

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Elementos de
Redes Ópticas

Fontes: Laser, Led

= Mar. 2022 =

Felipe Rudge Barbosa
rudge@dsif.fee.unicamp.br
<http://www.dsif.fee.unicamp.br/~rudge>
LTF-FEEC-Unicamp

UNICAMP

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Ementa

Enlaces Ópticos e seus elementos:)

- ❖ Fontes: Laser, Led, Tx
- ❖ Detetores
- ❖ Fibras Ópticas

A seguir...

- ❖ Dispositivos Ópticos
- ❖ Amplificadores
- ❖ Sistemas sensores óticos

UNICAMP

Comunicações Ópticas

Enlaces Ópticos

- Laser Semicondutor
 - ❖ Fabry-Perot (FP)
 - ❖ Feed-back distribuído (DFB)
- Led
 - ❖ ELed
 - ❖ SLed
- Fotodetor PIN
- Fotodetetor APD
- ⊙ Fibra Monomodo
- ⊙ Fibra Multimodo

➤ Amplificador Ótico)
➤ Componentes passivos)

UNICAMP

Comunicações Ópticas

Laser, Led

*Fundamentos, Materiais,
Construção*

UNICAMP

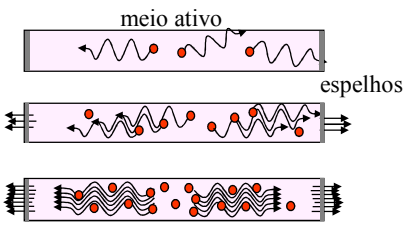
Comunicações Ópticas

Laser

(estado sólido, líquido, ou gasoso)


- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

- Abaixo limiar (espont.)
- Limiar (transparência)
- Acima limiar (oscil.)



⚡ Emissão laser só é possível quando ganho supera perdas!

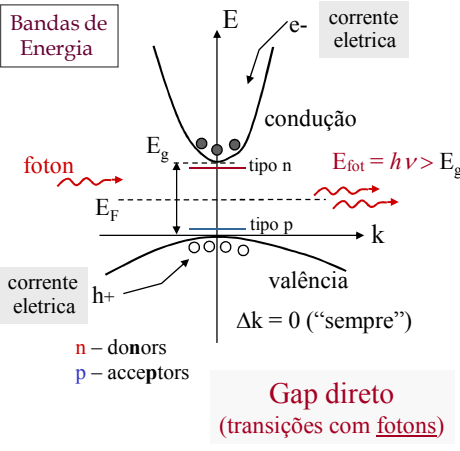
- ⇒ Ganho ocorre pela **inversão de população** (ou seja, níveis de energias mais altos mais ocupados que níveis mais baixos);
- ⇒ requer confinamento de portadores e fótons;
- ⇒ resultando na **geração de emissão estimulada**.

 UNICAMP


Comunicações Ópticas

Laser e Led Semicondutor

Geração de luz nos materiais (semicondutores)



- ❖ Emissão espontânea
 - a partir do bombeio externo,
 - elétrons saltam espontaneamente da banda condução pra valência;
 - *recombinação radiativa* é rápida, mas o *processo coletivo* é lento;
 - fótons emitidos são incoerentes;
- ❖ Emissão estimulada
 - salto elétrons na região ativa induzido por fótons; *processo coletivo* é rápido (*todos juntos*)
 - mesma frequência, direção e fase.
 - fótons resultantes (*emitidos*) são multiplicados e coerentes;
 - condição necessária: *inversão de população* – estado excitado; (mais gente em cima que embaixo!)

 UNICAMP

Comunicações Ópticas

Laser e Led Semicondutor

Estrutura de banda completa no material -- GaAs

$\lambda \cdot \nu = c$

$h \cdot \nu = E$ energia.

A direção principal que interessa é a orientação [100] representada pela direção Γ , onde ocorrem transições $\Delta k = 0$.

Source: M.Rohlfing, P.Krüger, and J.Pollman: *Quasiparticle band-structure calculations for C, Si, Ge, GaAs, and SiC using Gaussian-orbital basis sets*, Phys. Rev. **B48** (1993) 17791-17805 (doi: 10.1103/PhysRevB.48.17791),

Comunicações Ópticas

Laser & Led Semicondutor (Fotodetector)


Materiais semicondutores

	Material	Composição	Tipo de gap	Coef. Recomb. Radiat. B (*)
absorção	Si	natural	indireto	2×10^{-15} (cm ³ /s)
	Ge	natural	indireto	5×10^{-14}
emissão	GaAs	binário	direto	4×10^{-10}
	GaAlAs	ternário	direto	2×10^{-10}
	InP	binário	direto	1×10^{-10}
	InGaAsP	quaternário	direto	1×10^{-10}

10.000x menos eficientes!

↪ emissão no (invisível) *infra-vermelho*

(*) os valores são típicos, depende da composição do material, e das condições específicas.



