

Tecnologias para Sistemas de Energia Espaciais 2023/24

Capítulo 6

6. Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento
12/12/2023

Carlos Marques

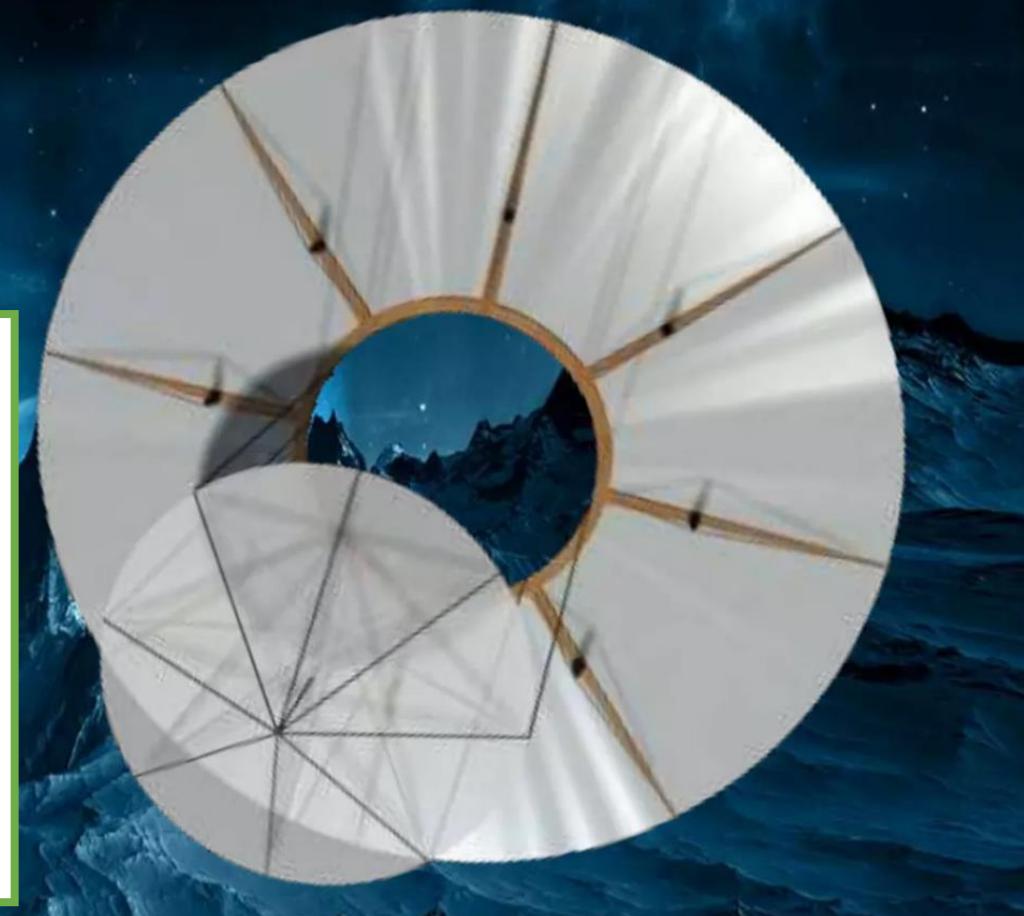
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável

Future space technology

Laser and microwave-powered rockets

- Um método de propulsão alternativo poderia ser o feixe de laser ou energia de micro-ondas no foguete a partir de estações na Terra.
- Isso aqueceria os propulsores a bordo a temperaturas mais altas do que é possível com foguetes convencionais, aumentando a eficiência



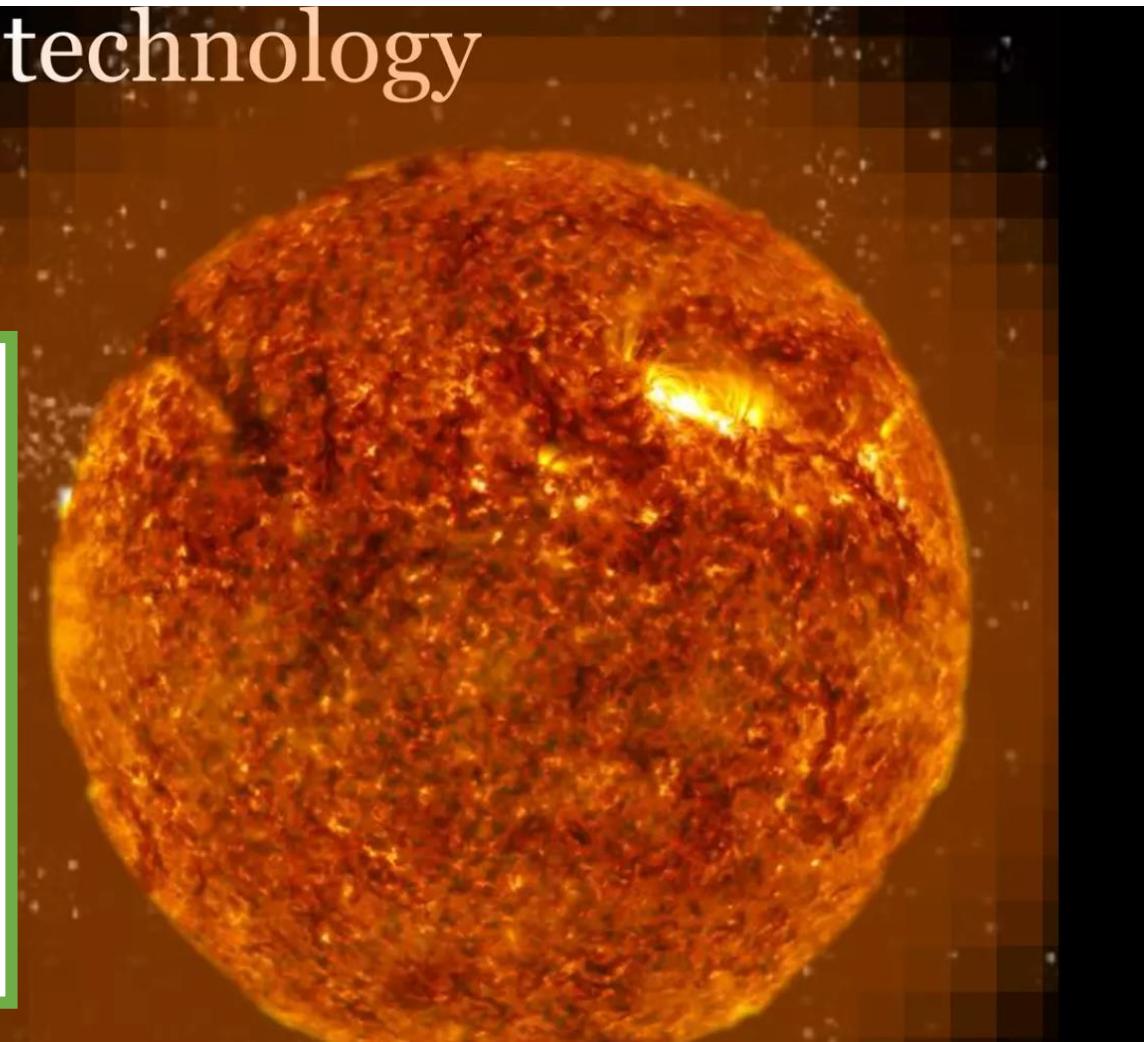
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável

Future space technology

Sun-powered rockets

- O sol emite energia gratuitamente e uma nova forma de aproveitar esta energia no espaço poderá impulsionar veículos para o espaço do futuro.
- De acordo com este conceito, denominado propulsão solar térmica, espelhos ou lentes concentrariam a luz solar para aquecer metano ou outros “combustível”. O gás quente então impulsionaria o veículo.



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável

- A energia solar no espaço é muito maior do que a que usamos hoje na Terra
 - A vida útil do sol é estimada em 4 a 5 bilhões de anos, tornando a energia solar espacial uma solução alternativa e energéticamente recomendada a longo prazo
 - Combinada com a já demonstrada transmissão de energia sem fio, esta tecnologia em maior escala pode suprir quase todas as necessidades energéticas da humanidade no planeta
- Há também uma necessidade excessiva de utilizar essa energia limpa para reduzir o uso de combustíveis fósseis no nosso sistema de transporte e outros.
- À medida que os componentes da energia solar se desenvolvem com o tempo, o papel do motor a combustível diminuirá nos transportes **se**:
 - as grandes quantidades necessárias de energia elétrica puderem ser geradas.
- Portanto, a energia limpa necessária para qualquer sistema de transporte elétrico no futuro será obtida a partir da energia solar espacial, que apresenta uma série de vantagens fundamentais sobre outras fontes de energia.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável

A Energia Solar Espacial (SPS)

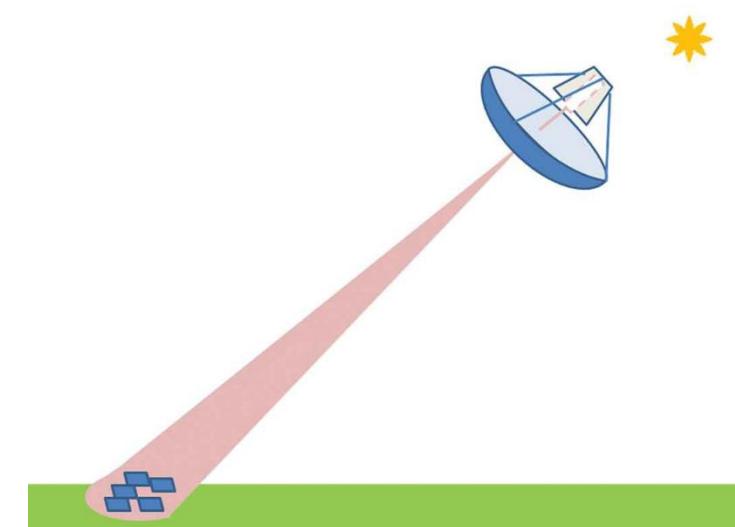
- É limpa
- Não possui resíduos que possam poluir o meio ambiente
- Está disponível o tempo todo, independentemente da hora do dia e do clima
- Não depende do petróleo para atender às necessidades energéticas
- O seu transporte para qualquer lugar do mundo é muito mais fácil que as energias fósseis

O desenvolvimento neste campo deverá afundar os seus preços.

A ideia de transferir a energia solar do espaço significa:

- A coleta da energia solar no espaço sideral, convertê-la num feixe de laser e enviá-la para a Terra.

E porquê?



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável

A razão de usar o feixe de laser é minimizar a dispersão da radiação durante sua transferência através da atmosfera terrestre.

- Isso evitaria que a energia fosse desperdiçada, maximizando seu uso nas aplicações necessárias.
- Esta foi uma das aplicações promissoras do laser bombeado solar que foi desenvolvido para aplicações terrestres pela primeira vez por Young já em 1966. Um esboço do laser solar:

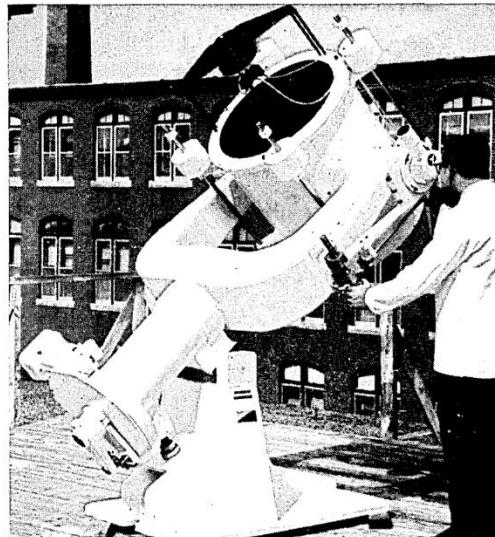


Fig. 1. The 61-cm diam, sun-tracking, equatorial mount solar collector. The water-cooled laser is mounted forward of the bucket.

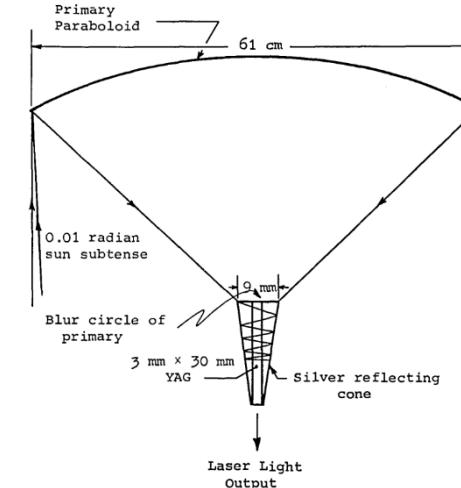


Fig. 4. The silver-foil reflecting cone condenser. The input end matches in size the solar image produced by the primary mirror and the opposite end matches the size of the laser rod (not to scale).

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

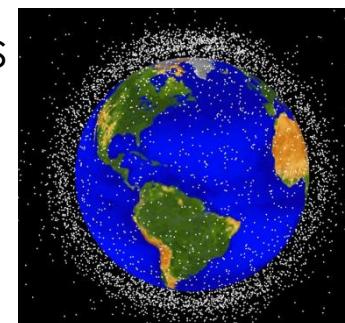
Estado da arte, desafios e Energia sustentável

O uso do espaço para geração de energia é fortemente recomendado:

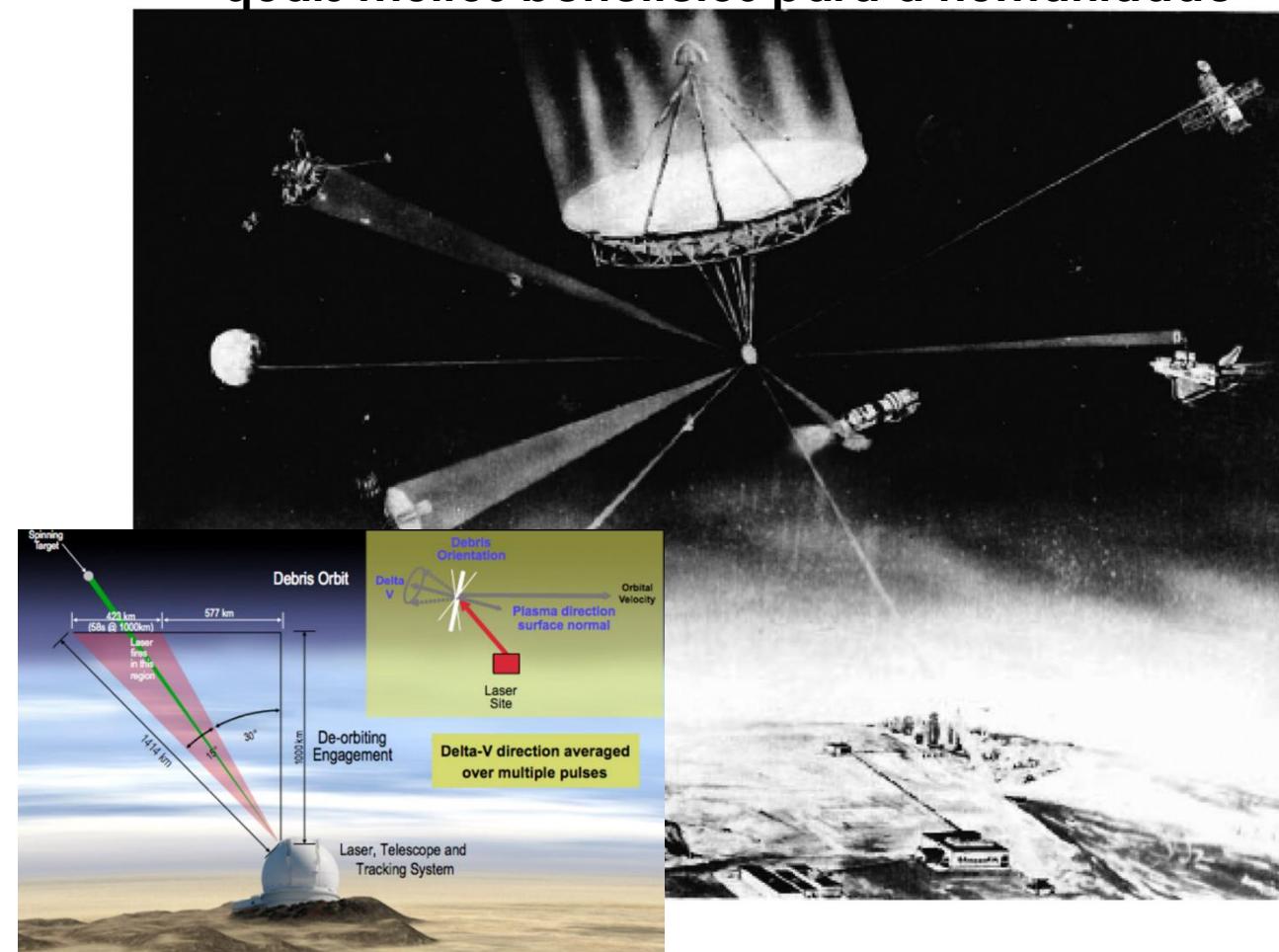
- oferece maior eficiência de conversão de energia
 - dissipando o calor como forma de dissipaçāo de energia, aproveita melhor a energia solar e reduz os custos

As aplicações do uso de tal poder espacial no espaço são diversas:

- comunicação espacial
- alimentação de satélites e naves espaciais
- deflexão de asteróides
- “Limpar” detritos espaciais
- ...

