention of greatest benefit

to mankind; using blue LEDs, white light can be

created in a new way. With the advent of LED lamps

we now have more long-lasting and more efficient

alternatives to older light sources.

is just over 100 lm/W, which can be compared to 30 for regular light bulbs and close to 70 for fluorescent lamps. As about one fourth of world electricity consumption is used for lighting purposes, the LEDs contribute to saving the Earth's resources. Materials consumption is also diminished as LEDs last up to 100,000 hours, compared to 1,000 for incandescent bulbs and 10,000 hours for fluorescent lights.

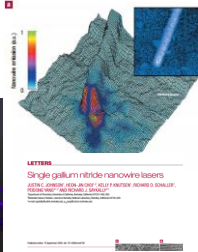
bioluminescência



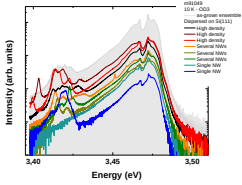
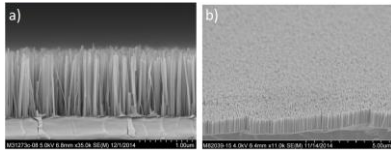
LED azul (eletroluminescência)



laser semiconductor azul (emissão estimulada)



Nanofios de GaN crescidos por MBE
Ziani Souza Schiaber, estágio BEPE – PDI Berlim, doutoranda LFS



1. Emissão de luz em sólidos

Vimos:

Absorção de luz (cap.3),

Modificação da absorção por éxcitons (cap.4)

Agora:

Emissão de luz (Cap 5).

Elétrons em um estado excitado decaem, emitindo fótons

⇒ equivalente à emissão espontânea em átomos.

O que é
Luminescência ?

Em sólidos os processos de emissão radiativa são chamados de
Luminescência

Vamos estudar aqui os **princípios gerais**, que nos permitem entender a **emissão interbandas em semicondutores**, e darão as bases para entendermos casos mais complexos.

Fotoluminescência

- Fóton
- => excitação
- => fóton

Eletroluminescência

- Elétron
- => injeção
- => fóton

A geração de luz por Luminescência envolve:

- *transições / emissão de fóton
 - *mecanismos de relaxação de energia em sólidos
- => (um pouco) + complicada que absorção

Taxa de emissão espontânea para transições radiativas entre dois níveis

solução

$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{radiativa}} = -AN$

N – número de portadores excitados
A – Coeficiente de Einstein emissão

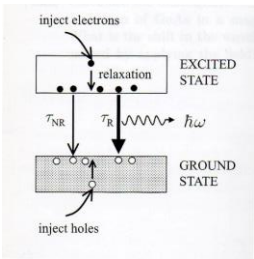
$N(t) = N(0)e^{-At} = N(0)e^{-t/\tau_R}$

$\tau_R = \frac{1}{A} \text{ (s)}$ tempo de vida radiativo

$A \propto B$

Emissão $\leftrightarrow$ Absorção

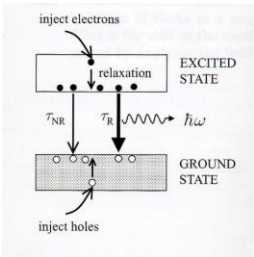
o número de fótons emitidos em um dado tempo é proporcional ao produto do coeficiente A da transição como à população do nível superior.



NR – não radiativa
R - radiativa

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{total} = -\frac{N}{\tau_R} - \frac{N}{\tau_{NR}} = -N\left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{NR}}\right)$$

$I(h\nu) = |M|^2 g(h\nu) \times \text{fator de ocupação}$



NR – não radiativa
R - radiativa

Eficiência de Luminescência

$$\eta_R = \frac{AN}{N\left(\frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{NR}}\right)} = \frac{1}{1 + \tau_R/\tau_{NR}}$$

Se
 $\tau_R \ll \tau_{NR} \Rightarrow \eta_R \rightarrow 1$
 $\tau_R \gg \tau_{NR} \Rightarrow \eta_R \rightarrow 0$