Laboratório de
TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Laser & Led Semicondutor


Materiais semicondutores


emissão

Material	Composição	Tipo de gap	Coef. Recomb. Radiat. B (*)
GaN	binário	direto	$1,5 \times 10^{-10}$
InGaN	ternário	direto	$1,5 \times 10^{-10}$
InAlGaP	quaternário	direto	1×10^{-10}

↪ emissão no visível azul até vermelho

(*) typical values; exact values depend on the material, and specific conditions





Laboratório de
TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Laser e Led Semicondutor


Tabela Periódica - Metais e Semicondutores


Grupos IV, III-V e II-VI

			3A	4A	5A	6A
			5	6	7	8
			B	C	N	O
			10.811	12.01115	14.0067	15.9994
			13	14	15	16
			Al	Si	P	S
			26.9815	28.086	30.9738	32.064
Fe Co Ni	1B	2B	31	32	33	34
	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
	63.54	65.37	69.72	72.59	74.922	78.96
	47	48	49	50	51	52
	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
	107.87	112.40	114.82	118.69	121.75	127.60
Ir Pt	79	80	81	82	83	84
	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po
	196.967	200.59	204.37	207.19	208.980	(210)

Dopantes:

- aceitadores, tipo p = S, Se, Te, Sn
- doadores, tipo n = Zn, Cd, Sn





Laboratório de
TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Laser

(estado sólido, líquido, ou gasoso)

- **Laser = radiação coerente: emissão estimulada (mais rápida; ~100ps)**
 - ⇒ Ftons com **mesma fase** = soma de amplitudes de campo;
 - ⇒ **mesma direção** = devido á direção preferencial do ganho;
 - ⇒ **mesma energia** = todos ftons vêm de transições seletivas (espectro estreito);

potencia total = [soma das amplitudes microscopicas]²

$$E_{x,y}(z,t) = E_0 e^{i(\omega t + \beta z + \phi)}$$

onde, $\beta = n \cdot k = (n/c) \omega$; $k = 2\pi/\lambda$
 E , cpo.eletr. $\omega = 2\pi\nu$

$$I_{\text{coe}} = |\sum E|^2$$


$$\lambda \cdot \nu = c$$


$$I_{\text{incoe}} = \sum |E|^2$$

$$h \cdot \nu = E$$

energia.

- **Led = radiação incoerente; emissão espontanea (mais lenta; ~1-2ns)**
 - => incoerente, fases aleatorias ; sem realimentação; "sem direção"; ampla faixa de transicoes (espectro largo); *potencia total = soma das pot. microscopicas*;

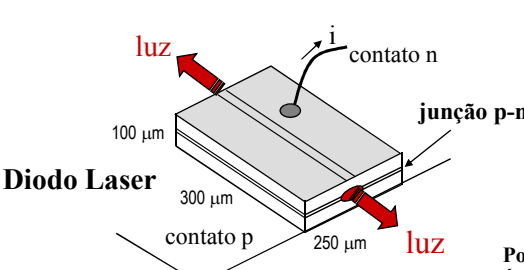




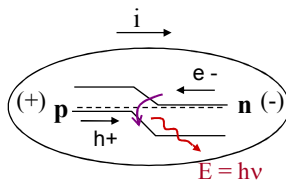
Laboratório de
TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

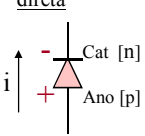
Laser Semicondutor



Diodo Laser



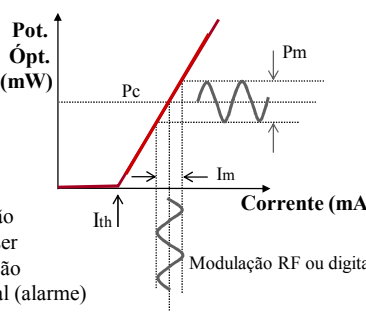
direta




$$P = \eta_e I$$

η é eficiência externa dada em (mW/mA)

Im - corrente de modulação
 Ith - corrente limiar do laser
 Pm - potencia de modulação
 Pc - potencia DC sem sinal (alarme)