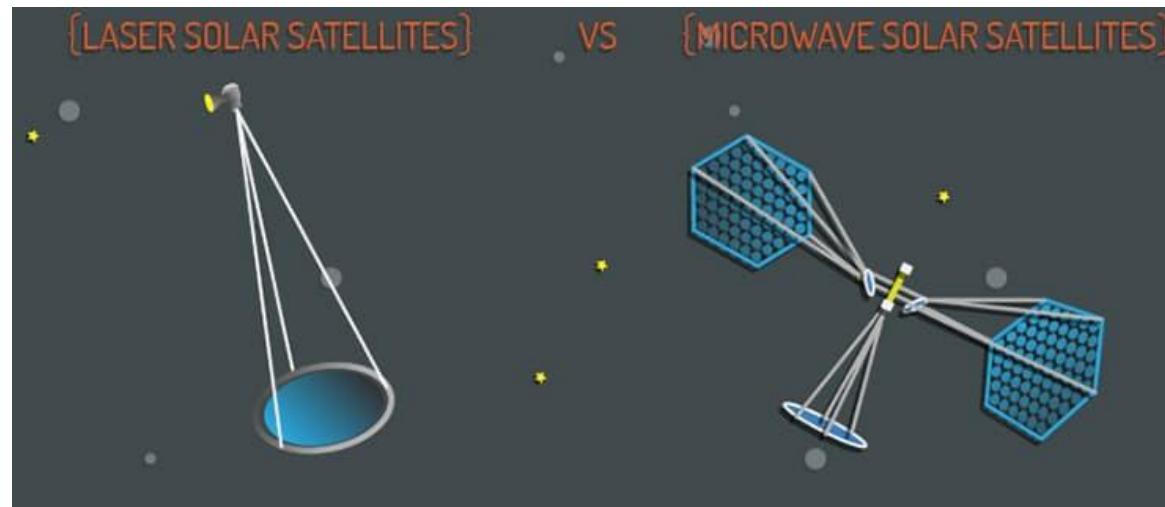


Representação de algumas dessas aplicações das quais muitos benefícios para a humanidade



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável



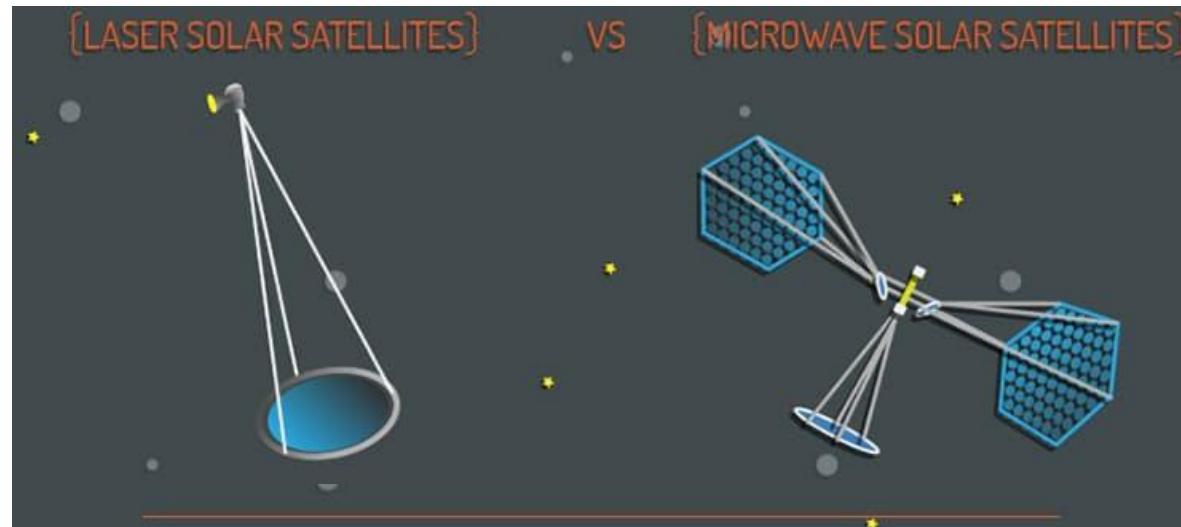
- Custo inicial relativamente baixo na faixa de 500 milhões a 1 bilião dólares
- O lançamento único por satélite de transmissão a laser seria auto-montado, reduzindo substancialmente os custos e os riscos
- O pequeno diâmetro do feixe de laser tornaria a sua implementação no solo mais simples e barata

P
R
O
S

- Transmissão constante e ininterrupta de energia através de chuva, nuvens e outras condições atmosféricas
- Transmita energia com segurança através do ar em intensidades não superiores ao sol do meio-dia
- Fornecer mais de 1 GW de energia ao receptor terrestre, o suficiente para abastecer uma grande cidade

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável



- A potência comparativamente baixa de cada satélite individual, na área de 1 a 10 MW por satélite, exigiria vários satélites para causar um impacto substancial
- Existem várias preocupações de segurança com o laser no espaço, como **cegueira e armamento**
- Satélites transmissores de laser teriam problemas para transmitir energia através de nuvens pesadas e chuva

C
O
N
S

- Custo de produção na faixa de dezenas de biliões de dólares, exigindo até 100 lançamentos para o espaço, com montagem necessária no espaço
- O receptor terrestre teria vários kms de diâmetro
- A longa distância do satélite da terra tornaria quase impossível seu reparo.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável

Porquê Laser e não RF?

Largura de banda

- Para comunicações laser (LC) é 100x maior que para RF

Potência

- Em LC é direcionado ao alvo, portanto, é necessária muito menos potência de transmissão
- Além disso, a perda de energia é menor

Tamanho/peso

- A receptor LC é muito menor que a RF

Segurança

- Devido à baixa divergência do feixe de laser, LC é mais seguro que RF

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável

[Comunicações espaciais vão ganhar reforço \(a laser\) - SAPO Vídeos](#)

[How Space Lasers Could Soon Beam Clean Power Down To Earth \(forbes.com\)](#)

[Clearing space debris with lasers \(spie.org\)](#)

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável

Research Article

Space-based solar laser system simulation to transfer power onto the earth

Yasser A. Abdel-Hadi  

Pages 558-562 | Received 20 Jun 2020, Accepted 22 Aug 2020, Published online: 06 Sep 2020

Cite this article  <https://doi.org/10.1080/20909977.2020.1815497>

 Check for updates

Full Article

Figures & data

References

Citations

Metrics

Licensing

Reprints & Permissions

View

ABSTRACT

Formulae display:  MathJax 

A simulation model of a space-based solar laser system to transfer the power onto the earth is carried out. The system consists of a solar-pumped laser by a concentration system installed on a satellite. The resulted laser beam is re-directed onto the earth surface, where it can be used to generate power. The intensity and the divergence of the laser are calculated in order to obtain the suitable solar laser system as a payload on the satellite that matches and the terrestrial applications. According to our model, around 40 kW laser can be obtained by a frequency-doubled Nd:YAG laser rod which has a radius of 5 cm and a length of 10 cm, when we use the direct solar pumping via parabolic dish of a radius 100 m and a focal length 121 m accompanied with a 3D-CPC of an acceptance angle of 30°.

KEYWORDS: Space power, solar laser, space solar energy, space-based solar laser

Relate

People
reading
this article

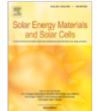
Improving
concentrator
efficiency

B. D. Tibúrcio
International
Published



Solar Energy Materials and Solar Cells

Volume 246, 1 October 2022, 111921



Most efficient simultaneous solar laser emissions from three Ce:Nd:YAG rods within a single pump cavity

Dawei Liang ^a   , Cláudia R. Vistas ^a, Dário Garcia ^a, Bruno D. Tibúrcio ^a, Miguel Catela ^a, Hugo Costa ^a, Emmanuel Guillot ^b, Joana Almeida ^a

Show more 

+ Add to Mendeley  Share  Cite

<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111921> 

Get rights and content 

Abstract

We report here, to the best of our knowledge, the most efficient simultaneous emissions of three continuous-wave 1064 nm solar laser beams. A fused silica aspheric lens was used to couple the concentrated solar radiation from the focal zone of a 0.4 m² effective collection area primary parabolic mirror into three 2.5 mm diameter, 25 mm length 0.1 at.% Ce:1.1 at.% Nd:YAG laser rods within a single conical pump cavity. For 356 W incoming solar power, 16.5 W continuous-wave total multimode solar laser power was measured, corresponding to 4.64% solar-to-laser conversion efficiency, 41.25 W/m² collection efficiency, and 7.64% slope efficiency, which are 1.24, 1.27, and 1.11 times, respectively, higher than previous records by pumping a single 4.5 mm diameter, 35 mm length 0.1 at.% Cr:1.0 at.% Nd:YAG ceramic laser rod. The three-rod Ce:Nd:YAG solar laser also provided 2.13, 2.25 and 1.50 times enhancements in solar-to-laser conversion efficiency, collection efficiency, and slope efficiency, respectively, as compared to previous records by pumping three 3.0 mm diameter, 25 mm length 1.0 at.% Nd:YAG rods within the same single conical pump cavity.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Estado da arte, desafios e Energia sustentável

Introdução à Energia

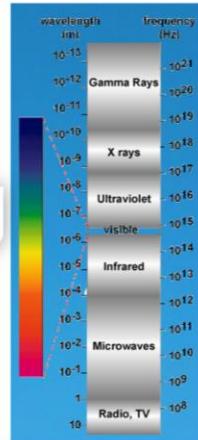
Energia solar – figuras de mérito

Espetro EM: A energia produzida pelo Sol transmite-se no espaço em forma de radiação EM. Esta radiação é um conjunto contínuo de ondas de diversos comprimentos de onda, dos quais a luz visível é apenas uma pequena parte

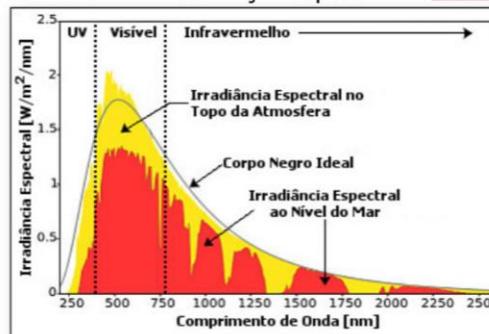
Relação de Planck-Einstein

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

$$E = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} \text{ (eV)}$$



Especro solar com a distribuição espectral da irradiância solar

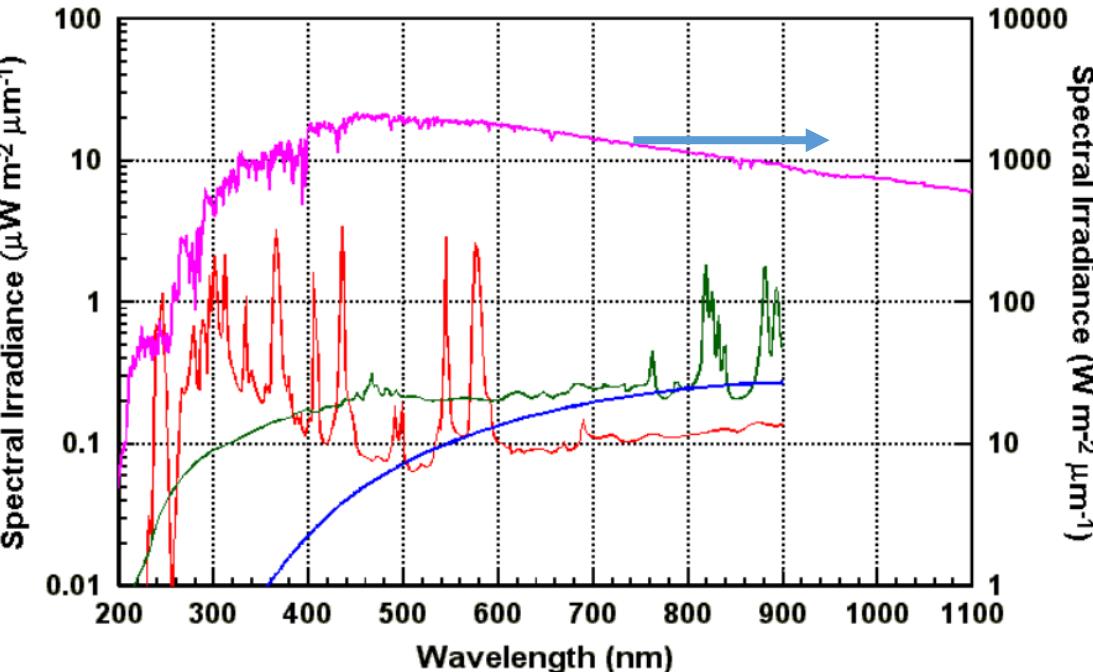


A intensidade máxima de radiação do espectro solar ocorre a 500 nm (0,5 μm), quase na parte final do azul da faixa visível.



dep. física
universidade
de aveiro

44



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Fontes de luz

- Existem disponíveis muitas fontes de luz não sendo lasers:
 - Lâmpadas incandescentes (barata; aquece muito e gasta muita energia - ineficácia (5%), classe energética B/C)
 - Lâmpadas fluorescentes (desvantagem: usam Hg (e P) - proibido na Europa; vantagem: alto rendimento (40%)
 - Lâmpadas de descarga de alta intensidade (usando Hg)
 - Lanternas (VIS e IR, Xe, Kr)
 - Díodos emissores de luz (LEDs)
 - OLEDs
- Lasers Semicondutores
 - Alimentados por energia elétrica
 - Converte sinais elétricos em sinais óticos

Lasers de estado sólido

Lasers gasosos

Lasers de fibra

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Fontes de luz

- Lâmpadas incandescentes (Barata; aquece muito e gasta muita energia - ineficácia (5%), classe energética B/C)
 - Edison, 1879
- Todo corpo aquecido emite luz: Lei de Boltzmann
 - emissão da luz dos corpos aquecidos só depende da sua temperatura.
 - Madeira ou ferro confundem-se quando estão aquecidos.

100 W – 450°C



Qd a energia elétrica passa num filamento (metal) – dissipação térmica (efeito de Joule)

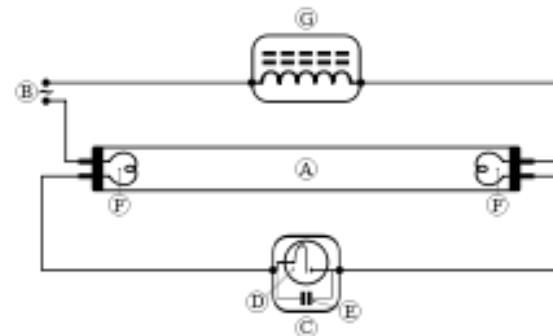
- parte da energia elétrica converte-se em calor e aquece aquele filamento
 - todo o objeto aquecido emite luz

Se aquecer o filamento a temperaturas mt elevadas (incandescência): processo de emissão de radiação eletromagnética por um corpo

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Fontes de luz

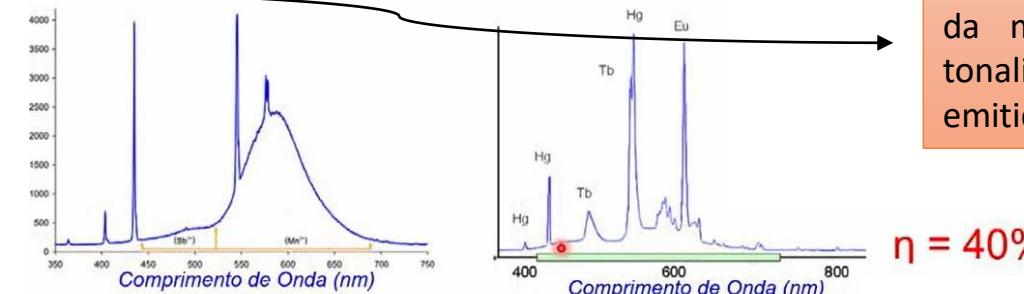
- Lâmpadas fluorescentes (desvantagem: usam Hg (e P) - proibido na Europa; vantagem: alto rendimento (40%)) - Tesla, 1938



Círcuito de uma lâmpada fluorescente

- A: Tubo Fluorescente,
- B: Energia eléctrica (+220 Volts),
- C: Arrancador,
- D: Interruptor,
- E: Capacitor/Condensador,
- F: Filamentos,
- G: Balastro

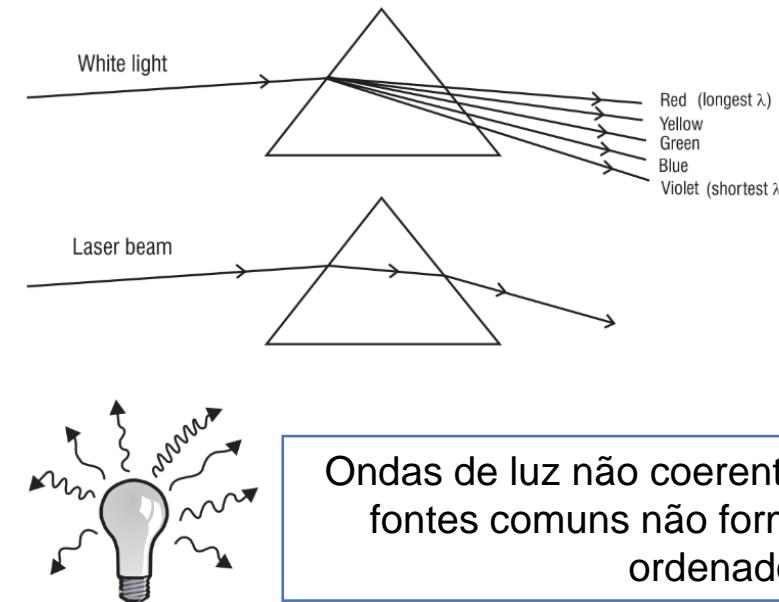
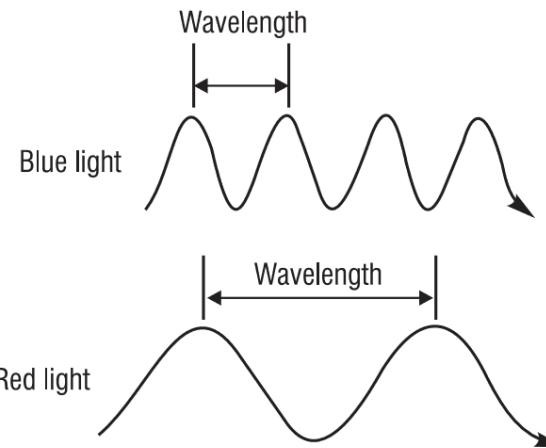
- possuem um par de elétrodos em cada extremo
- O tubo de vidro é preenchido com um material à base de P
 - A intensidade de corrente elétrica que passa através dos gases de baixa pressão emite grande quantidade de radiação UV (no cdo de emissão do Hg)
 - produz luz visível



camada de P que, dependendo da mistura aplicada, dará a tonalidade da coloração emitida.

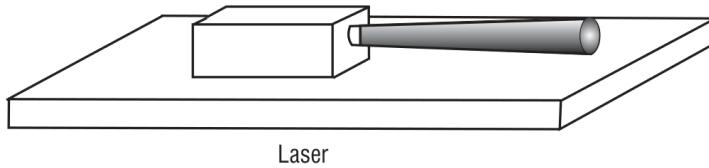
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Ondas de luz e emissão

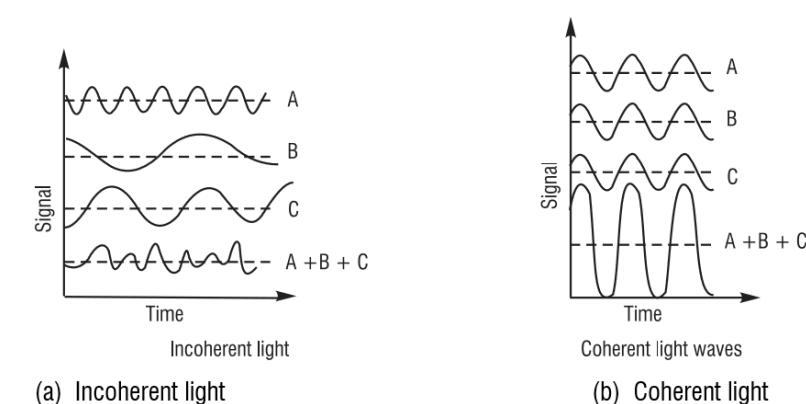


Ondas de luz não coerentes produzidas por fontes comuns não formam um padrão ordenado

Luz laser, contudo, é muito direcional. Por comparação, a luz emitida por um laser diverge muito pouco.



- Monocromaticidade (pureza (f, λ); $\Delta\lambda$ da f)
- Coerência
- Direcionalidade
- Modos de operação



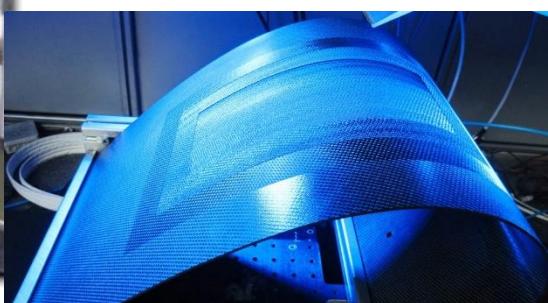
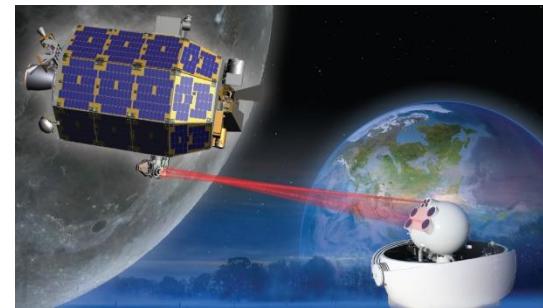
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Uso do laser

LASER é um acrônimo para Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação.