2. Luminescência Interbandas

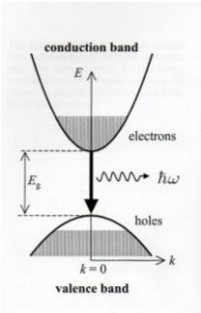
Luminescência Interbandas

Elétrons excitados na BC voltam para a BV

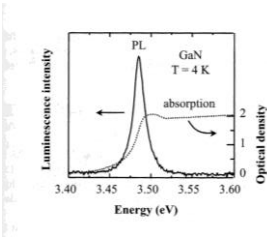
Aniquilação de par elétron-buraco
um elétron a menos na BC
um buraco a menos na BV - simultâneo

recombinação elétron-buraco

Absorção => criação de par e - h

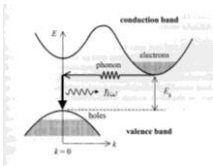
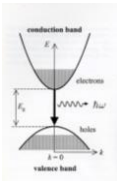


Comparação dos espectros de emissão e absorção



Emissão:

material de gap direto vs gap indireto

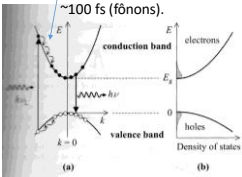


A probabilidade de emissão no material de gap direto >> gap indireto

3. Fotoluminescência

Fótons são absorvidos de uma fonte de excitação tal como um laser ou uma lâmpada, e isso injeta elétrons na banda de condução e buracos na banda de valência.

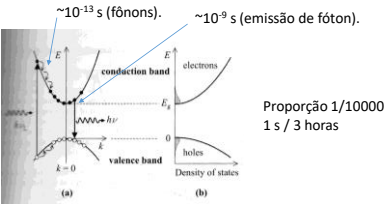
Os elétrons podem emitir suas energias iniciais rapidamente emitindo fônons.



Como é a ocupação dos estados da BC por elétrons e da BV por buracos ?

Quanto maior o número de elétrons livres na BC e buracos livres na BV maior a probabilidade de recombinação

=> a intensidade da luminescência depende da ocupação



Após thermalizarem os elétrons e buracos terão que esperar até que possam emitir um fóton ou recombinarem de maneira não radiativa.

Os elétrons e buracos têm tempo para formar distribuições térmicas no fundo das bandas como as mostradas na figura

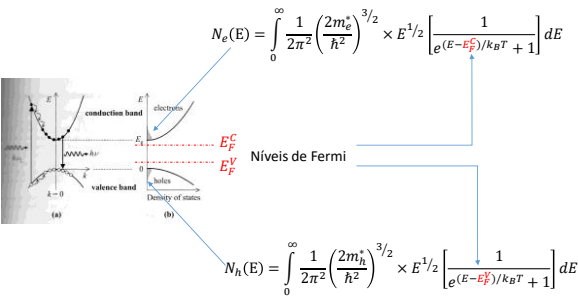
Densidade de estados da BC

$$N_e = \int_{E_g}^{\infty} g_c(E) f_e(E) dE$$

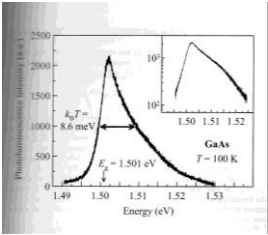
Probabilidade de ocupação do estado (E)
função de distribuição de Fermi-Dirac

$$g_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \times (E - E_g)^{1/2}$$

$$f_e(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F^C)/k_B T} + 1}$$



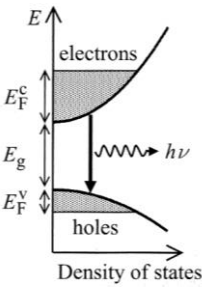
3.1 Baixa densidade de portadores



$$I(h\nu) = (h\nu - E_g)^{1/2} \times e^{(h\nu - E_g)/k_B T}$$

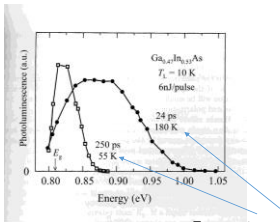
3.2 Degeneração (altíssima densidade de portadores)

Semicondutor degenerado
⇒ nível de Fermi entra nas bandas



$$E_F^{c,v} = \frac{\hbar^2}{2m_{e,h}^*} (3\pi^2 N_{e,h})^{2/3}$$

Fotoluminescência resolvida no tempo



Temperatura efetiva dos portadores

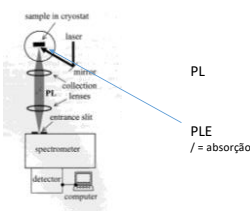
Orientação da polarização da emissão

⇒ Em algumas situações especiais a emissão de PL pode ter polarização circular bem definida