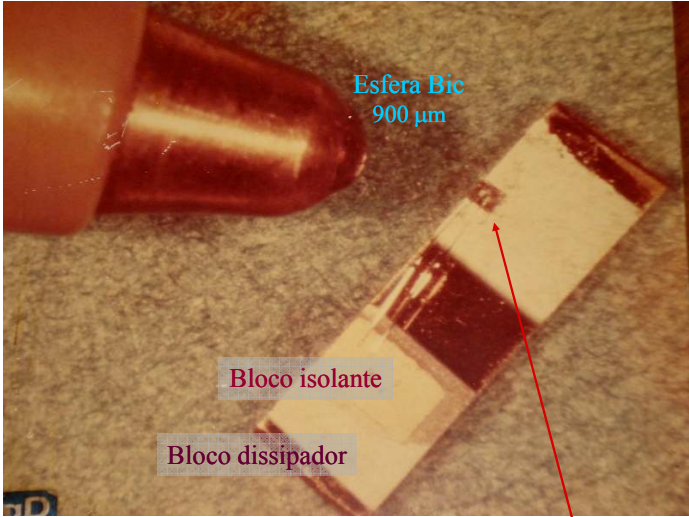
Modulação RF ou digital



LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor



Esfera Bic
900 μm

Bloco isolante

Bloco dissipador

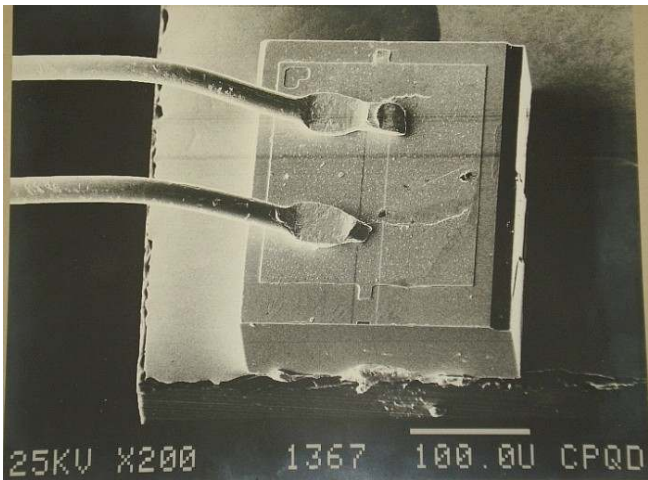
Chip do laser = 250x300 μm

UNICAMP

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Laser/Led Semicondutor



25KV X200 1367 100.00 CPQD

Chip do laser/Led = 250x300 μm

UNICAMP

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor

Estrutura de Laser semicondutor (InGaAsP/InP)

DCP-BH
double-channel planar buried heterostructure

Current density:
 $J = 2 \text{ kA/cm}^2$ (threshold)

this can burn a laser in few μs

Região ativa
Alt. $a \approx 0,2 \mu\text{m}$
Larg. $b \approx 2 \mu\text{m}$

UNICAMP

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor


contato n
junção p-n
contato p
espelho semiconductor

Laser FP (Fabry-Perot)
(multimodo longitudinal)
fabricação mais simples

contato n
contato p
grade de Bragg (realimentação óptica)
camada A.R.

Laser DFB
-- distributed feedback --
(monomodo longitudinal)

UNICAMP

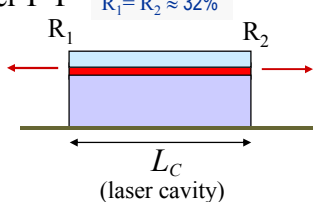


Laboratório de
TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor

Laser F-P $R_1 = R_2 \approx 32\%$



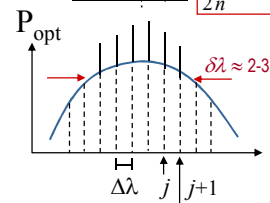
L_C
(laser cavity)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_j^2}{2nL_C}$$

separação espectral

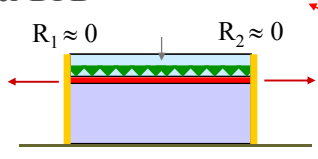
$p = \text{no. oscil. onda estac. na cavidade} \approx 200$

$$\frac{\lambda_j}{2n} \cdot p = L_C$$



$\delta\lambda \approx 2-3 \text{ nm}$

Laser DFB

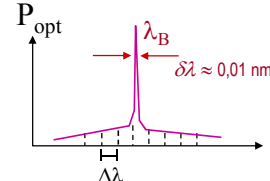


$R_1 \approx 0$ $R_2 \approx 0$

$$\Lambda_m = \frac{m \cdot \lambda_B}{2n_{ef}}$$

seleção espectral


θ_m θ medido da normal θ_i




$\delta\lambda \approx 0,01 \text{ nm}$

Ex.: $\lambda_B = 1,55 \mu\text{m} \Leftrightarrow$
 $p/ m=1; \Lambda_1 = 0,2 \mu\text{m}$ (UV)

$\Lambda_m (\text{sen } \theta_i + \text{sen } \theta_m) = m \lambda / n_{ef}$ (cond. Bragg)
 $m \Rightarrow$ ordem difração
 Incidência rasante $\theta_i = 90^\circ; \theta_m = 90^\circ; 1+1=2$



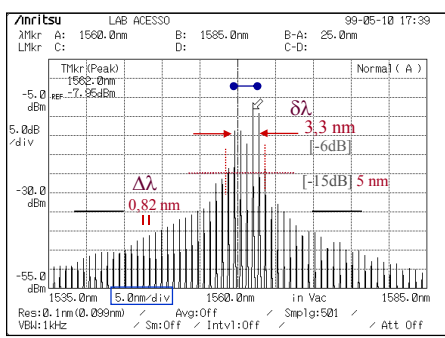


Laboratório de
TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor

Laser F-P
(multimodo longitudinal)