Lasers tem consideráveis aplicações:

- Commercial
 - DVD/Blu-ray Player
 - Laser Pointers
 - Scanners
 - Cutting
 - Welding
- Medical
 - Hair Removal
 - Cancer Diagnosis
 - Imaging
- Military
 - Communication
 - Ranging
 - Targeting



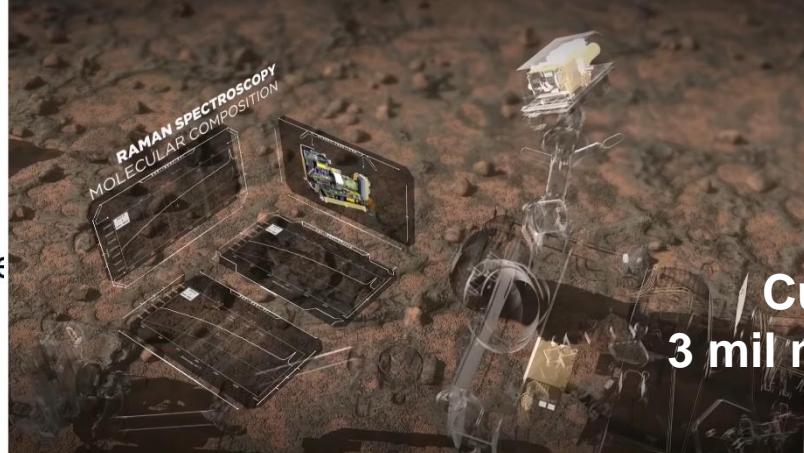
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Uso do laser

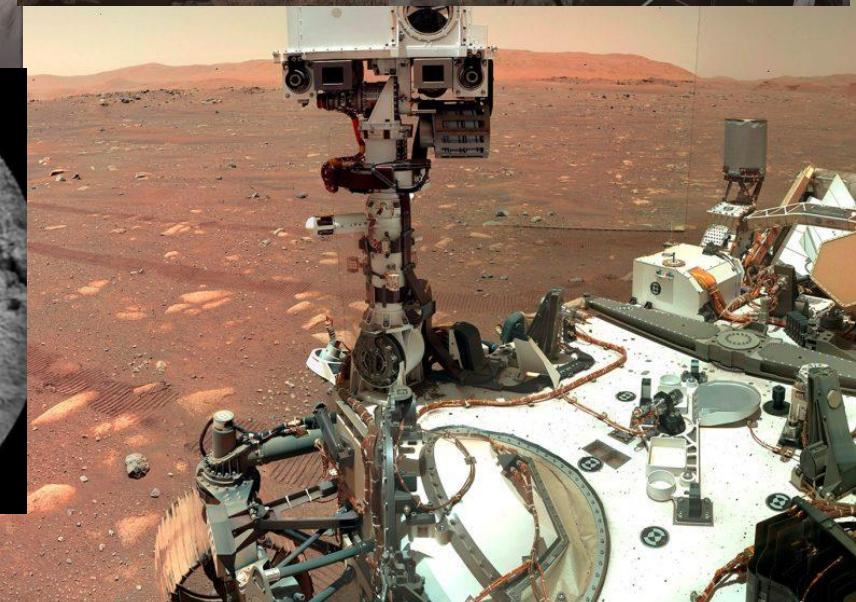
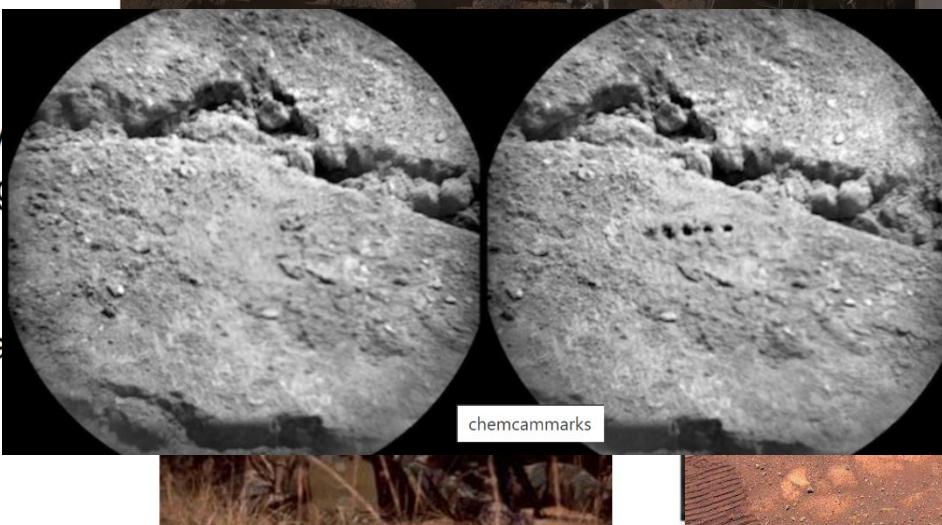
LASER é um acrônimo para Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Partículas

Lasers tem consideráveis aplicações:

- Commercial
 - DVD/Blu-ray Player
 - Laser Pointers
 - Scanners
 - Cutting
 - Welding
- Medical
 - Hair Removal
 - Cancer Diagnosis
 - Imaging
- Military
 - Communications
 - Ranging
 - Targeting



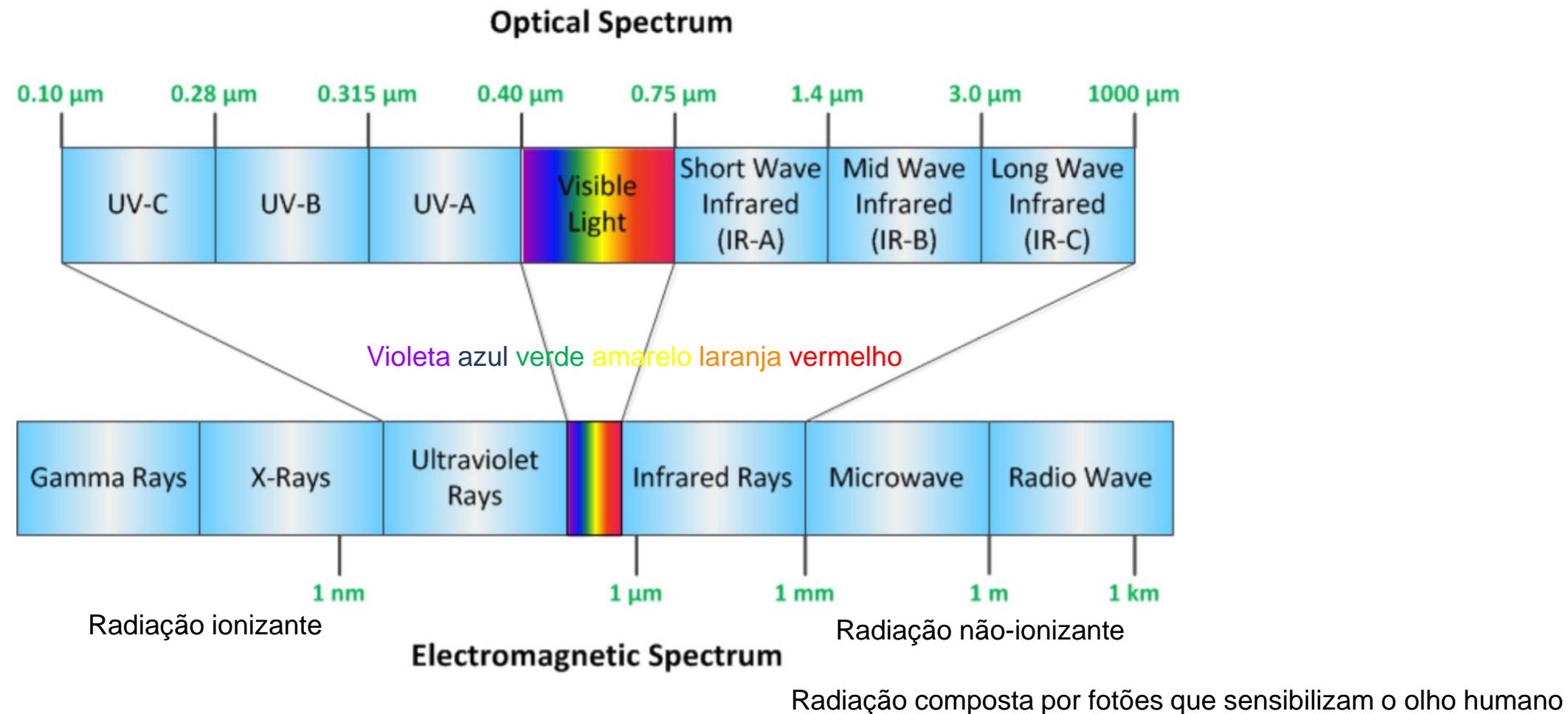
Curiosity rover
3 mil mihões de dólares



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Espectro ótico

- O espectro ótico é uma subseção do espectro eletromagnético
 - consistindo na radiação UV, visível e IR.



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Segurança - Lasers

- A maior parte do perigo da luz do laser vem do calor gerado e focalizado, mas em alguns comprimentos de onda também existem efeitos fotoquímicos perigosos.
- Com lasers de alta potência, mesmo a luz difusa refletida pode danificar os olhos.
 - a maior parte do perigo dos feixes laser vem da sua coerência, concentrando uma quantidade intensa de energia num pequeno ponto da retina, destruindo as células fotorrecetoras.
- Lasers infravermelhos representam um risco particular. **E porquê??**
 - Como eles não podem ser vistos, eles não acionam o reflexo de piscar do olho.
- Lasers poderosos na faixa de 400-1400 nm penetram no globo ocular e aquecem a retina. Noutros comprimentos de onda, a córnea e as lentes absorvem a energia, levando a cataratas ou queimaduras.
- A retina não possui receptores de dor
 - os trabalhadores expostos nem sabem que foram feridos até detetar os problemas de visão resultantes.



<https://www.youtube.com/watch?v=vtvxFc1524c&t=22s>

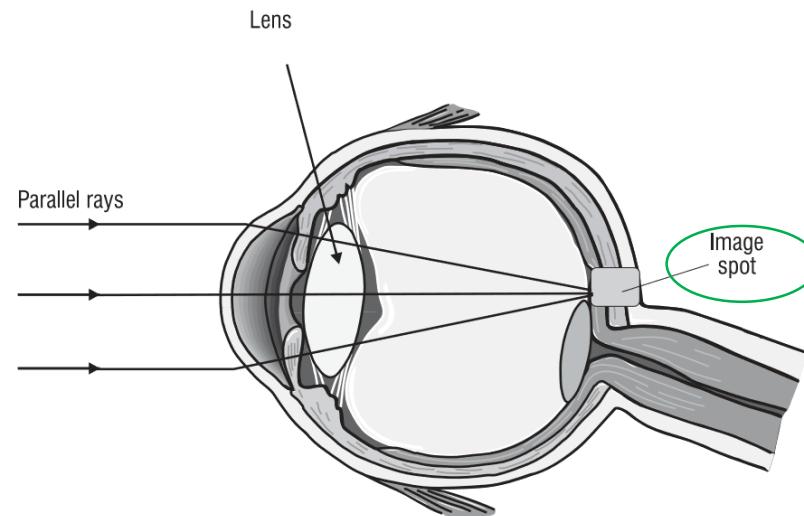
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Segurança

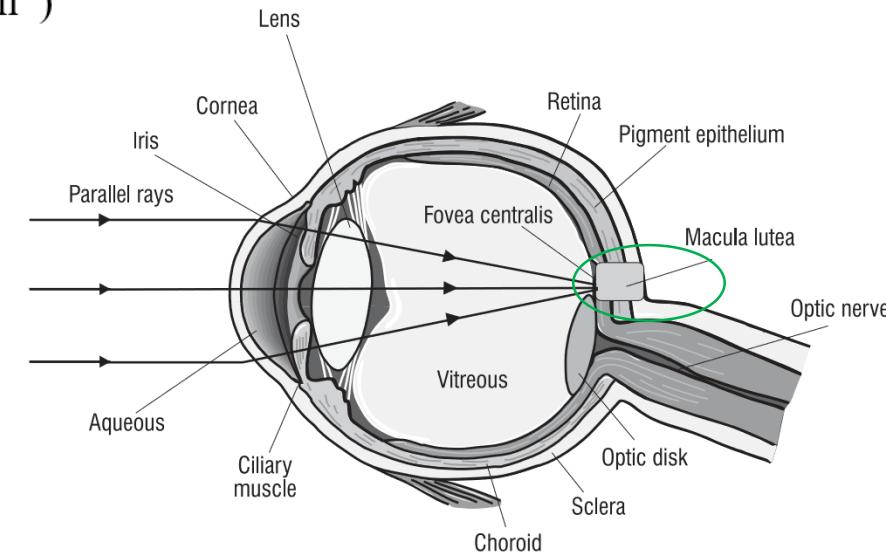
Uma importante quantidade de medida relativa ao dano do olho causado pelo laser é a irradiância retinal (E), definido como potência por unidade de área:

Irradiância é muito mais alta na retina, na córnea ou lente? Porquê?

$$E = \frac{\text{power (W)}}{\text{area (cm}^2\text{)}} \text{ or } E = \frac{\text{power (mW)}}{\text{area (cm}^2\text{)}}$$



Muito maior na retina que na cornea ou lente porque a luz laser é focada por um lente convergente para um pequena área na retina. Um reduzido tamanho da área irradiada significa um alto valor de irradiância.



Mácula: pequena região no centro da retina, que permite que uma pessoa possa ver detalhes

Ligaçāo entre o nervo óptico e o cérebro, através dos fotoreceptores que convertem a luz em impulsos elétricos

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Segurança - localização

Localização com acesso controlado

onde o acesso ao habitáculo de proteção (confinamento) é controlado e é acessível somente a pessoal autorizado que tenha recebido treino adequado sobre segurança da radiação laser e inspecção do sistema envolvido.

- condutas de cabos de fibra óptica e centros de comutação

Localização com acesso restrito

onde o acesso ao habitáculo de proteção é restrito e vedado ao público. Por exemplo, edifícios industriais e comerciais.

Localização com acesso livre

onde o acesso ao habitáculo de proteção é livre. Por exemplo, instalações domésticas e edifícios abertos ao público.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Segurança – localização e níveis de risco

Nível de risco	Tipo de localização		
	Livre	Restrita	Controlada
1	Sem requisitos	Sem requisitos	Sem requisitos
2	- Etiquetagem - Classe 1* a partir do conector ou ferramenta exigida para desconectar	Etiquetagem	Etiquetagem
2M	- Etiquetagem - Classe 1* a partir do conector ou ferramenta exigida para desconectar	Etiquetagem	Etiquetagem
3R (3A)	Não é permitido	- Etiquetagem - Cabos protegidos - Classe 3 a partir do conector ou ferramenta exigida para desconectar	Etiquetagem
3B	Não é permitido	Não é permitido	- Etiquetagem, e - Cabos protegidos - $k \times 3^*$ a partir do conector ou ferramenta exigida para desconectar
4	Não é permitido	Não é permitido	Não é permitido

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Sinalização

Class 1		CLASS 1 LASER PRODUCT
Class 2		LASER RADIATION DO NOT STARE INTO BEAM CLASS 2 LASER PRODUCT
Class 2M		LASER RADIATION DO NOT STARE INTO BEAM OR VIEW DIRECTLY WITH OPTICAL INSTRUMENTS CLASS 2M LASER PRODUCT
Class 3B		LASER RADIATION AVOID EXPOSURE TO BEAM CLASS 3B LASER PRODUCT
Class 4		LASER RADIATION AVOID EYE OR SKIN EXPOSURE TO DIRECT OR SCATTERED RADIATION CLASS 4 LASER PRODUCT



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Efeitos da radiação laser

Radiação laser possui 2 problemas para o corpo humano:

- Perigo para os olhos
- Danos da pele

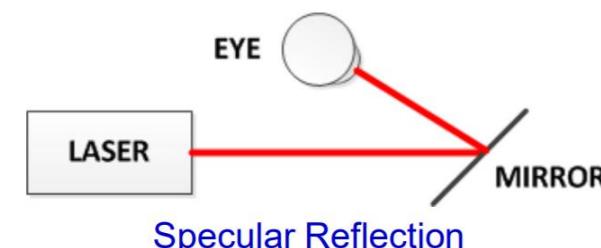
O efeito no corpo humano é dependente de vários parâmetros

- Comprimento de onda
- Potência
- Duração de exposição

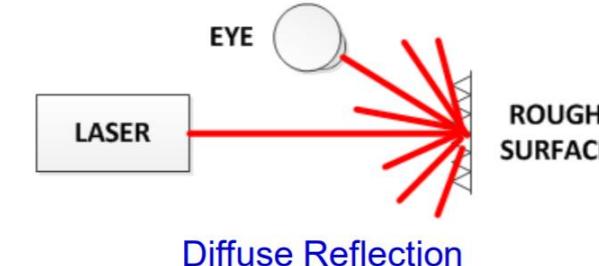
Perigos relativos a olhar o feixe directamente são geralmente considerados, e pele o olhos devem ser protegidos



Intrabeam Viewing



Specular Reflection



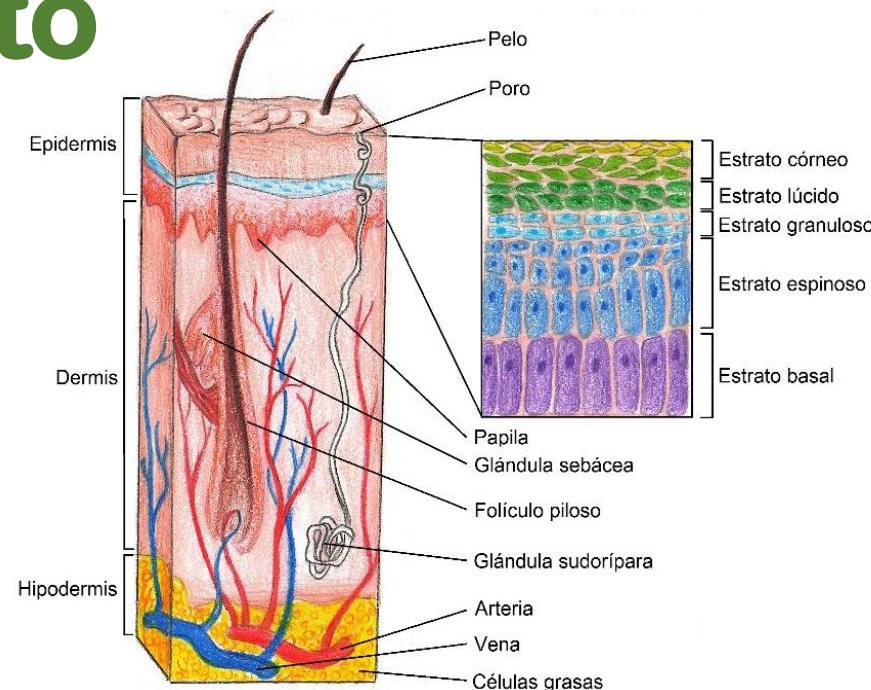
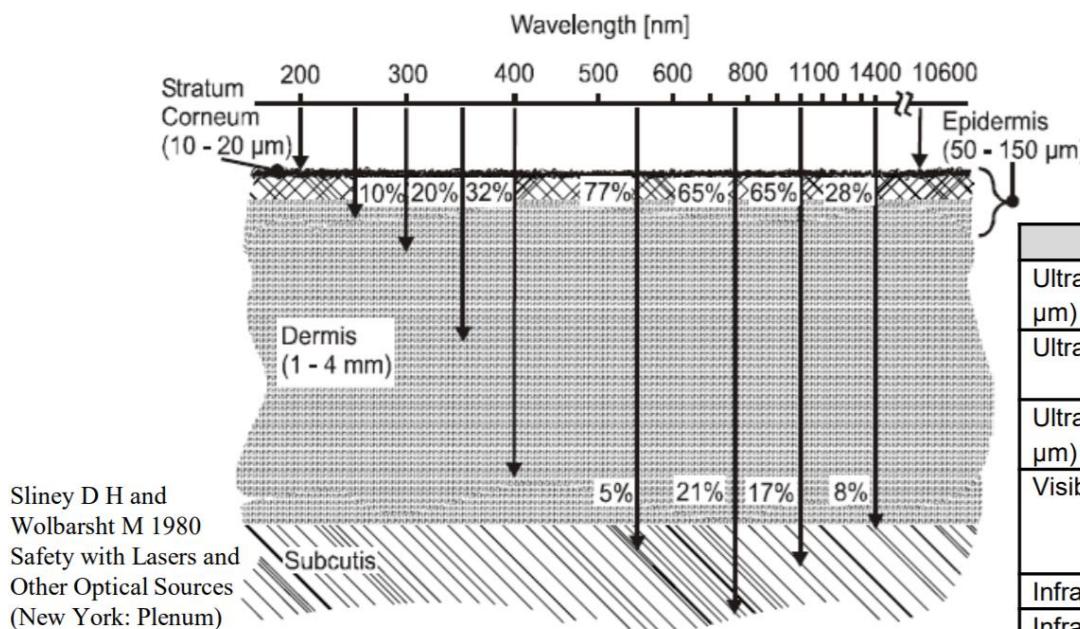
Diffuse Reflection

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Perigos para a pele

Maior orgão do corpo é....????