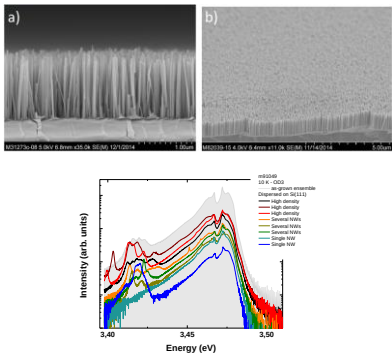
Isso ocorre quando as transições envolvem mudanças no momento angular dos elétrons via interações spin-órbita bem definidas, os fótons emitidos podem ter polarização circular, cujo sentido depende da mudança de momento angular dos elétrons.

(Não vamos fazer em detalhe, não cai na prova)

3.3 Espectroscopia de Fotoluminescência



Nanofios de GaN crescidos por MBE
Ziani Souza Schiaber, estágio BEPE – PDI Berlim, doutoranda LFS



4. Eletroluminescência

O que é eletroluminescência ?

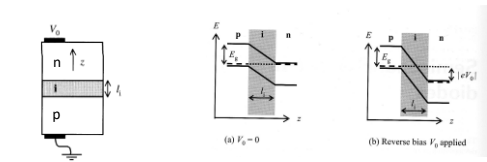
Processos **eletroluminescentes** são aqueles em que a luminescência é gerada por uma corrente eléctrica injetada no dispositivo

Injeção de elétrons
⇒ Emissão de luz

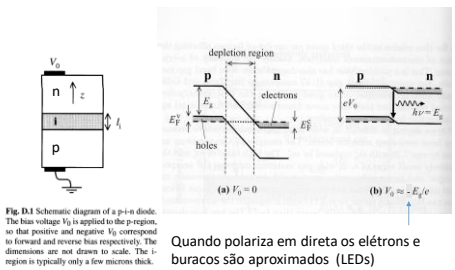
LEDs / lasers
semicondutores

Junções de semicondutores

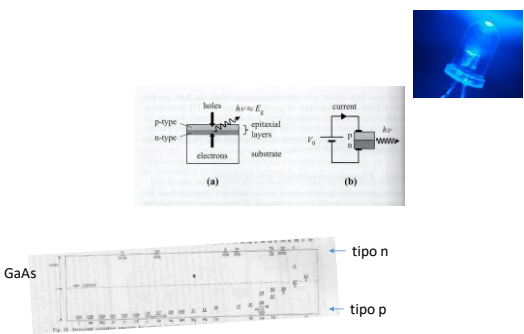
dopado tipo p - intrínseco – dopado tipo n
(apêndice E)

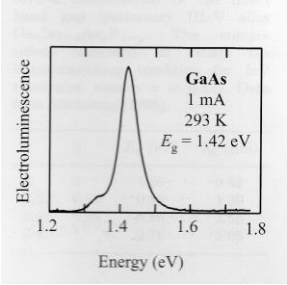


Quando polariza em reversa os elétrons e buracos são afastados (usada nos fotodetectores)

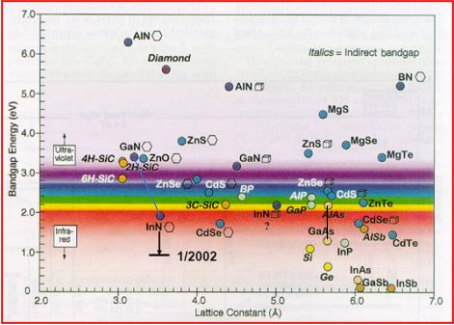
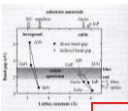
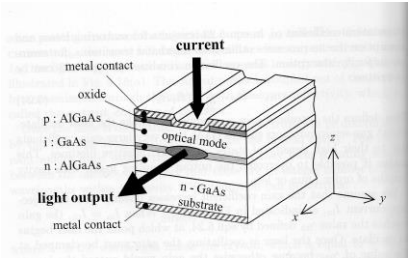