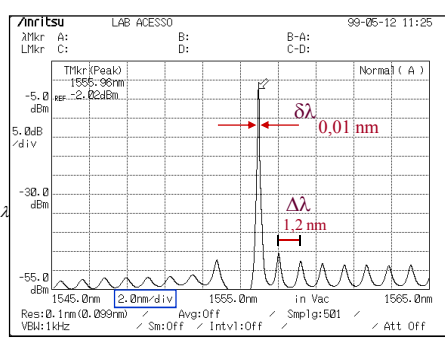


$\delta\lambda \approx 3,3 \text{ nm}$

$\Delta\lambda \approx 0,82 \text{ nm}$

$L \approx 400 \mu\text{m}$

Laser DFB
(monomodo longitudinal)




$\delta\lambda < 0,01 \text{ nm}$

$\Delta\lambda \approx 1,2 \text{ nm}$

$L \approx 300 \mu\text{m}$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_j^2}{2nL_C}$$

separação espectral (distancia entre modos longitudinais)



LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

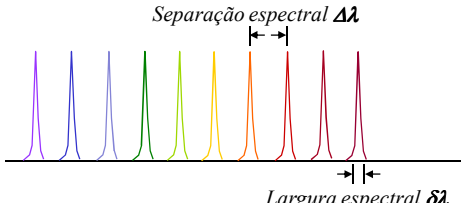
Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor

Comentarios adicionais ...

- Tanto o laser DFB quanto laser FP são *essencialmente monocromáticos*;
- Quando se olha o espectro individual dos lasers, em alta resolução (<0,2nm) aí que se vê a estrutura espectral do laser;
- Sistema **WDM** consiste na composição de vários lasers, propagando-se simultaneamente numa mesma fibra;
- Representa-se os sistemas WDM como “coloridos”, significando figurativamente que cada laser tem uma “cor”...

Separação espectral $\Delta\lambda$



Largura espectral $\delta\lambda$

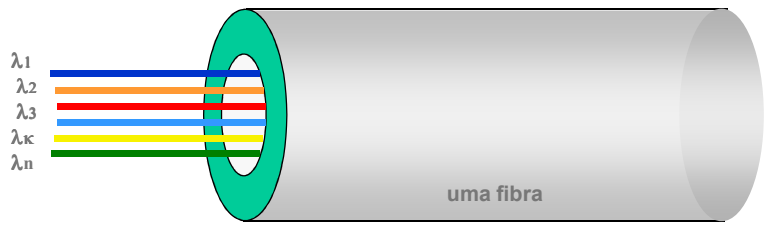
UNICAMP

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Sistemas WDM em Fibras Ópticas

- **Wavelength Division Multiplexing** – multiplexação por divisão de comprimentos de onda (**lambdas**);
- cada fibra (monomodo) suporta dezenas de lambdas, até >1 centena;
- cada **lambda** (dito **canal ótico**) suporta dezenas de Gb/s...
- portanto, sendo $100 \times 10 = 1000$, **UMA fibra** suporta >**Terabits** de informação !!



uma fibra

- Cabos de fibras contém dezenas até centenas de fibras (36, 72, 144)
- com **cada fibra** podendo suportar **Terabits** de dados !!

⇒ gradeITU_canaisWDM-r4.doc

UNICAMP

19

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Transmissores/Tx Laser

UNICAMP

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor/ Transmissor

• Técnicas de Modulação (*detalhamento*)

- ❖ **Direta:** (mais pra F-P)
 - Modulação da **corrente** de injeção (mA);
 - mais econômica, aplicável em sistemas de baixa e média capacidade, e sistemas analógicos com pré-distorção;
 - ➔ causa alargamento espectral e ruído de modulação;
- ❖ **Externa:** (mais pra DFB)
 - Modulação da **luz** emitida pelo laser;
 - espectro limitado pela banda de modulação (dito limitado pela transformada)
 - **evita** de alargamento espectral por *chirping* (*ruído de gorjeio*);
 - mais cara; **necessária** p/ sistemas WDM e sistemas de altas taxas (10- 40 ; 100+ Gb/s).

UNICAMP

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor/ Transmissor

Circuito de modulação (tipo espelho corrente) **Modulação Direta**

UNICAMP

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor/ Transmissor

- Técnicas de Modulação Direta
 - **Digital:** índice modulação $M \Leftrightarrow$ razão de extinção
 - $M = 10 \log (P_{max} / P_{min})$, usual $M = 10$ dB ;
 - mantém-se P_o como alarme;
 - utilizada em telefonia moderna e redes de computadores;
 - **Análogica:**
 - multicanal: risco de saturação (up) e “clipping” (down), devido a variação estatística amplitude modulação, devida a fases aleatórias dos N canais;
 - fator de modulação σ_{RMS} ; índice de modulação m , por canal ;
 - $\sigma_{RMS} = (N/2)^{1/2} \cdot m$, usual $\sigma_{max} = 25\%$, para $m=4-5\%$; $N \approx 80$.
 - utilizada em sistemas de CATV; redes HFC;

UNICAMP

Comunicações Ópticas


Laser Semicondutor

Modulation formats and BW consumption

- 25 Gb/s NRZ (OOK) receiver requires ≈ 17.5 GHz bandwidth (practical NRZ receiver BW $\approx 0.7 \cdot R$). [R=rate]
 - Low-cost 10 Gb/s ONU receiver, ≈ 7 GHz bandwidth
- Practical NRZ OOK transmitter requires $\approx 2x$ BW ($\approx 1.5 \cdot R$); then, 10 Gb/s NRZ will require ≈ 15 GHz -- plus guardband 1-2GHz;
- On the other hand, a receiver-encoded duobinary (REDB) receiver has ideal bandwidth $\approx 0.27 \cdot R = 7$ GHz. Then, a 10 Gb/s NRZ REDB receiver for 25 Gb/s signal is fine.