- maior risco de estar em contato com o feixe de laser
 - partes com maior exposição: as mãos, cabeça e braços
- dependendo do comprimento de onda do laser, diferentes camadas da pele podem ser danificadas



Wavelength	Skin Effects
Ultraviolet C (0.200-0.280 µm)	Erythema (sunburn) Skin cancer
Ultraviolet B (0.280-315 µm)	Accelerated skin aging Increased pigmentation
Ultraviolet A (0.315-0.400 µm)	Pigment darkening Skin burn
Visible (0.400-0.780 µm)	Photosensitive reactions Skin burn
Infrared A (0.780-1.400 µm)	Skin burn
Infrared B (1.400-3.00 µm)	Skin burn
Infrared C (3.00-1000 µm)	Skin burn

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

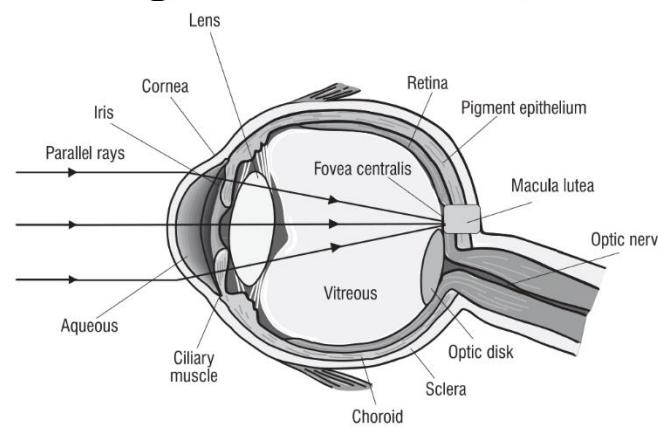
Perigos para os olhos

O maior perigo de radiação laser vem do feixe a entrar no olho:

- O olho é muito sensível à luz
- O olho pode focar o feixe de luz a um spot de $\sim 20 \mu\text{m}$ de diâmetro na retina

As principais partes do olho susceptíveis aos danos

- Cornea
 - Damaging wavelengths: 100 nm to 315 nm & 1400 nm to 1 mm
- Lens
 - Damaging wavelengths: 315 nm to 400 nm
- Retina (Fovea)
 - Damaging wavelengths: 400 nm to 1400 nm



Cornea
Damage



Erosões Corneanas recorrentes

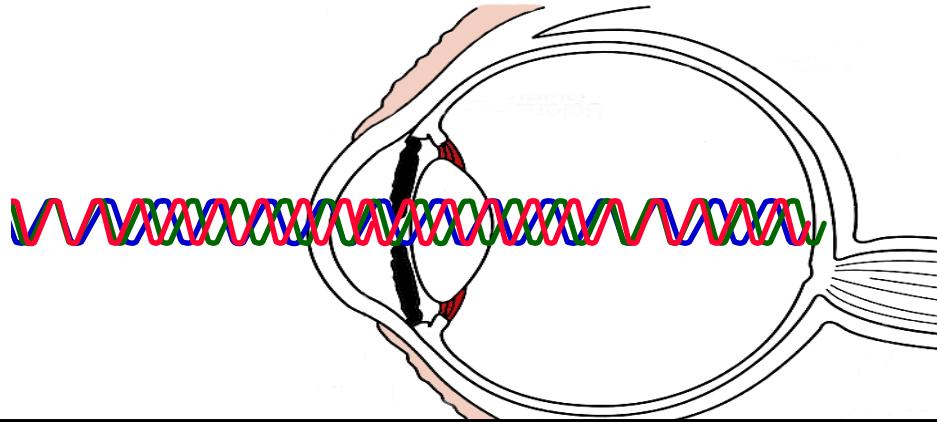


Retina
Damage

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Perigo para os olhos

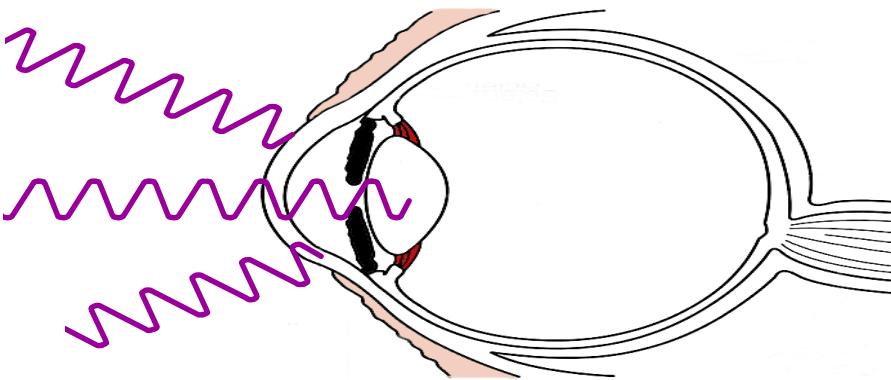
400-1400nm
Afecta a retina



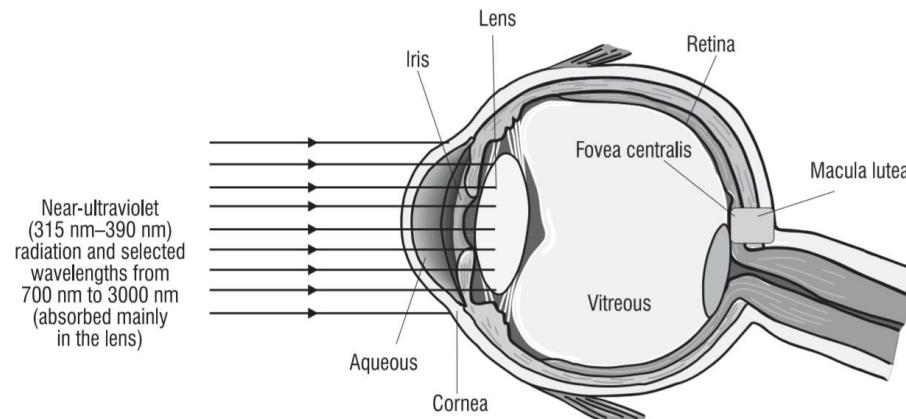
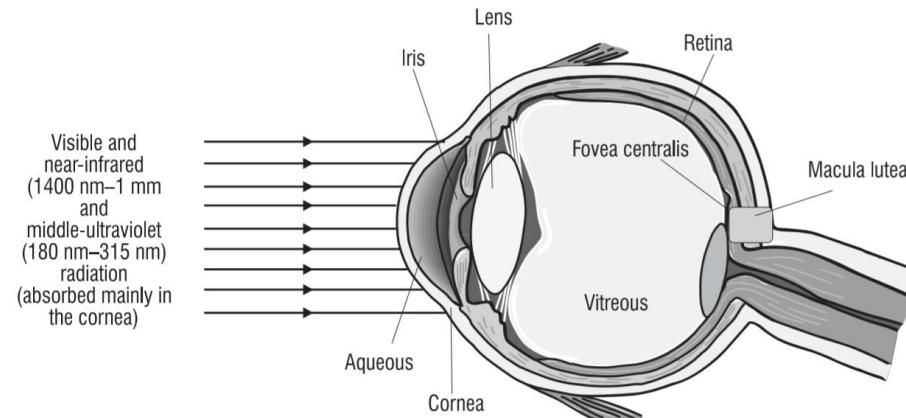
UV-C (100-280nm)
Superfície da córnea

UV-A (315-400nm)
Lentes

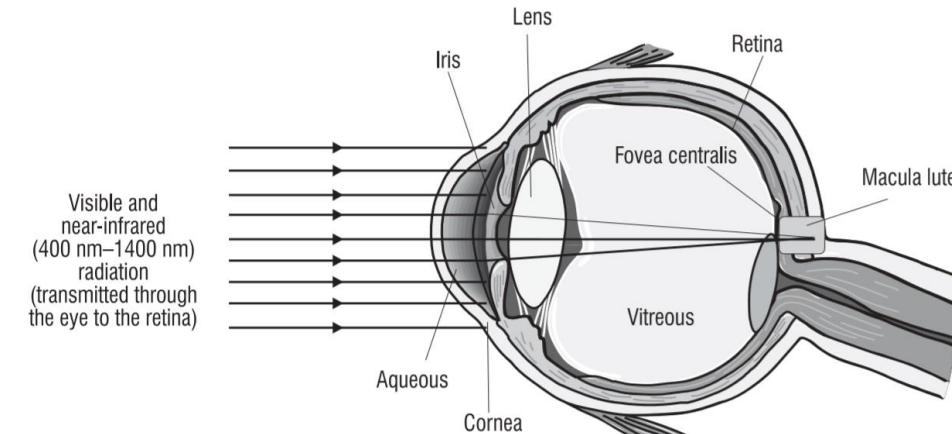
UV-B (280-315nm,
Absorvida pela córnea



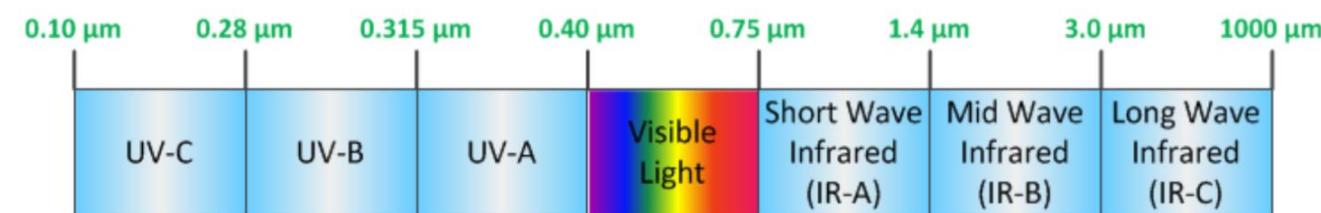
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento



Perigo para os olhos – espectro ótico



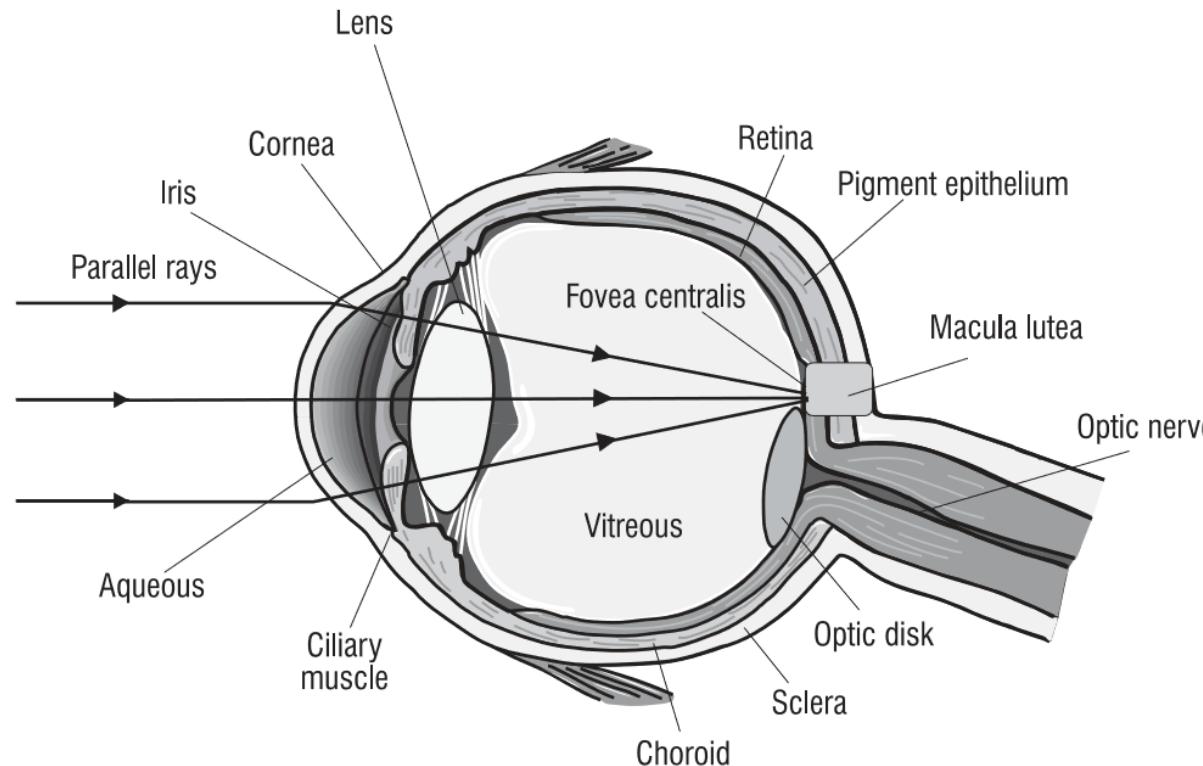
Optical Spectrum



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

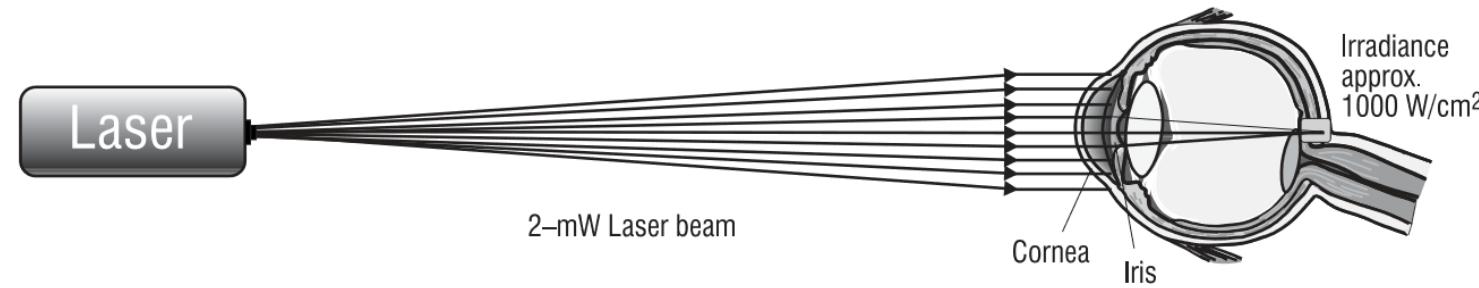
Questão!!!! A quantidade de irradiância será maior na retina ou na córnea ou lente? Porquê?

Muito maior na retina que na córnea ou lente porque a luz laser é focada por um lente convergente para um pequena área na retina. Um reduzido tamanho da area irradiada significa um alto valor de irradiância.



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Exercício1!!! Um apontador laser produz um feixe de 2 mW. O feixe entra no olho e é focado pela córnea e lente para um spot na retina. De que diâmetro será considerando dado que a irradiância nesse spot é ~1000 W/cm²? (R: 16 μm)



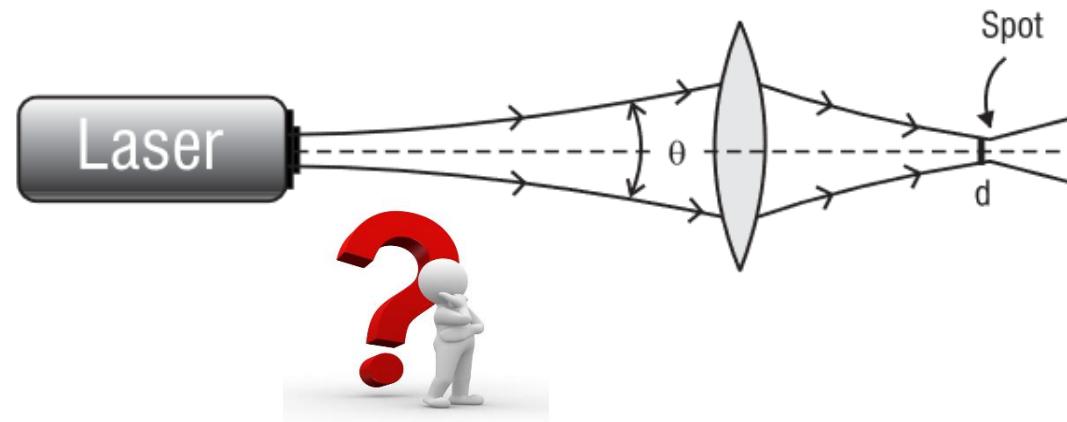
$$E = \frac{\text{power (W)}}{\text{area (cm}^2\text{)}} \text{ or } E = \frac{\text{power (mW)}}{\text{area (cm}^2\text{)}}$$

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Exercício2!!!

Um feixe de laser HeNe de 1 mW com uma divergência 0.5 mrad entra no olho humano. Qual a irradiância na retina se a distância focal, f, desde a cornea à retina é igual a $f = 1.7$ cm? (R: 1.75×10^3 w/cm²)

Nota: o feixe de laser de divergência θ é focado por uma lente de distância focal f até um ponto de diâmetro d , o diâmetro do ponto d é dado por $d = f \theta$



$$E = \frac{\text{power (W)}}{\text{area (cm}^2\text{)}} \text{ or } E = \frac{\text{power (mW)}}{\text{area (cm}^2\text{)}}$$

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

MPE (Maximum Permissible Exposure) – Exposição máxima permitida

- Foram determinadas os limites de exposição para quase todos os tipos de radiação laser.
- MPEs são os níveis de radiação, aos quais as pessoas podem ser expostas sem sofrer efeitos adversos.
 - 1/10 da potência da saída do laser, na qual a probabilidade de causar perigo é de 50%.
- MPEs dependem do comprimento de onda da radiação e da duração da exposição
 - tempo que o feixe permanece na retina e o tamanho da imagem que atinge a retina.