Quando polariza em direta os elétrons e buracos são aproximados (LEDs)





Laser semiconductor (cavidade horizontal)



Hetero-Estururas
AlGaN – InGaN
LEDs e LASERS

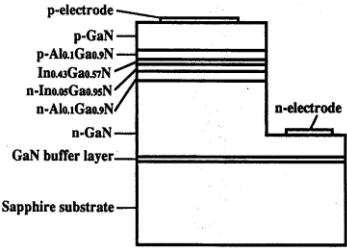
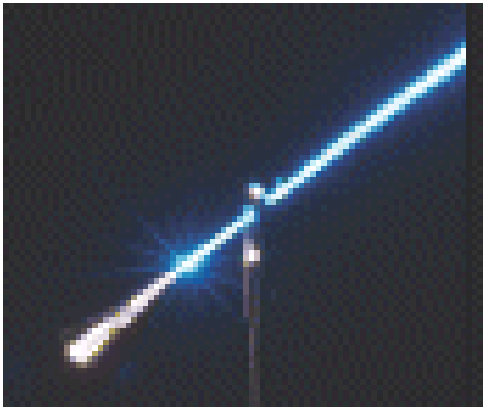


Fig. 20 The structure of green SQW LED.





59

Lasers de GaN – Cavidade Vertical – alta integração

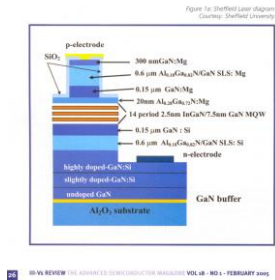
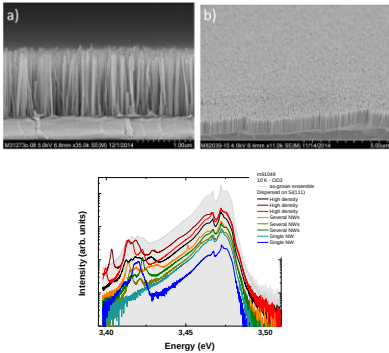
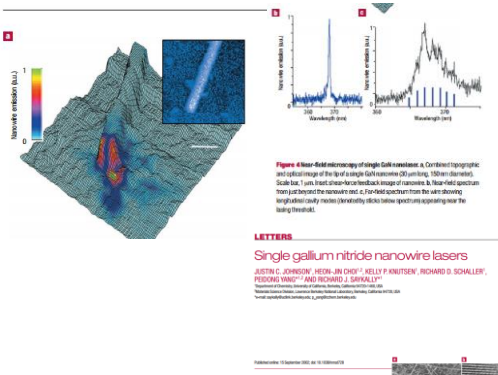


Figure 1a: Schematic diagram of the GaN laser structure. (Source: Stanford University)

Nanofios de GaN crescidos por MBE
Ziani Souza Schiaber, estágio BEPE – PDI Berlim, doutoranda LFS



5. Luminescência : Pontos principais

- Luminescência $\leftrightarrow$ emissão espontânea em sólidos
- Taxa de emissão $\propto$ elem. de matriz $\times$ densidade de estados $\times$ ocupação dos níveis
- Alto coeficiente de absorção $\Rightarrow$ decaimento rápido, emissão forte
- Luminescência interbanda $\equiv$ recombinação elétron-buraco
- Luminescência interbanda independe da energia de excitação
- Portadores excitados decaem rapidamente para o fundo das bandas.
- Após termalizarem os portadores se distribuem no fundo das bandas de acordo com a distribuição de Fermi-Dirac.

5. Pontos principais

- Gap direto $\Rightarrow$ decaimento rápido ~ 1 ns (eficiente), gap indireto $\Rightarrow$ decaimento lento (luminescência pobre ou inexist).
- LEDs (Diodos Emissores de Luz) geralmente feitos de semicondutores de gap direto.
- LEDs diodos p-n ou p-i-n, que emitem quando polarizados em direta:
polo (+) > lado p, polo (-) > lado n.

Próximos Temas

- Cap. 7 Elétrons Livres e Metais
- Cap.10 Vibrações da Rede e Fônons
- Avaliação 3 - 19/07.
- Cap.6 Confinamento Quântico

Exercícios

- Trabalhe em duplas nos exercícios 5.1 a 5.5 (para entregar)