Notes: ⚡ - receiver Rx BW can be *always* smaller than transmitter Tx BW
 ⚡ - OOK = on/off keying;

>>>



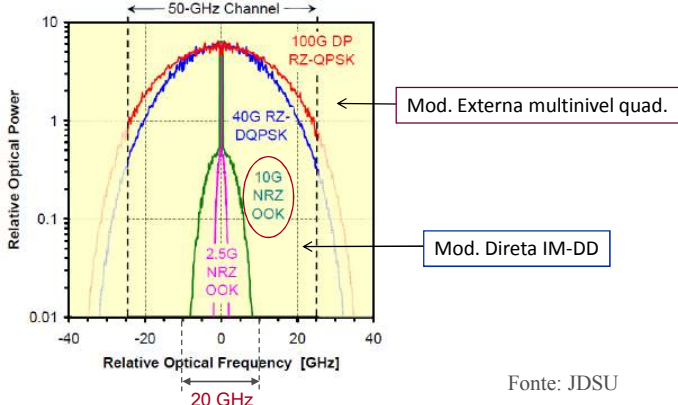
Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor/ Transmissor


Sistemas WDM::

Modulação Direta vs. Externa

- ❖ nos sistemas DWDM conforme *diminuem* os espaçamentos de canais, e *aumentam* as taxas de modulação, há que se passar a formatos de modulação multiníveis, permitindo maior banda passante e menor crosstalk;)



Fonte: JDSU



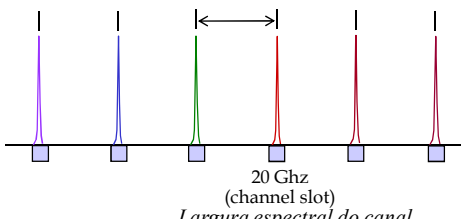
Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor

Sistemas WDM::

- ❖ lasers DFB (SM) tem largura espectral mais de 100 vezes menor que os FP (MM); (*mesmo modulado direto!*)
- ❖ nos sistemas WDM há que se especificar os espaçamentos de canais, que não podem ser “misturados” num mesmo percurso óptico (*optical path*)

Separação espectral
Espaçam. 100 Ghz ($\approx 0,8$ nm @1550nm)



20 Ghz
(channel slot)
Largura espectral do canal

☞ The minimum frequency slot should be more than 20 GHz when 10 Gb/s is assumed as the transmission bit-rate.

ITU-T Recom.G.694.1 - dWDM grid (Fev.2012)

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

UNICAMP

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor

Sistemas WDM::

- ❖ nos sistemas DWDM conforme *diminuem* os espaçamentos de canais, e *aumentam* as taxas de modulação, há que se passar a formatos de modulação multiníveis, a fim de acomodar *banda passante* e *crossstalk*;

The optical spectrum of this DP-QPSK 100 Gb/s solution is shown as the center channel (b) in Fig. 2, accompanied by the spectra of single-carrier 10 Gb/s (a) and dual-polarization 40 Gb/s (c) channels. Each spectrum is centered on a 50 GHz ITU channel.

Optical transmission systems running at a spectral efficiency greater than 1 bit/s/Hz, increases in all three of these dimensions have enabled 105 Gb/s of net data transmission within a 50 GHz spectral allocation (today the standard optical channel plan defined by the ITU).

Two carriers are separated by 20 GHz and operate at 14.55 Gbaud with four bits per dual-polarization symbol to transmit at 116 Gb/s.

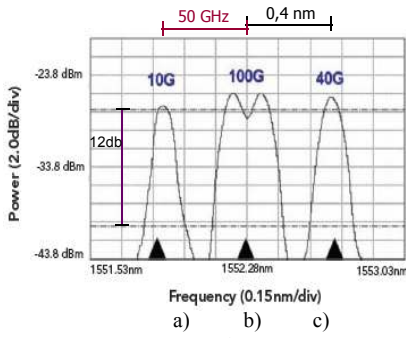


Figure.2

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

UNICAMP

Fonte: Ciena 2014

Comunicações Ópticas

Transmissores e Receptores Ópticos

- Além dos sistemas de *deteção direta* (DD), p/ sistemas binários e duobinários (até 10Gb/s) ; temos os sistemas multi-níveis complexos (QAM; QPSK, e outros) com *deteção coerente* (CD), p/ altas taxas (40, 100Gb/s,...) ;
- Nestes, um oscilador local recupera *frequência e fase* da portadora do **sinal ótico**, extraindo melhor relação sinal/ruído, principalmente em sistemas de muito altas taxas, onde a densidade de ftons (bit/Hz) é baixa.