MPE: maior energia por unidade de área de superfície ou potência de um laser que é seguro, medido na córnea, assumindo o pior cenário

MPE é dado como densidade de potência (W/m^2) ou densidade de energia (J/m^2) por unidade de área de superfície.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

MPE

Laser Type	Wavelength (μm)	MPE (average power density—watts/cm ²)			
		0.25 s	10 s	600 s	3 × 10 ⁴ s
CO ₂	10.6	—	0.1 W/cm ²	—	0.1 W/cm ²
Nd:YAG (cw) ^a	1.33	—	5.1 × 10 ⁻³	—	1.6 × 10 ⁻³
Nd:YAG (cw)	1.064	—	5.1 × 10 ⁻³	—	1.6 × 10 ⁻³
Nd:YAG Q-switched ^b	1.064	—	17 × 10 ⁻³	—	2.3 × 10 ⁻⁶
GaAs (diode)	0.840	—	1.9 × 10 ⁻³	—	610 × 10 ⁻⁶
InGdAIP (diode)	0.670	2.5 × 10 ⁻³	—	—	—
HeNe	0.633	2.5 × 10 ⁻³	—	293 × 10 ⁻⁶	17.6 × 10 ⁻⁶
Krypton	0.647	2.5 × 10 ⁻³	—	364 × 10 ⁻⁶	28.5 × 10 ⁻⁶
	0.568	2.5 × 10 ⁻³	—	31 × 10 ⁻⁶	18.6 × 10 ⁻⁶
	0.530	2.5 × 10 ⁻³	—	16.7 × 10 ⁻⁶	1.0 × 10 ⁻⁶
Argon	0.514	2.5 × 10 ⁻³	—	16.7 × 10 ⁻⁶	1.0 × 10 ⁻⁶
XeF _l ^c	0.351	—	—	—	33.3 × 10 ⁻⁶
XeCl ^c	0.308	—	—	—	1.3 × 10 ⁻⁶

^a Operating at less common 1.33 μm

^b Pulsed operation at 11 Hz, 12-ns pulse, 20-mJ/pulse

^c When repeated exposure levels are anticipated the MPE level must be reduced by a factor of 2.5.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

NHZ (nominal hazard zone) – Zona de perigo nominal

Outra quantidade de interesse na segurança do laser é chamada de zona de perigo nominal (NHZ).

Esta zona descreve a região na qual o nível de radiação laser direta, refletida ou dispersa (difusa) está acima do MPE permitido

- três lasers comuns
 - para um feixe de laser direto,
 - um laser com uma lente de foco acoplada
 - luz de laser difusa

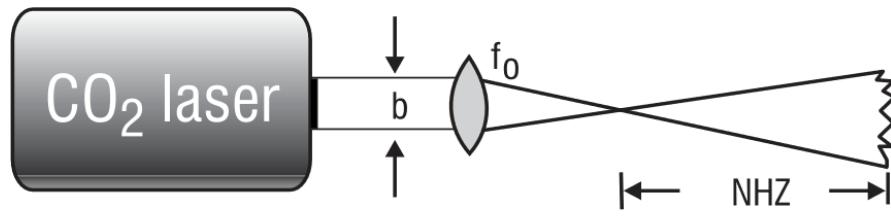
$$\text{NHZ} = \frac{f_0}{b} \sqrt{\frac{4P}{\pi \text{ MPE}}}$$

Distância focal
diâmetro do feixe

Laser Type	Exposure Duration	Nominal Hazard Distance (m)		
		Direct	Lens-on-Laser	Diffuse
Nd:YAG	8 h	1410	11.4	1.4
	10 s	790	6.4	0.8
CO ₂	8 h	399	5.3	0.4
	10 s	399	5.3	0.4
Argon	8 h	25,200	1700	12.6
	0.25 s	505	33.6	0.25

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Exercício3-4!!! Um laser de CO₂ com uma potência de 500 W e diâmetro do feixe de saída de 3 cm é focado por uma lente convexa de distância focal $f_0 = 20$ cm. Determine a zona de risco nominal (NHZ) a partir do ponto focal da lente.



Laser Type	Wavelength (μm)	MPE (average power density—watts/cm ²)			
		0.25 s	10 s	600 s	3×10^4 s
CO ₂	10.6	—	0.1 W/cm ²	—	0.1 W/cm ²
Nd:YAG (cw) ^a	1.33	—	5.1×10^{-3}	—	1.6×10^{-3}
Nd:YAG (cw)	1.064	—	5.1×10^{-3}	—	1.6×10^{-3}
Nd:YAG Q-switched ^b	1.064	—	17×10^{-3}	—	2.3×10^{-6}
GaAs (diode)	0.840	—	1.9×10^{-3}	—	610×10^{-6}
InGdAlP (diode)	0.670	2.5×10^{-3}	—	—	—
HeNe	0.633	2.5×10^{-3}	—	293×10^{-6}	17.6×10^{-6}
Krypton	0.647	2.5×10^{-3}	—	364×10^{-6}	28.5×10^{-6}
	0.568	2.5×10^{-3}	—	31×10^{-6}	18.6×10^{-6}
	0.530	2.5×10^{-3}	—	16.7×10^{-6}	1.0×10^{-6}
Argon	0.514	2.5×10^{-3}	—	16.7×10^{-6}	1.0×10^{-6}
XeF ^c	0.351	—	—	—	33.3×10^{-6}
XeCl ^c	0.308	—	—	—	1.3×10^{-6}

^a Operating at less common 1.33 μm

^b Pulsed operation at 11 Hz, 12-ns pulse, 20-mJ/pulse

^c When repeated exposure levels are anticipated the MPE level must be reduced by a factor of 2.5.

Um laser de Ar com uma potência de 15 W e um diâmetro de feixe laser de 4 mm é focado por 10 minutos por uma lente convergente de 15 cm de distância focal. Determine a NHZ medida a partir do ponto focal da lente.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Classes de lasers

Classe 1

- Considerado de ser incapaz de produzir níveis de radiação prejudicial durante a operação e é segura em todos condições de uso normais
 - O MPE não pode ser excedido quando visto a olho nú ou com ajuda de ampliação ótica; lasers em que o caminho do feixe e reflexões estão protegidas

The standard defines the following classes of lasers

- Class 1, 1M
- Class 2, 2M
- Class 3R, 3B
- Class 4



Classe 1M

- Igual à classe 1 – só se o feixe é visto com elementos óticos: **Exemplos???**
- A potência quando vista a olho nú é menor que o limite de emissão acessível (AEL) permitido para classe 1 mas:
 - A potência que pode ser recebida pelo olho por ótica de ampliação é maior que o AEL para classe 1 e menor que o AEL para classe 3B

lupa/lente ótica (divergir o feixe),
telescópio (feixe colimado), fibra ótica...

AEL: Accessible Emission Limit - O nível máximo de emissão acessível permitido dentro de uma classe de risco de laser específica



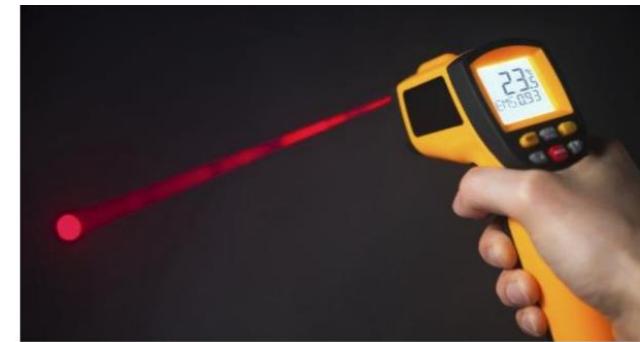
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Classe 2

- Considerada segura porque o reflexo de piscar os olhos limita a exposição não mais que 0.25 s
- Emite numa porção de visível do espectro (400 nm a 700 nm)
- Limitados a 1 mW CW
 - Pode ser maior se o tempo de emissão for menor que 0.25 s

Classe 2M

- Considerada segura por causa do reflexo de piscar do olho
 - se não for visualizado através de instrumentos ópticos
- Similar à classe 1M, podem ser muito perigoso se visto com elementos óticos.



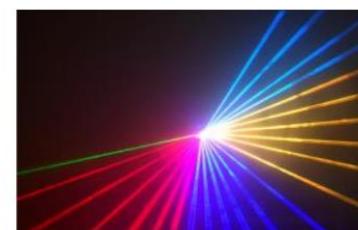
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Classe 3R

- Considerada segura se manuseado com cuidado, com visão do feixe restrita
- Potencialmente perigoso em condições de reflexão especular ou direta
 - podendo produzir perigo para olho: baixo para exposição accidental
- Não são considerados perigosos para a pele
- Limitados a 5 mW CW (a partir de 1mW)
 - Sem perigo de incêndio ou reflexão difusa

Classe 3B

- Considerada perigosa em visão de reflexão especular ou directa, mas reflexões difusas não prejudiciais
- Gama: 5 mW a 500 mW
- Normalmente não são risco de incêndio
- O AEL para laser CW numa gama de 315 nm-IR é 0.5 W
- Para laser pulsados: 400-700 nm limitado a 30 mJ
- Proteção ocular é requerido onde visão directa do feixe do laser pode ocorrer
 - Exposições inferiores a 10 s seguro se superfícies difusas.

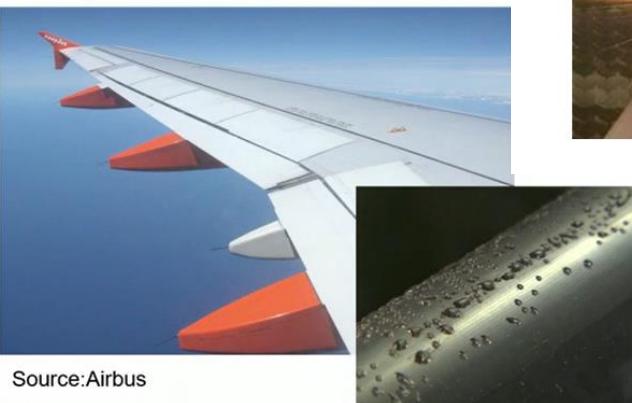
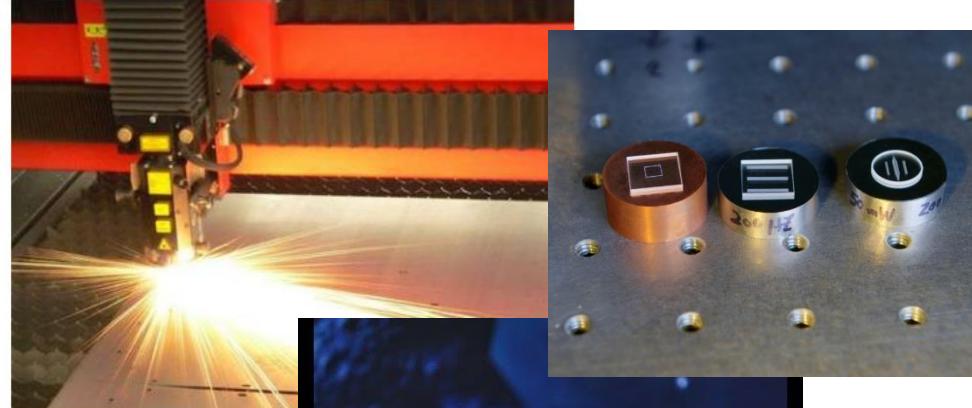


Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Classe 4

- Mais alta e perigosa classe de laser
- Mais de 500 mW em potência
- Podem queimar pele, ou causar danos permanentes nos olhos através de visão do feixe indireta ou difusa, e direta.
- Pode inflamar materiais combustíveis, e representar risco de incêndio
- Maioria dos laser industriais, científicos, aeronáutica/espaço, militares e médicos são classe 4.

Reflexões em superfícies
difusas: perigoso



Source:Airbus



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Classe 3B e 4

- Só pode ser operados por pessoas treinadas e autorizadas
- Exercitar o bom controlo do feixe
- Feixes devem ser terminados em materiais apropriados
 - Nunca direciona o feixe para um pessoas ou um avião
 - Prevenir risco de incêndio ou danos em materiais
 - Nao usar acessórios pessoais (joias, anéis) ou superficies reflectivas quando operar com lasers
- Cercar a energia do feixe laser emitido o máximo possivel
- Usar bata e luvas apropriadas.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Classes de laser e medidas de controlo para 3B e 4

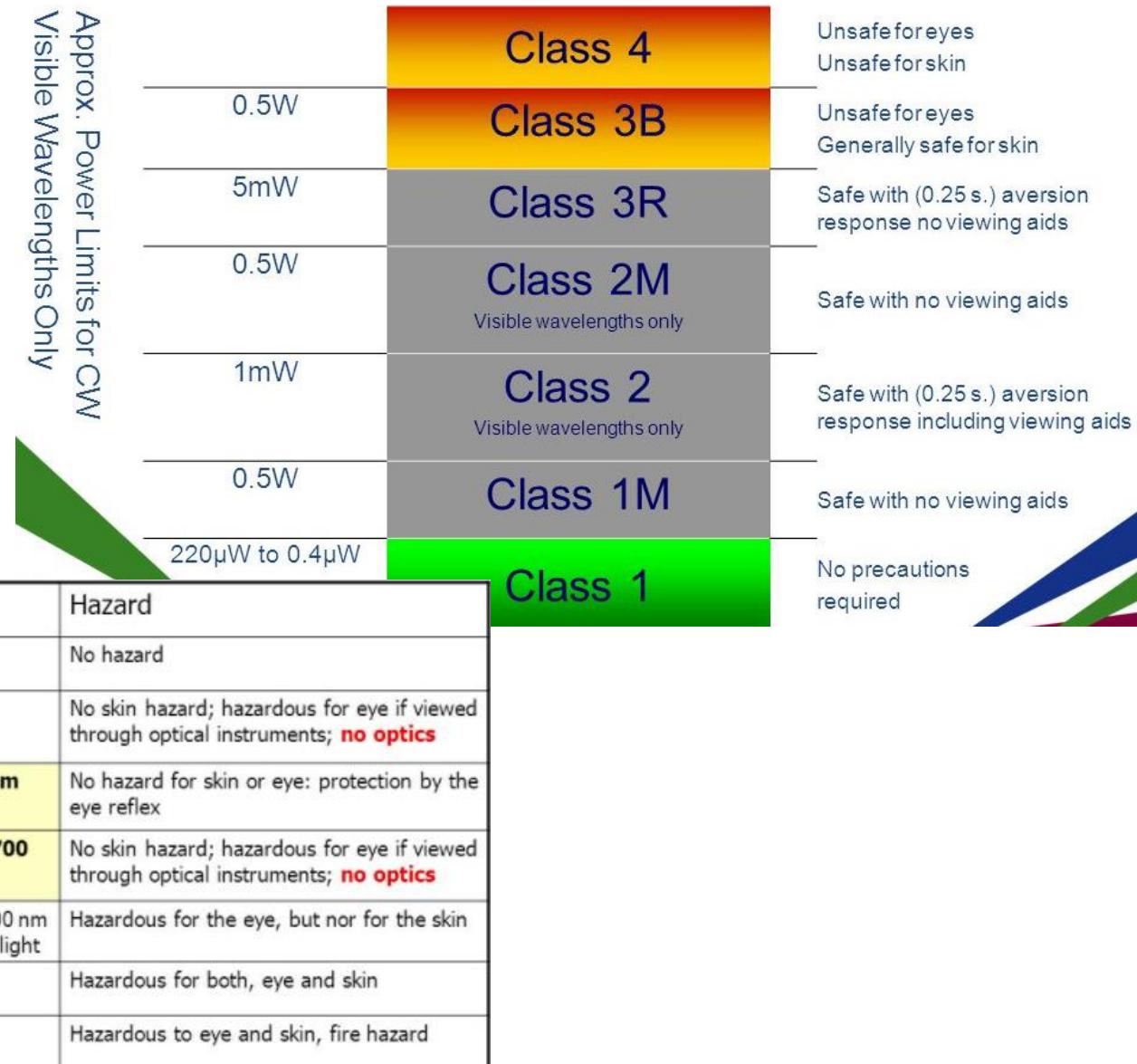
Classe 3B e 4

Engineering Controls	Administrative and Procedural Controls	Personal Protective Equipment
Protective housing and service panel Interlocks on the protective housing Door interlocks and remote-control connector Beam attenuators and beam shutters Key switch or padlock Filtered viewing optics and windows Emission delay Warning lights, emission indicators Beam enclosure Controlled beam path Laser controlled area Beamstops Remote firing and/or monitoring	Laser safety officer Standard operating procedures Limitations on use by class Entry limitations for visitors Education and training Maintenance and service manuals Marking of protective devices Warning signs and labels	Eyewear Clothing Gloves

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Classes e segurança

Class	Concept	Comment
1	The radiation emitted by this laser is not dangerous.	No need for protection equipment.
1M	Eye safe (visible, 0.4 to 0.7μ) when used without optical instruments, may not be safe when optical instruments are used.	No need for protection equipment, if used without optical instruments.
2	Eye safe (visible, 0.4 to 0.7μ) by the aversion response including the blink reflex.	No need for protection equipment.
2M	The light that can hit the eye has the values of a class 2 laser, depending on a divergent or widened beam, it may not be safe when optical instruments are used.	Dangerous to the eyes, safety glasses are recommended.
3R	The radiation from this laser exceeds the MPE values (MPE: maximum permissible exposure). The radiation is max. 5 x AELs of class 1 (invisible) or 5 x of class 2 (visible). The risk is slightly lower than that of class 3B.	Dangerous to the eyes, safety glasses are recommended.
3B	Old class 3B without 3R. The view into the laser is dangerous. Diffuse reflections are not regarded as dangerous.	Dangerous to the eyes, safety glasses are obligatory.
4	Old class 4, even scattered radiation can be dangerous, also danger of fire and danger to the skin.	Personal safety equipment is necessary (glasses, screens).



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Classes e segurança

Working Mode		Typical pulse length
Continuous wave D (cw)*	...is the continuous emission of laser radiation.	> 0.25 s
Pulsed mode I	...is the short-term single or periodically repeated emission of the laser radiation.	> 1 µs to 0.25 s
Giant pulsed mode R	... is like pulsed mode, but the pulse length is very short.	1 µs to 1 ns
Modelocked M	... is the emission of laser radiation with all the energy stored in the laser medium released within the shortest possible time.	< 1ns

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

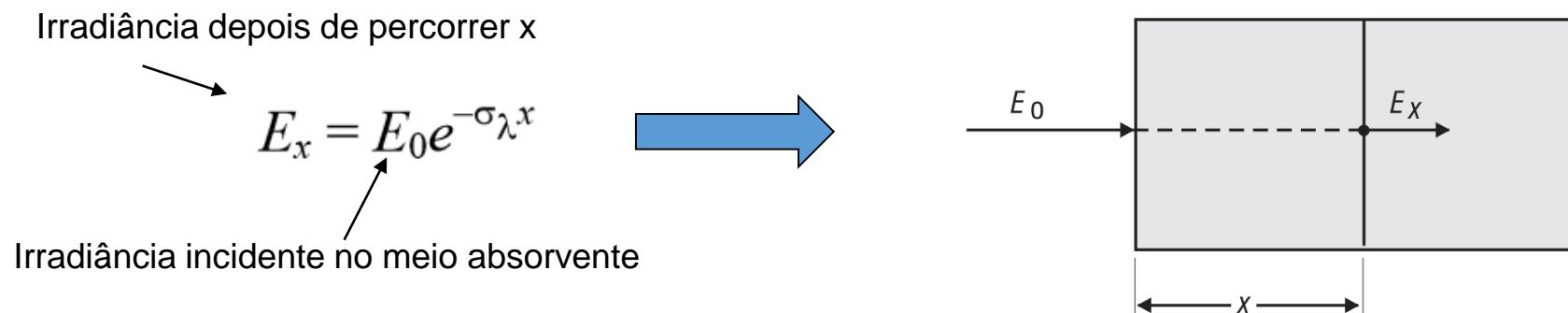
Comprimento de onda do laser

- Assim como a luz comum, o feixe laser vem em todas as cores. Eles medem em nm, o comprimento de onda da luz.
- O comprimento de onda afeta o cálculo da densidade ótica (OD). Operadores devem usar óculos específicos para determinado comprimento de onda.
 - Óculos para laser de diferente equipamento, com um feixe de diferente comprimento, não são seguros mesmo que a OD seja alto.
- Existem 3 principais gamas de comprimento de onda de luz:
 - Ultraviolet – 100-400 nm
 - Visible – 440-750 nm
 - Infrared – 750 nm to 1mm

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Densidade ótica e lei de Lambert

- Quando um feixe de luz é transmitido através de um material transparente
 - parte da energia da luz é absorvida
 - intensidade do feixe diminui continuamente.
- A absorção pode ser mínima, como no ar, ou considerável, como num pedaço de vidro escuro.
- Processo de absorção remove a energia do feixe e a converte em energia térmica do meio transparente
 - aumentando a energia cinética dos átomos e das moléculas.



$\sigma\lambda$, coeficiente de absorção é a propriedade do meio absorvente e relacionado com comprimento de onda da luz

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

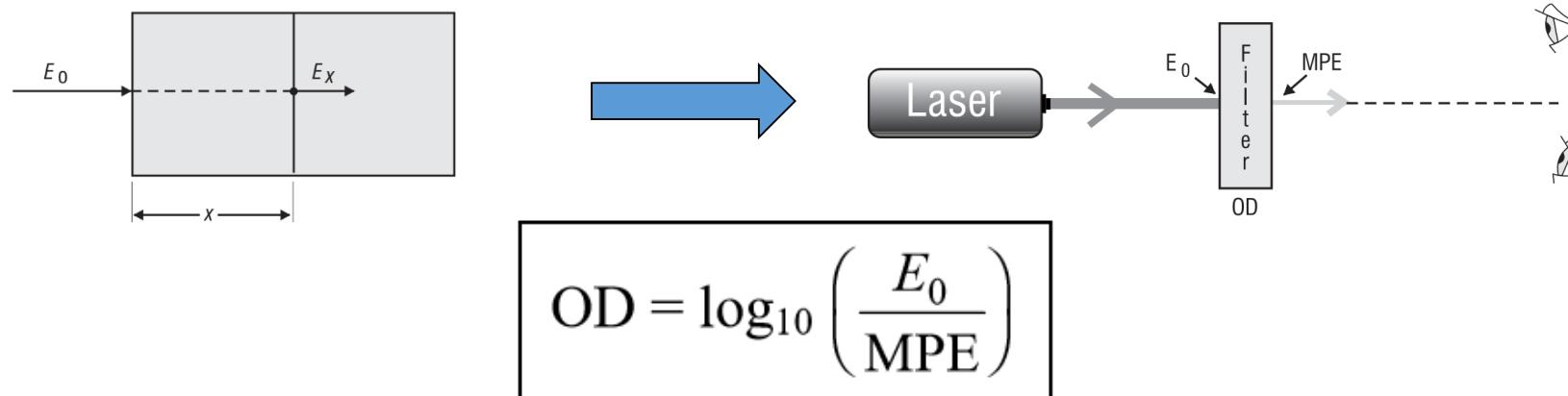
Densidade ótica e lei de Lambert

- Para filtros oculares, onde o σ_λ é conhecido e a espessura do filtro é pré-determinada o produto $\sigma_\lambda x$ substituído por um quantidade chamada de densidade ótica (OD) e a lei de Lambert toma a forma:

$$E_x = E_0 e^{-\sigma_\lambda x} \longrightarrow E_x = E_0 10^{-OD}$$

- Uma vez que transmissão da luz através de um meio observante é definido como a razão E_x/E_0 , temos:

$$T = 10^{-OD}$$



Por definição, a transmitância da amostra de material está relacionada à sua profundidade ótica (base e) ou à sua absorbância (base 10).

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Lei de Lambert (dedução para slide 48)

- As relações matemáticas são mostradas a seguir (observe que o logaritmo comum é denotado $\log = \log_{10}$ e o logaritmo natural é denotado $\ln = \log_e$, este último não usado diretamente abaixo):
- A densidade óptica OD é definida como a absorbância A' escrita numa forma logarítmica por

$$OD = A' = \log_{10} (1 / T) = a \log_{10} (e) x = a'x$$

que é deduzido da lei Beer-Lambert dada por

$$I = I_0 e^{-ax}$$

onde a transmitância T é dada por

$$T = I / I_0$$

- onde a intensidade da radiação transmitida I diminui exponencialmente com o comprimento de penetração ou profundidade x, I_0 é a intensidade da radiação incidente, e a e a' denotam coeficientes de absorção dependendo da forma que é usada.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Densidade ótica

- Classifica-se os óculos e óculos de proteção pela sua densidade ótica (OD)
 - Logaritmo de base 10 do fator de atenuação de quanto o filtro reduz a energia do feixe
 - Os óculos necessários devem reduzir a OD a uma potência abaixo da exposição máxima permitida (MPE).
- Qual é o modo de operação do laser?
 - Onda contínua
 - Pulso único
 - Pulso repetitivo
- Outras variáveis
 - Comprimento de onda – em nm
 - Potência média – em W
 - Largura de pulso – para pulso único ou repetitivo – em s
 - Energia por pulso – em J
 - Frequência de repetição – em Hz

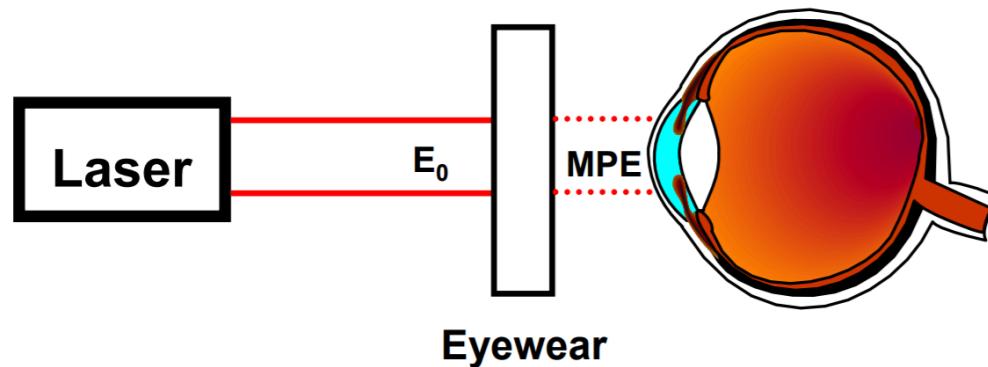


Wavelength (nm)	OD
190-532	7
800-839	3
840-864	4
865-1063	5
1064	7
10600	5

OD define-se pelo fator de atenuação de como o filtro reduz a potência do feixe.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

OD de óculos para lasers



$$OD = \log \frac{E_0}{MPE}$$

Given: $\lambda = .488 \mu\text{m}$

$\Phi = 5 \text{ W}$

$d = 7 \text{ mm}$

$A = 0.4 \text{ cm}^2$

$$E_0 = (5\text{W})/(0.4 \text{ cm}^2) = 12.5 \text{ W/cm}^2$$

$$MPE = 2.5 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \text{ (for 0.25 sec.)}$$

OD	% Transmission
0	100%
1	10%
2	1%
3	0.1%
4	0.01%
5	0.001%
6	0.0001%

$$OD = \log_{10} \left(\frac{12.5 \text{ W/cm}^2}{2.5 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2} \right)$$

$$OD = 3.7$$

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Proteção

Baixa proteção

OD (Densidade ótica)	Transmissão em %	Fator de atenuação
0	100%	1
1	10%	10
2	1%	100
3	0.1%	1,000
4	0.01%	10,000
5	0.001%	100,000
6	0.0001%	1,000,000
7	0.00001%	10,000,000



Alta proteção

Ex: óculos com OD de 2 reduz o feixe laser por um factor de 100.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Exercício5!!!

Um laser Nd:YAG (modo cw) com uma potência de 40 W é projetado numa pupila ocular totalmente dilatada de 7 mm de diâmetro. O olho é exposto por um período de 10 segundos. Calcule a OD mínima de uns óculos de proteção laser necessário para proteger os olhos de danos. Qual a classe do laser?



Laser Type	Wavelength (μm)	MPE (average power density—watts/ cm^2)			
		0.25 s	10 s	600 s	3×10^4 s
CO ₂	10.6	—	0.1 W/ cm^2	—	0.1 W/ cm^2
Nd:YAG (cw) ^a	1.33	—	5.1×10^{-3}	—	1.6×10^{-3}
Nd:YAG (cw)	1.064	—	5.1×10^{-3}	—	1.6×10^{-3}
Nd:YAG Q-switched ^b	1.064	—	17×10^{-3}	—	2.3×10^{-6}
GaAs (diode)	0.840	—	1.9×10^{-3}	—	610×10^{-6}
InGdAlP (diode)	0.670	2.5×10^{-3}	—	—	—
HeNe	0.633	2.5×10^{-3}	—	293×10^{-6}	17.6×10^{-6}
Krypton	0.647	2.5×10^{-3}	—	364×10^{-6}	28.5×10^{-6}
	0.568	2.5×10^{-3}	—	31×10^{-6}	18.6×10^{-6}
	0.530	2.5×10^{-3}	—	16.7×10^{-6}	1.0×10^{-6}
Argon	0.514	2.5×10^{-3}	—	16.7×10^{-6}	1.0×10^{-6}
XeF ₂ ^c	0.351	—	—	—	33.3×10^{-6}
XeCl ^c	0.308	—	—	—	1.3×10^{-6}

^a Operating at less common 1.33 μm

^b Pulsed operation at 11 Hz, 12-ns pulse, 20-mJ/pulse

^c When repeated exposure levels are anticipated the MPE level must be reduced by a factor of 2.5.

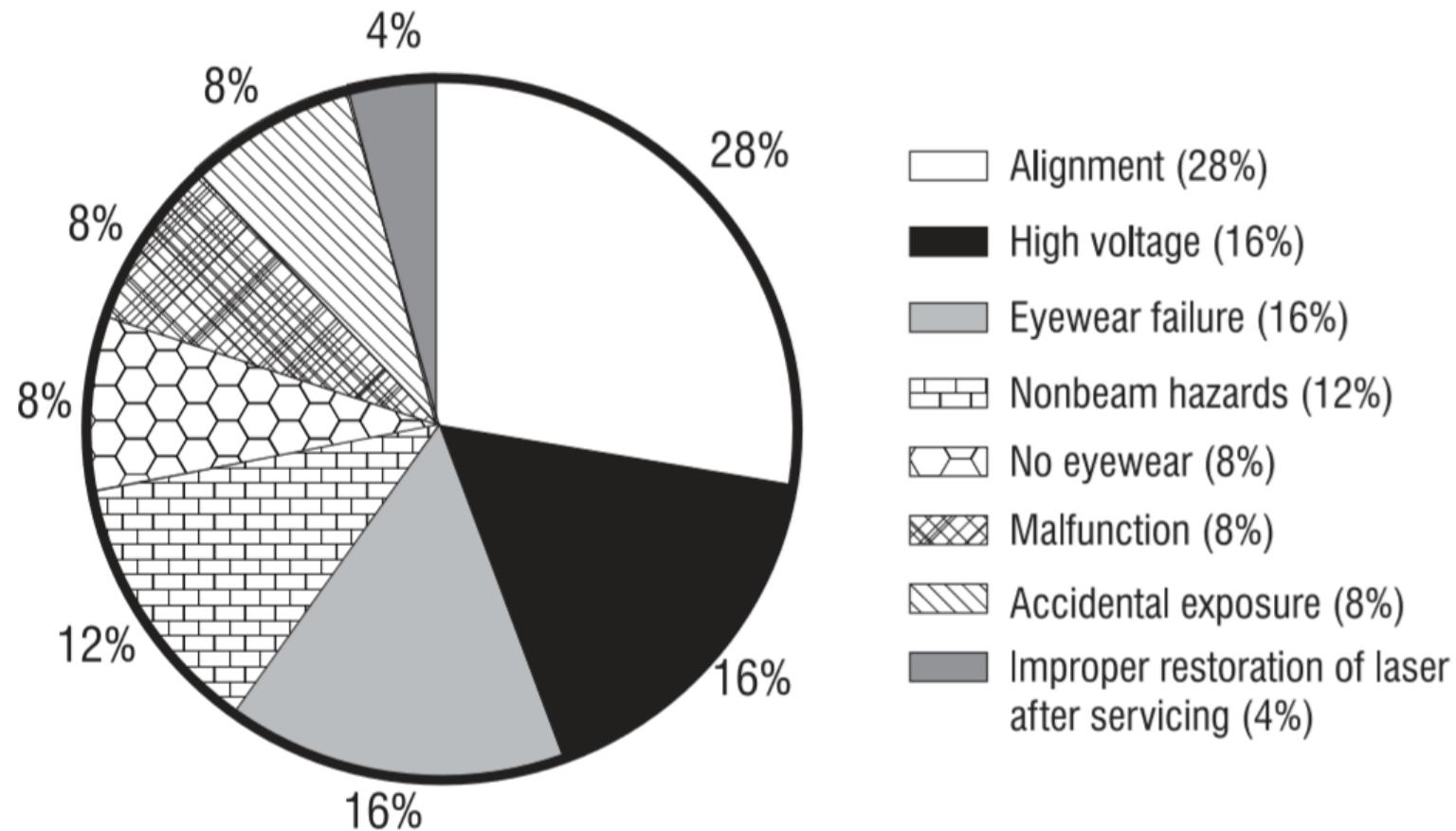
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Exercícios 6-7

- Calcula a densidade ótica mínima para proteção ocular usando um laser de Argon de comprimento de onda de 514 nm, para um tempo de exposição de 0.25 s, uma potência de 5 W e um cenário onde o diâmetro da pupila do olho dilatado é de 7 mm. (R: OD= 4)
- Um laser promove uma irradiância de 1800 W/cm² numa determinada área. Se estiver a trabalhar nessa área, e MPE para este laser é de 0.005 W/cm², qual é a densidade mínima para os óculos que devo usar? (R: OD= 6)

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Causas de acidentes com lasers



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Fontes para emissores óticos

- Emissão de luz:
 - Proveniente da transição de um portador, de um estado de energia excitado para um estado de energia inferior;
 - Energia deve ser fornecida para o electrão passar para um estado de energia superior; a energia pode vir de vários tipos de fontes (calor, descargas eléctricas, reacção química, corrente eléctrica, ...)
 - Vários tipos de fontes óticas LASER (gasosos, fibra, semicondutores, ...), com diferentes propriedades, dependentes do material utilizado e da forma de o excitar
- Lasers semicondutores:
 - Mais utilizados em sistemas de comunicações óticas; robustez física, longevidade elevada, volume reduzido, excitados por energia elétrica e convertem diretamente sinal elétrico em sinal ótico

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

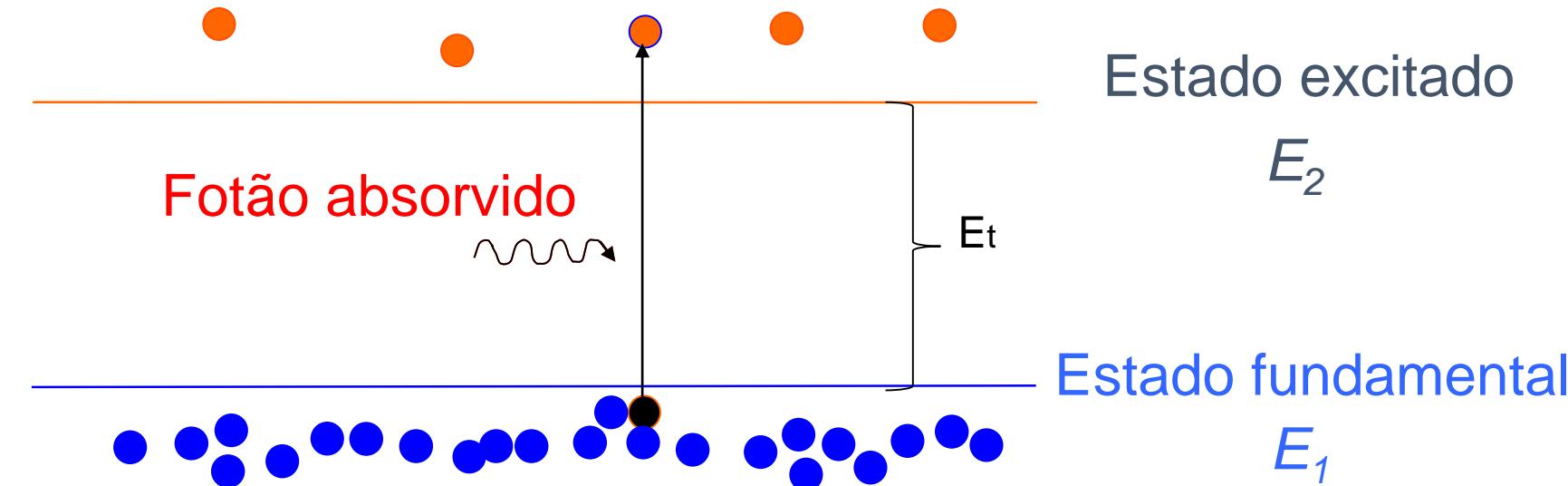
Processos de transição ótica (semicondutores)

- Absorção
- Emissão espontânea
- Emissão estimulada

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

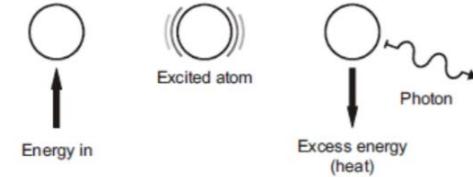
Processos de transição ótica (semicondutores)

- **Absorção:** um fotão com energia $> (E_2 - E_1)$
- A energia do fotão pode ser absorvida por um electrão no estado E_1 , que é excitado para o estado E_2



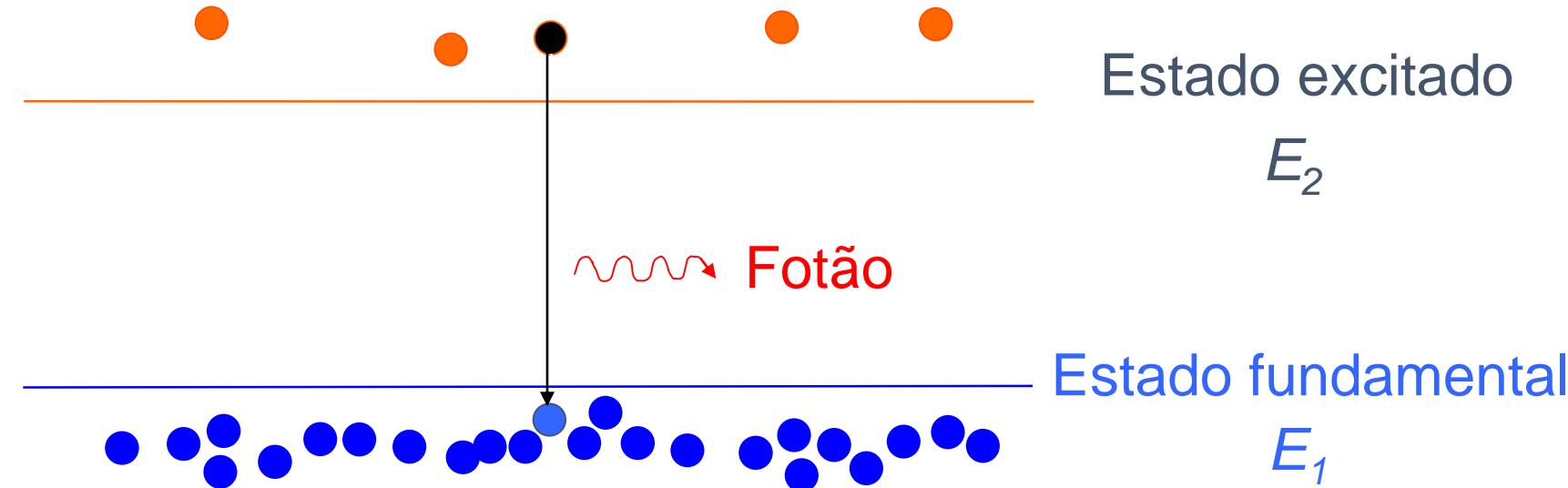
Eletrão salta de uma banda de menor energia para outra banda com maior energia pela absorção de fotão.
Vai de uma banda de valência de menor energia para um banda de condução de maior energia que está vazia