Figura 2: Sistema de comunicação coerente.

Fonte: Luiz Hecker, "Transmissão Óptica a 100 Gb/s", Feec IE-008, Junho 2012

Comunicações Ópticas

Transmissores e Receptores Ópticos

Exemplo: Modulação Quadratura Altas Taxas

Take PM-16QAM (Polarization-Multiplexed-16 Quadrature Amplitude Modulation).

- ❖ Let us take the 400G (448 Gbit/s) case.
- ❖ PM refers to a process where the 400G optical signal is separated into two signals and modulated to transmit in *two* polarization directions - X and Y, which cuts the original signal rate in half (224 Gbit/s). [*polarization multiplexing (PM) is also referred to as dual-polarization (DP)*]
- ❖ QAM is a process of separating the signals in quadrature I & Q in the phase space to further reduce the rate. 16 stands for 4 bits, which means the signal in I & Q is respectively divided into 4 signals and the rate will accordingly decrease to 1/4 on the basis of the previous 224 Gbit/s. The signal rate at this moment becomes 56G Baud (the rate of electrical processing).
- ❖ By using PM-16QAM, the actual modulated signal is "reduced" from 400G to 56G. In other words, the direct electronic modulation is 56G, but the effective transmitted signal is 400G. Get it ?
 - **Note:** Because in current circuit technology, 100Gbit/s has approached the limit of the electronic bottleneck. If the Baud continues to increase, problems like signal loss, power dissipation, and electromagnetic interference will remain a hassle, which will, even if solved, require tremendous costs. (@2022)

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Transmissor Laser

Resumindo...

- Altíssimas taxas (40Gb/s, 100Gb/s, e mais..) requerem esquemas especiais de modulação...
- IM-DD não é aceitável qdo. se quer maior **eficiência espectral** (bits/Hz) ;
- **Codificação de sinais** em quadratura de amplitude (QAM) e quadratura de fase (QPSK) são necessárias;
 - ❖ podem ser também lançados **dois estados de polarização** (DP), nessas constelações crescentes,
 - ❖ Isso permite compactar **altíssimas taxas** nos *slots* ampliados nas grades de frequências óticas ; (p/ex., 100 Gb/s na grade 50 GHz)
 - ❖ Ex.: DP-QPSK, 16-QAM, e outras;
- Estas tecnologias requerem técnicas de **deteção coerente** e **processamento digital de sinais** (DSP, na recepção);
- Bem como **correção dinâmica de erros** (FEC, fwd. error correct.), conforme previsto na OTN
 - ❖ OTN será vista mais adiante, em detalhe.

UNICAMP

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Transmissores/Tx

Led

UNICAMP

Comunicações Ópticas

LED

ELED

SLED

Modulação RF ou digital

direta

$P = \eta_{\text{Led}} I$

η é eficiência externa dada em (mW/mA)

I_m - corrente de modulação
 P_m - potencia de modulação

☞ Led não tem limiar !!