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento



Processos de transição ótica

- **Emissão espontânea:** electrões no estado excitado E_2 , podem decair espontaneamente para o estado E_1
- Um fotão com energia $h\nu = E_2 - E_1$ é emitido

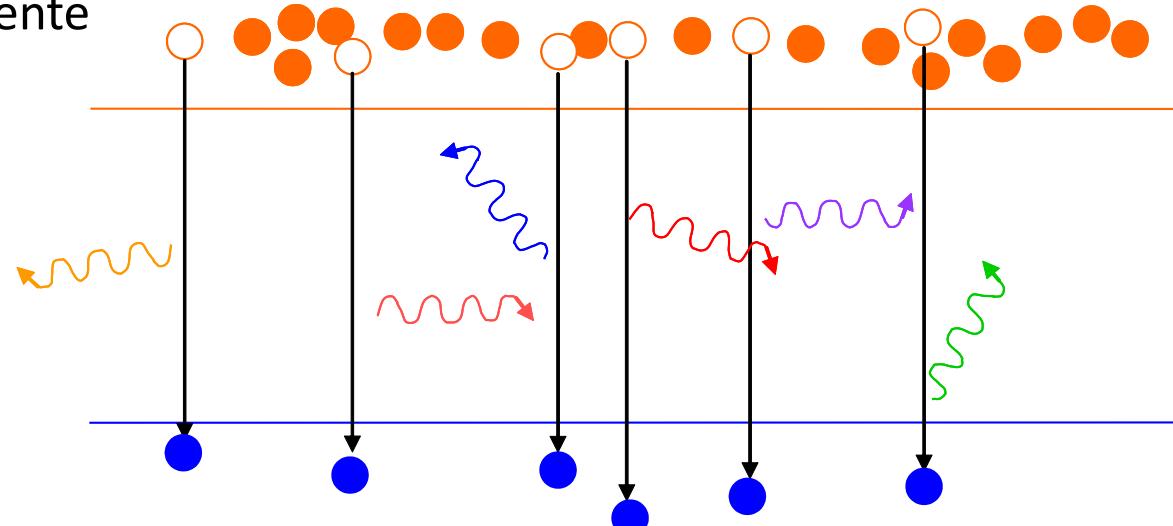


Emissão espontânea dá-se quando electrões no estado excitado E_2 podem decair espontaneamente para o E_1 por ter excesso de energia

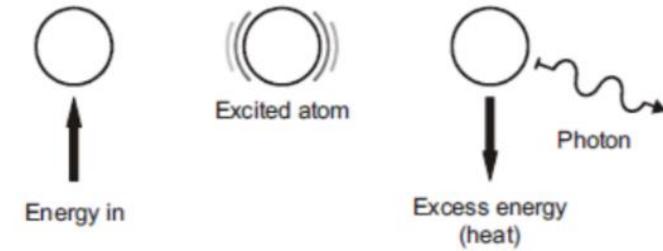
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Processos de transição ótica

- A luz produzida por emissão espontânea tem:
 - Direcção de propagação aleatória
 - Fase aleatória
 - Frequência aleatória
 - Incoerente



Exemplo: Led, lâmpada incandescente



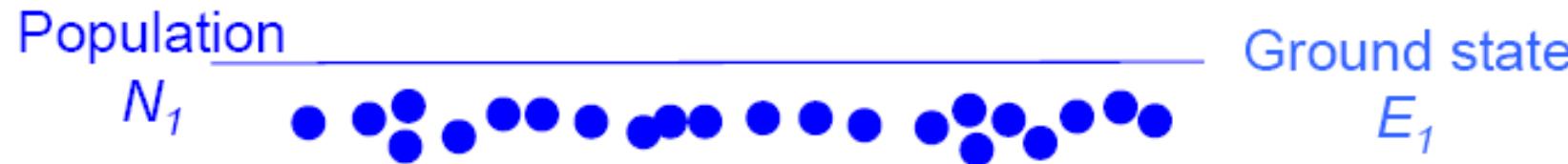
Estado excitado
 E_2

Estado fundamental
 E_1

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Processos de transição ótica

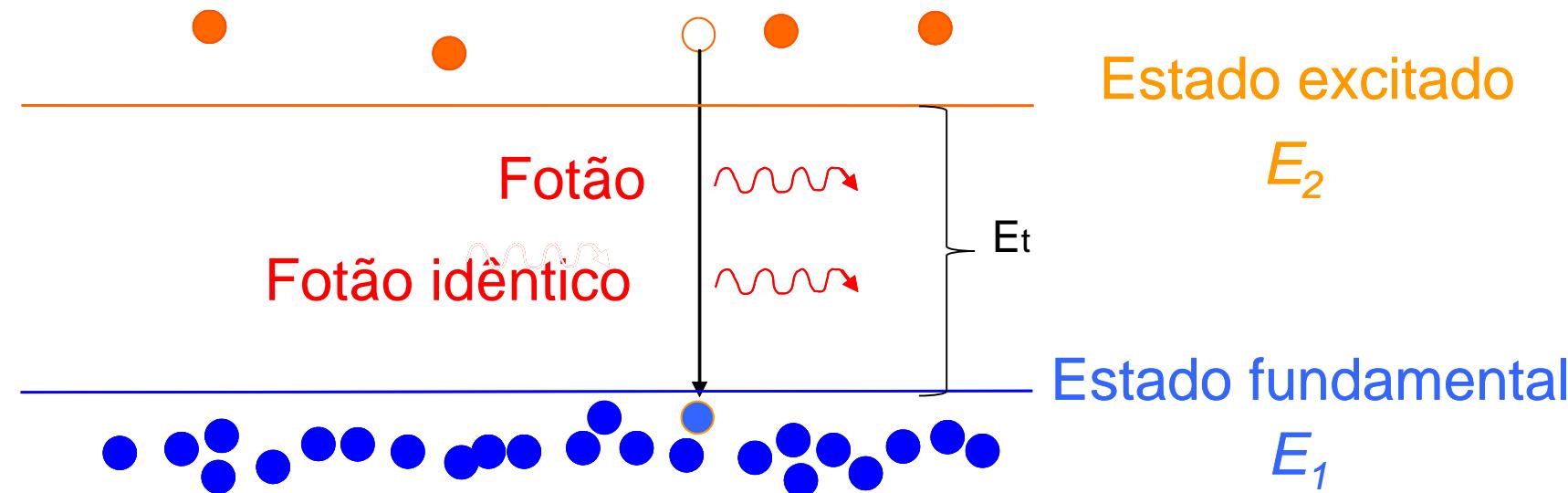
- Electrões maioritariamente no estado E_1 ($N_2 \ll N_1$)
- Emissão espontânea domina



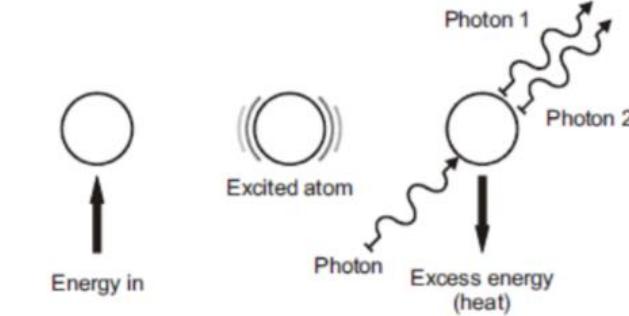
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Processos de transição ótica

- **Emissão estimulada**
- Um fotão com energia $E_2 - E_1$ vai estimular a transição de um electrão excitado → um fotão idêntico é emitido (mesma fase, frequência e direcção)
- A luz produzida é **coerente**



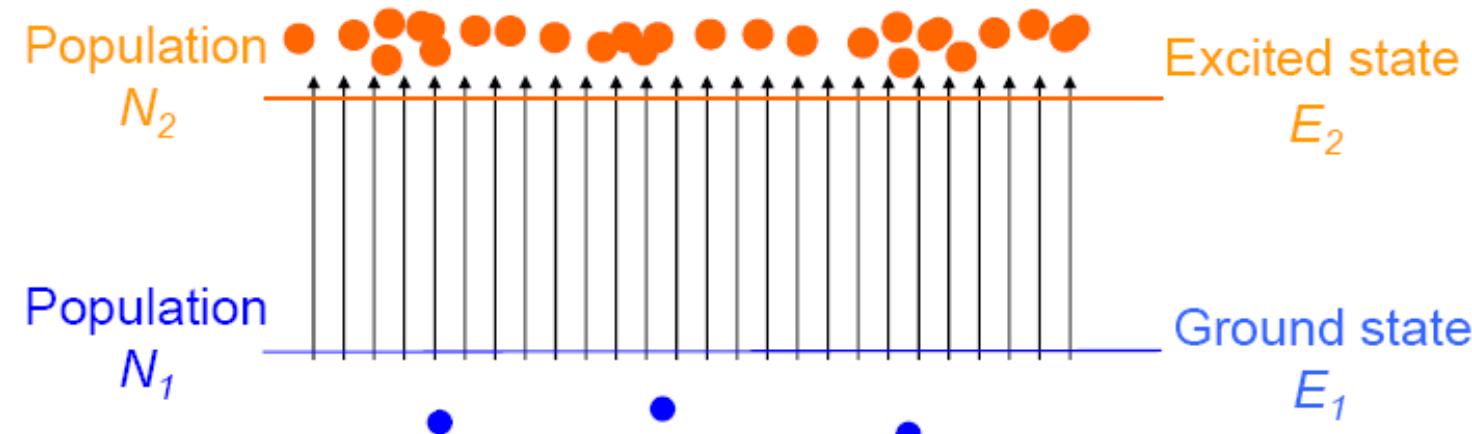
Princípio da conservação da energia: a quantidade de energia num sistema isolado permanece constante



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Processos de transição ótica

- Emissão estimulada; desejável, possibilita emissão coerente
- Necessita que os electrões estejam maioritariamente no estado E_2
- Inversão da população conseguida por bombagem elétrica (ou ótica)
- $N_2 \gg N_1$, emissão estimulada domina

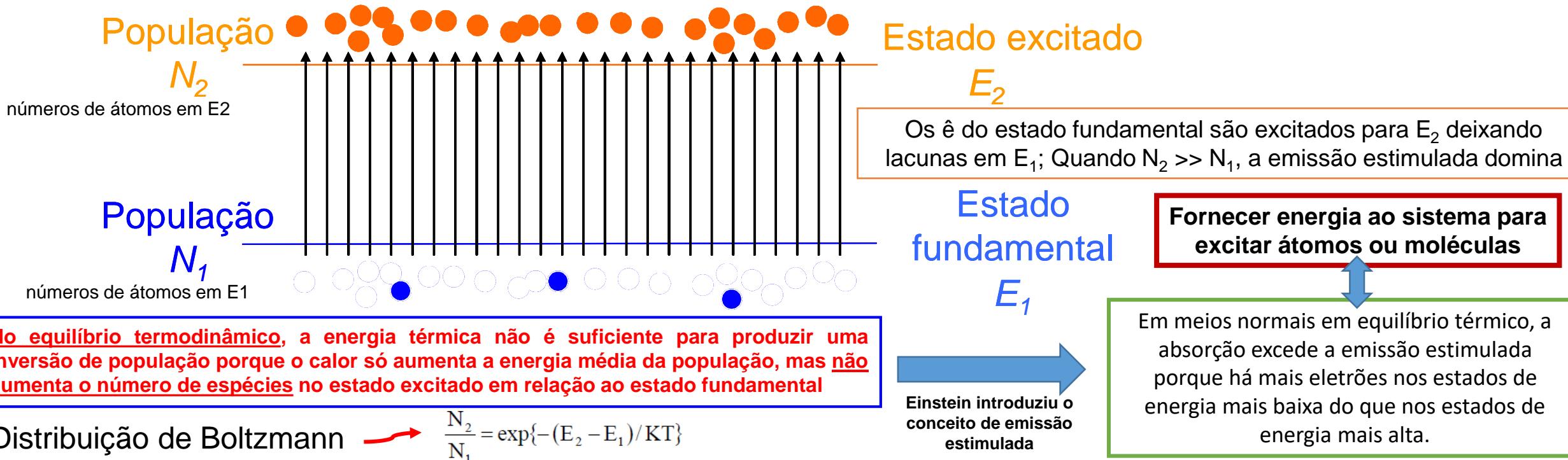


Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

LASERS - Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação

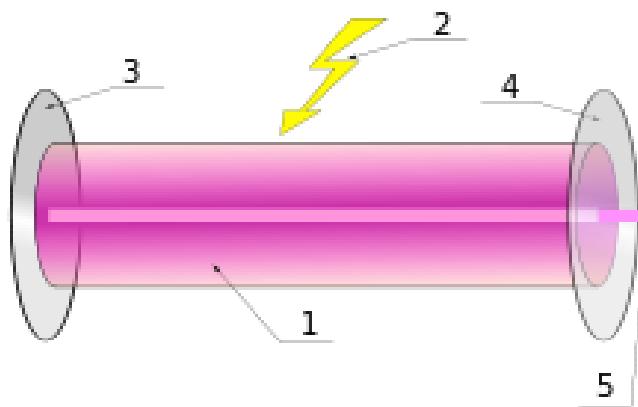
- Princípio de funcionamento (oscilador) - implica amplificação + realimentação + selecção de frequência:
 - Para termos ganho, a **emissão estimulada** deve ser dominante, pelo que é necessária **inversão da população**

(dopando forte/ as camadas p e n da heteroestrutura; polarizando directa/, qdo a densidade de portadores injectada na região activa excede um determinado valor ($I > I_{th}$) a inversão da população é conseguida e a região ativa exibe ganho) - itérbio (Yb³⁺), o érbio (Er³⁺) e o túlio (Tm³⁺)



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

LASERS



1. 1. Meio de ganho
2. 2. Energia de bombeamento do laser
3. 3. Alto reflector
4. 4. Reflector
5. 5. Feixe laser

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

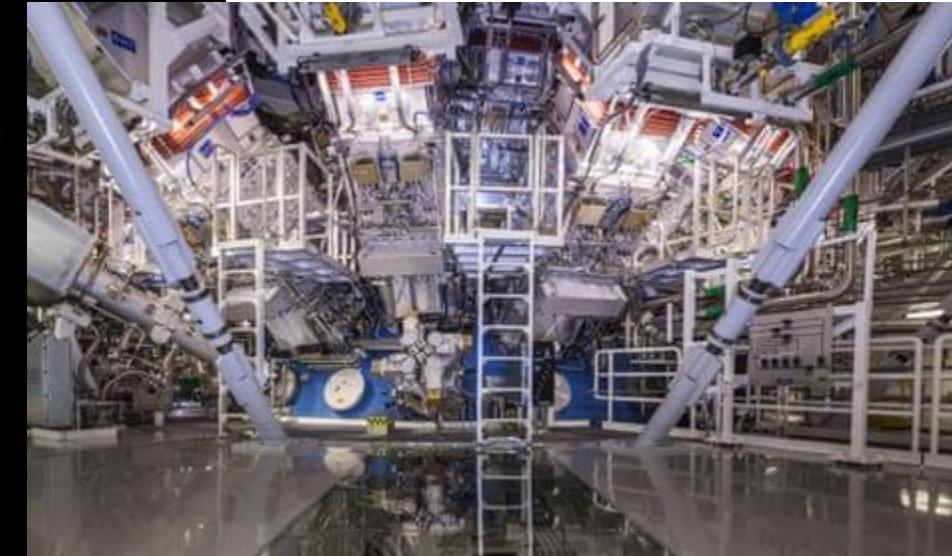
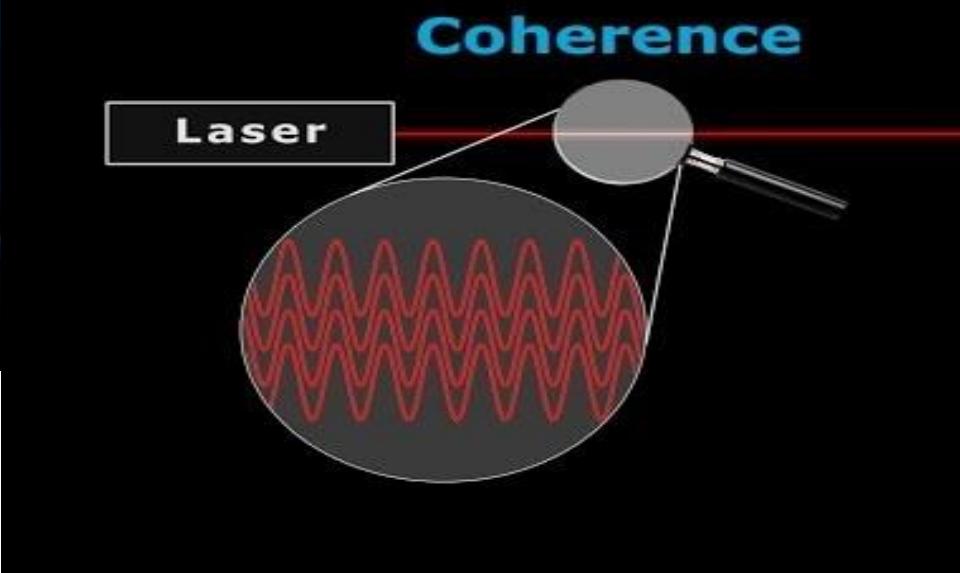
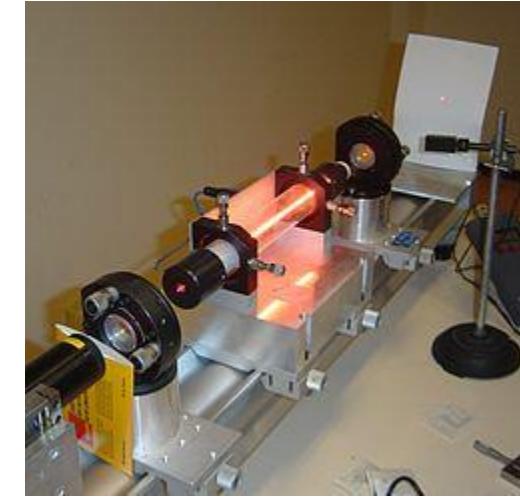
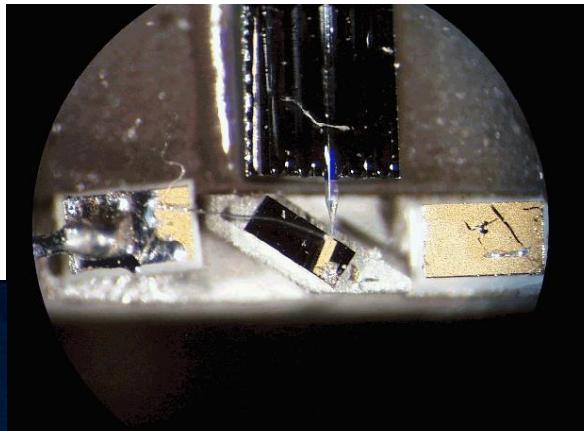
LASERs