UNICAMP

Comunicações Ópticas

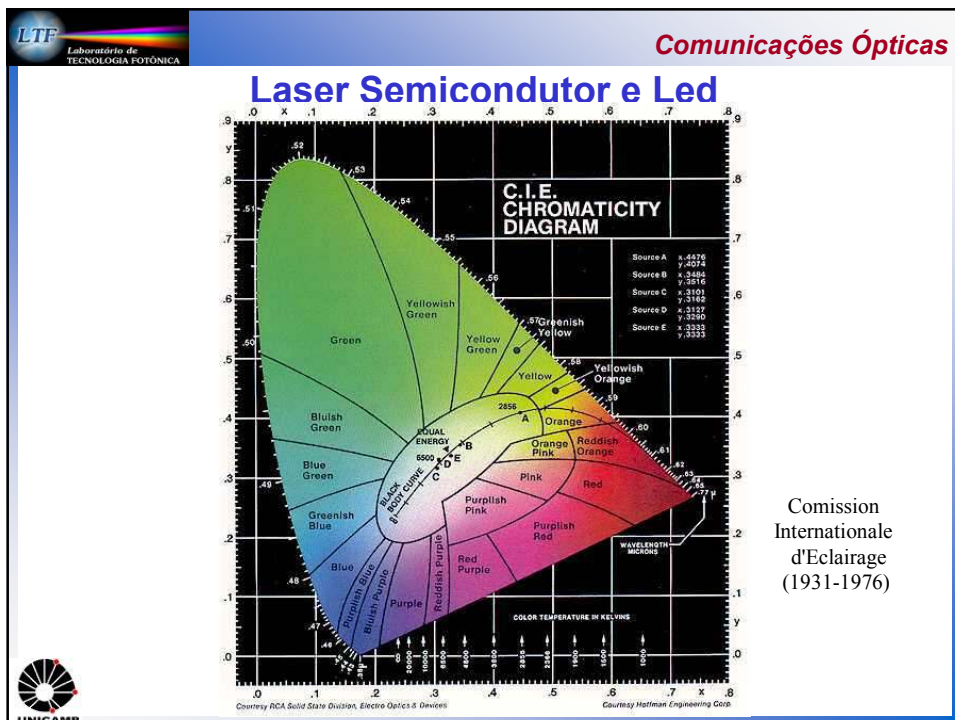
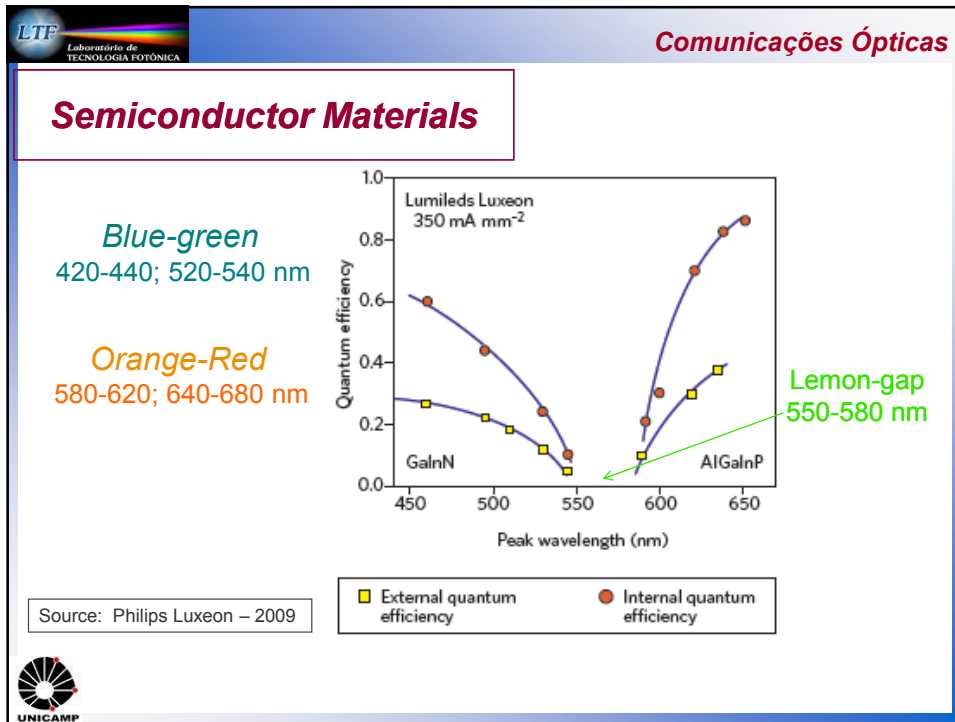
LED

Espectro de emissão

$\Delta\lambda = 70 \text{ nm}$

=> Em 1300 $\Delta\lambda \approx 50 \text{ nm}$; no visível $\Delta\lambda < 30 \text{ nm}$

UNICAMP



Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor e Led

Resumo 1 :

- Operação e Características
 - **Laser** : emissão coerente, monocromática estreita (poucos *nm*), direcional; forte dependência *c/* temperatura devido á emissao estimulada e ganho;
 - **Led**: emissão incoerente, monocromática larga (dezenas *nm*); pouco direcional; fraca dependência *c/* temperatura; ausencia de ganho.
 - Ambos podem ter feixe de emissão vertical (*surface emission*) ou lateral;
 - Ambos podem ter modulação direta (pulsada ou continua); [mod. externa só é interessant p/ lasers];
- Materiais (Laser e Led)
 - Emissão visível e infra-vermelho próximo;
 - Comprimento onda de emissão dado pelo **material região ativa**;
 - 620 a 850 nm : InGaAlP/InP; GaAlAs/GaAs
 - 1300 a 1650 nm : InGaAsP/ InP
 - Leds e Lasers verdes, azuis e UV, em InGaN/GaN ; (+raro SiC/Si)

26

Comunicações Ópticas

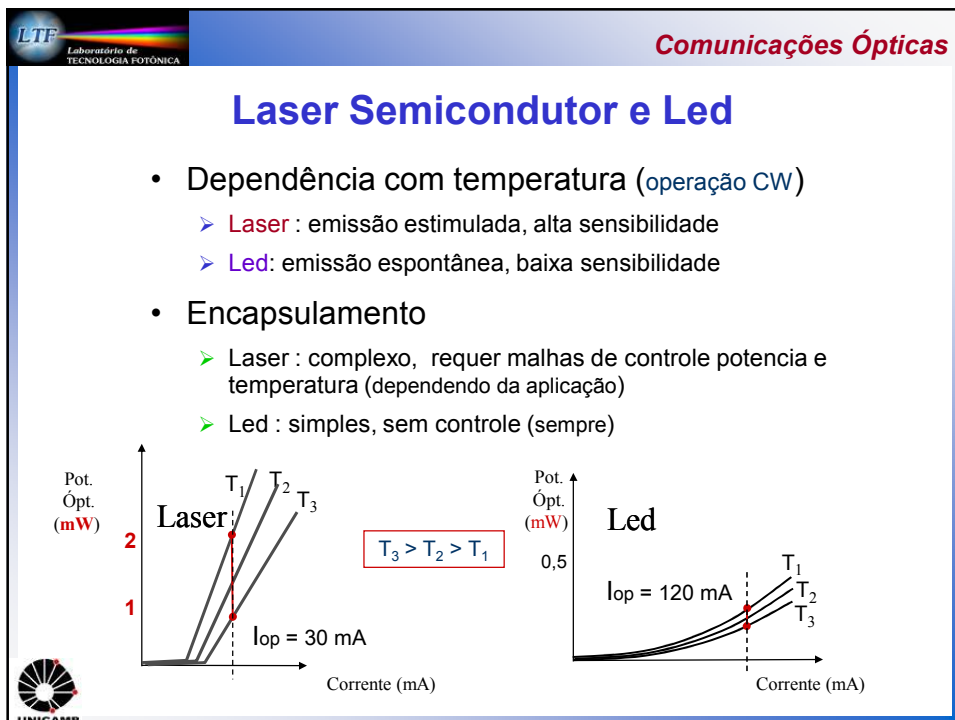
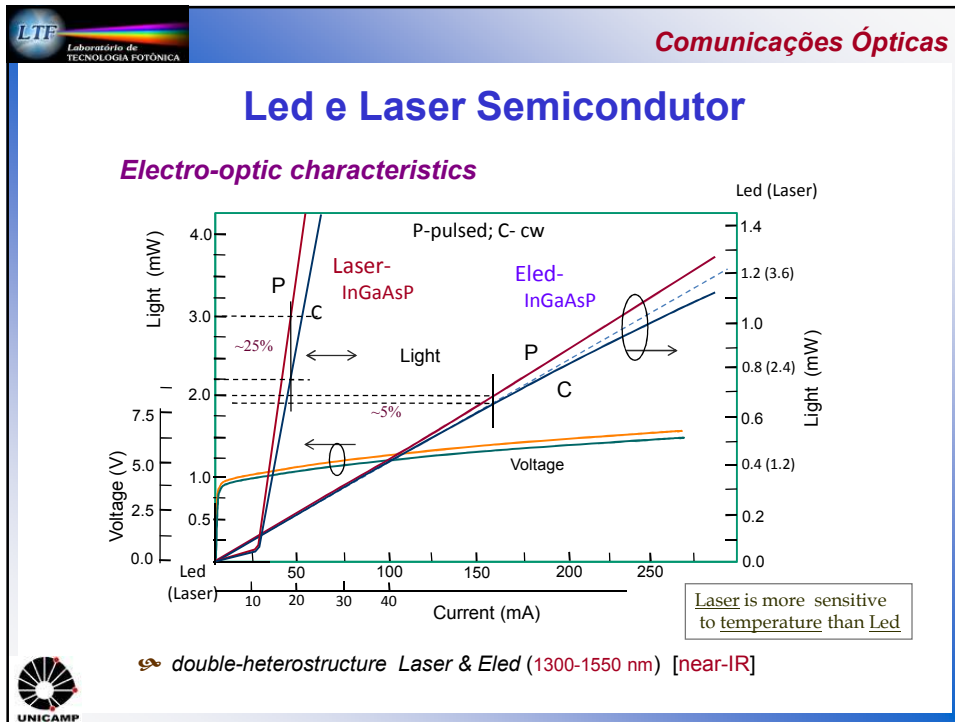
Led e Laser Semicondutor

Resumo 2 :

- Operação e Características
 - **Laser** : corrente operação (acima limiar – sempre!); CW ou pulso;
 - Telecom: limiar \approx 10 mA; operaç. 25-50 mA ; 10-15 mW
 - Potencia/Bombeio: limiar \approx 50mA; operaç. 200-300 mA; 100-150 mW
 - High-power (really high): limiar \approx 100mA; 500–2000 mA; 200-300 mW

- **Led**: corrente operação (*sem* limiar – sempre!); CW ou pulso;
 - Baixa potencia (sinalização) : 10-20 mA ; 0,5 mW
 - Alta potencia (iluminação): 100-300 mA ; 10-20mW (*incoerente!*)

26



LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Led e Laser Semicondutor

Características de mercado: (multibillion dollar \$\$\$)

- = **Laser** -- aplicações em telecom, entretenimento; medicina e fisioterapia; aplicações industriais;
- = **LED** -- aplicações em iluminação - interior e exterior; *displays*, entretenimento;

=> from *Strategies Unlimited: (2015)*

The **worldwide high-brightness LED market grew** from \$13 billion in 2012 to over \$16 billion in 2015. It is forecasted to grow to over \$18 billion in 2017.

✓ Ten companies (from Europe, Asia and America) account for more than 70% of the LED market.

LEDs are used everywhere in lighting, automotive, displays, and mobile devices.

=> By way of comparison the **worldwide Laser market** was \$8 billion in 2012 and expected to pass \$10 billion in 2015.


UNICAMP

LTF Laboratório de TECNOLOGIA FOTÔNICA

Comunicações Ópticas

Laser Semicondutor e Led

=> *Fim*
desta parte...



=> a estrada continua..

UNICAMP