- Utilizando uma cavidade ressonante do tipo Fabry-Perot conseguem-se todas as funções enumeradas:



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

LASERs



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Propriedades dos lasers

Lasers são diferentes devido

- Monocromaticidade (quão pura é a cor (frequência ou comprimento de onda) do raio laser ou, quão estreita é a largura de banda da frequência do raio laser)
 - Consiste essencialmente num comprimento de onda
 - Simples lâmpada emite luz que contém vários comprimentos de onda
- Coerência
 - As ondas da radiação laser estão em fase umas com as outras
 - Ondas de luz a partir de uma lâmpada são uma mistura de frequências e comprimentos de onda e não estão em fase umas com as outras
- Direcionalidade
 - Saída da luz dum laser é altamente direcionada
 - Ao contrário de uma lâmpada incandescente que irradia de forma multi-direcional, a energia laser diverge muito devagar e é concentrada num cone estreito que propaga-se numa só direção
- Modos de operação
 - Único pulso
 - Pulso repetitivo: múltiplos pulsos emitidos
 - Onda contínua: saída continua por um período igual ou superior a 0.25 s.

$$\ell_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

$$\ell_t = \frac{r\lambda}{s}$$

coerência transversal (ou espacial)

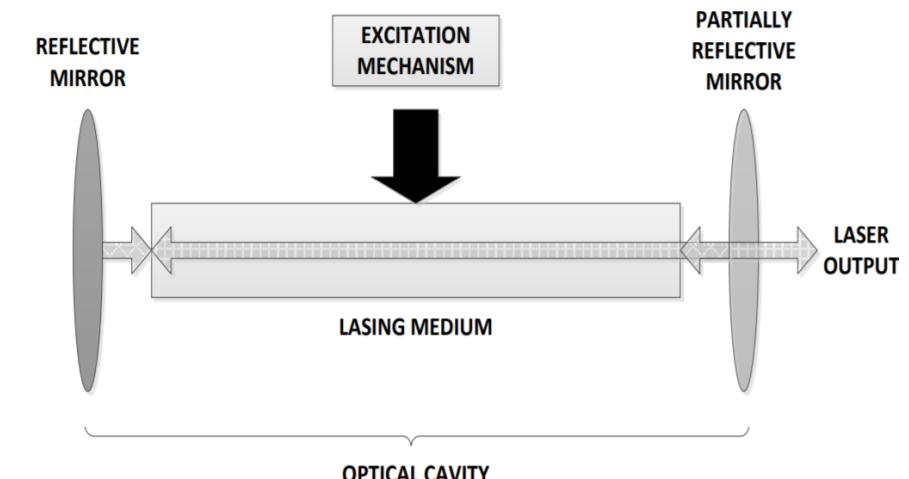
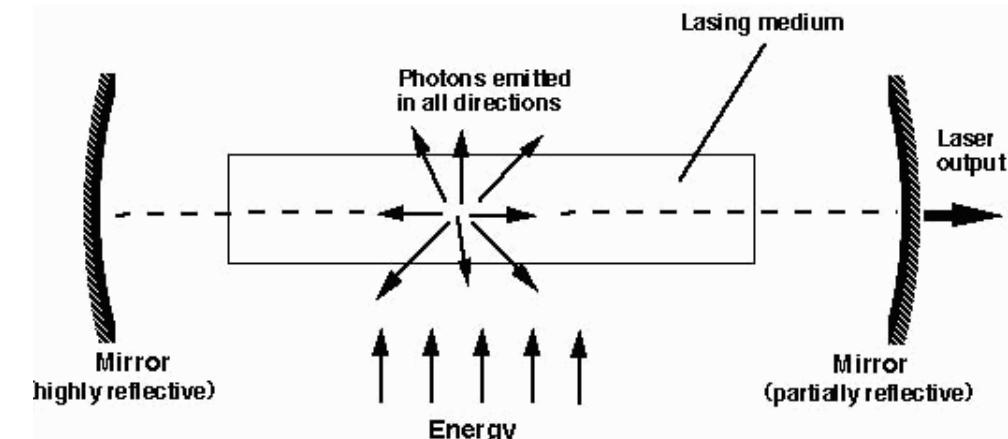
$\Delta\lambda$: largura de banda do laser
 r : distância do feixe à origem
 s : diâmetro da fonte laser

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

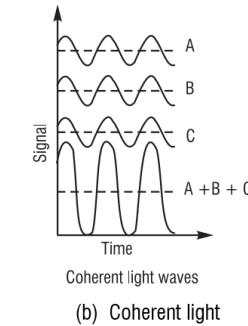
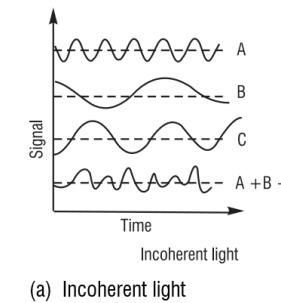
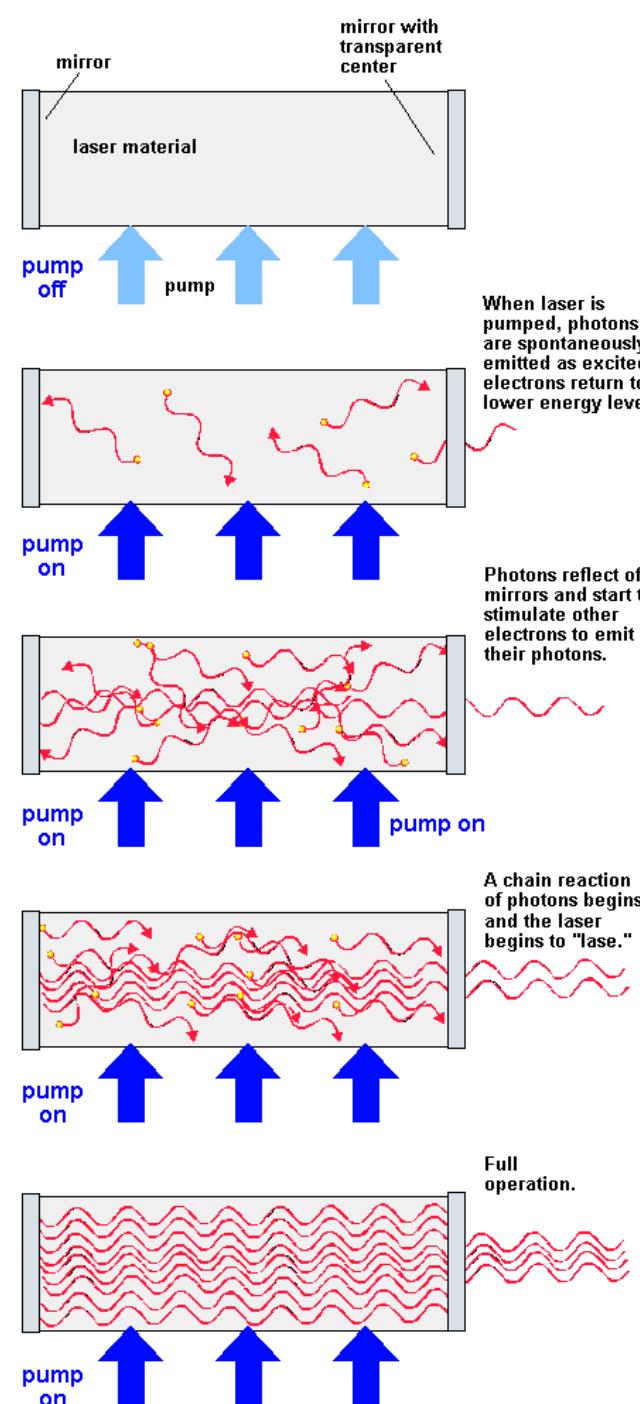
Fundamentos dos lasers

Um laser típico é composto por 3 elementos fundamentais:

- Meio de laser
 - Pode ser sólido, líquido ou gasoso que emite radiação quando excitado
 - fator que determina o comprimento de onda do sistema laser
- Mecanismo de excitação - bombeamento
 - A fonte de energia usada para excitar o meio para o lasing
 - fonte de potência, lampada flash ou energia de outro laser
- Cavidade ótica
 - Consiste em espelhos que atuam como mecanismo de feedback para amplificação da luz



Luz emergentes para captação, armazenamento e armazenamento



- Primeiro temos de ter os componentes todos corretos e o bombeamento a off
- Quando ligamos a nossa fonte de energia, o laser é bombeado, e fotões são espontaneamente emitidos á medida que os eletrões retornam a níveis de energia mais baixos
- Ao mesmo tempo os fotões são refletidos nos espelhos e começa a estimular outros eletrões para emitir os seus fotões
- Uma reação em cadeia de fotões começa e a acção laser ou lasing é obtida
- Conseguindo isso a operação é completa, produzindo luz coerente, com todas as ondas alinhadas em fase

https://www.youtube.com/watch?v=yQ0IMSNuj_o

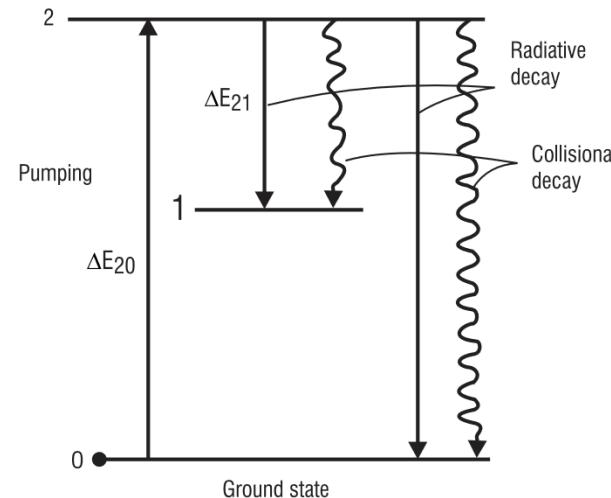
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Meio de ganho

Lasers são produzidos como resultado de eletrões saltando de um nível de energia excitado dentro de uma espécie irradiando para um nível de energia mais baixo

Essas espécies radiantes podem incluir:

- **átomos** como no laser de hélio-néon (HeNe) vermelho, iões de Ar no visível e ultravioleta e laser de hélio-cádmio (HeCd) e os lasers de vapor de cobre verde e amarelo (CVL);
- **moléculas** como no laser de dióxido de carbono no infravermelho (CO₂), lasers de excímero ultravioleta como ArF e KrF e o laser de N₂ pulsado;
- **líquidos** como os que envolvem várias moléculas de corante orgânico dissolvidos diluidamente em várias soluções solventes;
- **sólidos dielétricos** tais como aqueles que envolvem átomos de neodímio dopados em YAG ou vidro para produzir os lasers cristalinos de Nd:YAG ou Nd:vidro;
- **materiais semicondutores**, como cristais de arseneto de gálio ou fosfeto de índio ou várias misturas de impurezas misturadas com essas e outras espécies de semicondutores.



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Meio de ganho

Os eletrões são movidos para níveis mais altos (excitados)

- por meio de vários processos de bombeamento
- decaem de volta aos níveis inferiores dentro de um período de tempo - vida útil do nível (τ)
 - finalmente, encontram caminho de volta ao estado fundamental quando a fonte de bombeamento é removida
- Cada nível tem uma vida útil específica τ sobre a qual permanecerá nesse nível antes de decair para um nível mais baixo.
 - Esse tempo de vida é determinado pelas interações do eletrão com os outros eletrões e núcleos desse átomo.
- A vida útil típica dos eletrões que residem em níveis específicos - ordem de 10 a 100 ns.
- o tempo que um átomo ou molécula permanece no estado excitado é crítico para estabelecer se a emissão será estimulada ou espontânea
 - **exigência crítica:** para a ação laser o estado excitado tenha um tempo de vida longo: estados metaestáveis – tempo de vida \sim us a ms (tempo longo útil para produzir quant. QB de emissão estimulada).

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Meio de ganho

Tem vida útil (τ) infinita

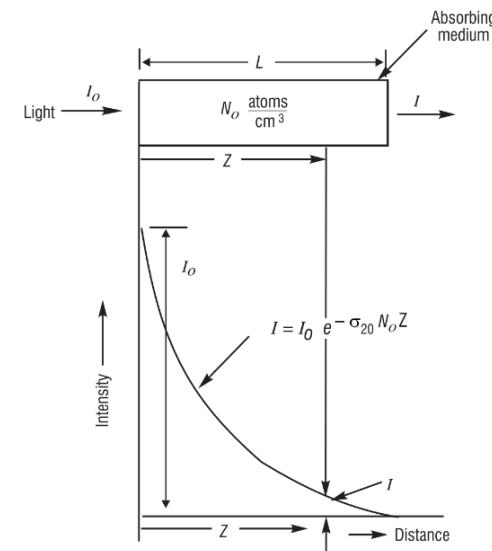
- É claro que o estado fundamental não pode decair mais...
 - O fotão irradiado durante a emissão espontânea tem o comprimento de onda exato λ_{21} e a frequência v_{21} correspondentes à diferença de energia ΔE_{21} das duas energias envolvidas
- Quando um grande grupo de átomos é irradiado com luz, a maioria desses átomos está no nível de energia do estado fundamental.
- Se os fotões da luz incidente tiverem a energia ΔE_{20}
- A luz será absorvida - a variação da intensidade I com a distância L no material

$$E_{21} = h\nu_{21} = \frac{hc}{\lambda_{21}}$$

$$I = I_0 e^{-\sigma_{20} N_0 L}$$

I_0 é a intensidade do feixe quando atinge os átomos pela primeira vez;
 σ_{20} : seção transversal para absorção ou emissão desses dois níveis;
 N_0 : densidade populacional de átomos que residem no nível 0 (número de átomos por unidade de volume).

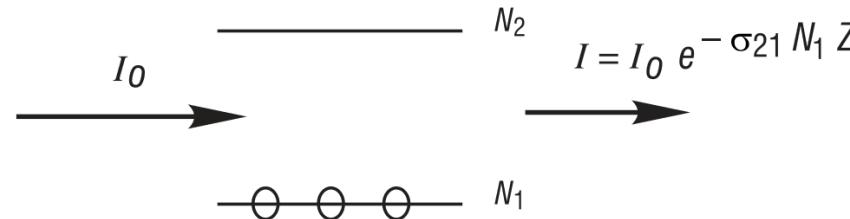
A quantidade de absorção do feixe depende da densidade de átomos que residem no nível 0 e do comprimento ou espessura do meio que compreende esses átomos.



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

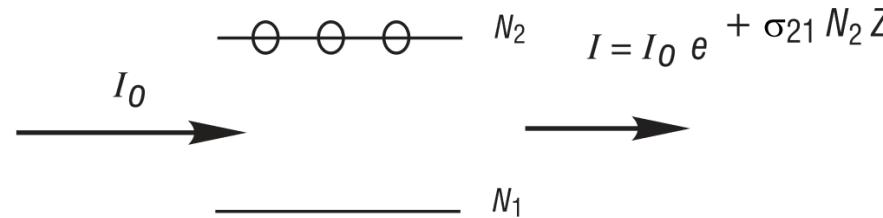
- A absorção descrita atrás poderia ter sido aplicada igualmente se a população existisse inicialmente no nível 1, e a luz de energia ΔE_{21} e o comprimento de onda λ_{21} seriam absorvidos pelo meio de acordo com a seguinte equação

$$I = I_0 e^{-\sigma_{21} N_1 L}$$



Uma vez que a absorção é um processo simétrico da emissão estimulada, apenas o sinal muda para a produção de fotões:

$$I = I_0 e^{+\sigma_{21} N_2 L}$$



Se a população for permitida estar nos dois níveis (1 e 2, por exemplo), teremos os dois processos combinados dado por:

$$I = I_0 e^{+\sigma_{21}(N_2 - N_1)L}$$

Para termos ganho ou amplificação, teremos de ter:

$$\frac{N_2}{N_1} > 1$$

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Meio de ganho

Type of Laser	$\lambda_{21}(\text{nm})$	$\Delta\nu_{21}(\text{Hz})$	$\sigma_{21}(\text{cm}^2)$
HeNe	632.8	2×10^9	3×10^{-13}
Argon	488.0	2×10^9	2.5×10^{-12}
HeCd	441.6	2×10^9	9×10^{-14}
Copper Vapor	510.5	2×10^9	8×10^{-14}
CO ₂	10,600	6×10^7	3×10^{-18}
Excimer	248.0	1×10^{13}	2.6×10^{-16}
Dye (Rh6-G)	577	5×10^{13}	2×10^{-16}
Ruby	694.3	3×10^{11}	2.5×10^{-20}
Nd:YAG	1064.1	1.2×10^{11}	6.5×10^{-19}
Ti:Al ₂ O ₃	760	1.5×10^{14}	3.4×10^{-19}
Semiconductor	800	1×10^{14}	1×10^{-15}

- O coeficiente de ganho de sinal:

$$g_{21} = \sigma_{21} \Delta N_{21}$$

$$g_{21} - \alpha_i$$

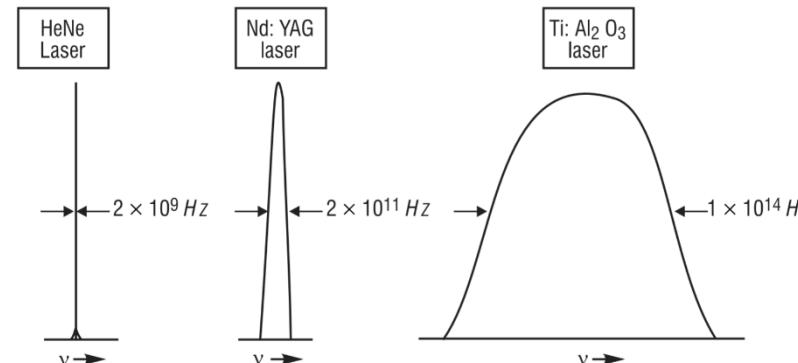
α_i é o coeficiente de absorção do material, incluindo perdas por difração e absorção do material ou meio

- E as equações anteriores podem ser escritas como:

$$I = I_0 e^{g_{21} L}$$

Largura de banda do meio de ganho do laser: determina a faixa de comprimentos de onda sobre a qual a amplificação pode ocorrer para qq laser específico. Essa largura de banda é expressa numa faixa de comprimento de onda $\Delta\lambda_G$ ou em uma faixa de frequência $\Delta\nu_G$.

$$\Delta\lambda_G = \frac{\lambda^2}{c} \Delta\nu_G$$



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Saturação

- A potência de saturação de um meio de ganho é a potência óptica de um sinal de entrada que, no estado estacionário, leva a uma redução no ganho para metade do seu valor de sinal.
- A intensidade de saturação é a intensidade óptica correspondente, ie, a potência de saturação por unidade de área.
- Normalmente, assume-se que o ganho é pequeno: as potências de entrada e saída são semelhantes.
- Intensidade de saturação podem ser calculadas de acordo com

$$I_{sat} = \frac{hv}{\sigma\tau} = \frac{hc}{\sigma\tau\lambda}$$

onde h v é a energia do fotão no comprimento de onda do sinal, σ é a seção transversal para absorção ou emissão entre níveis ou coeficiente de transição transversal do material no comprimento de onda de emissão, τ é a vida útil do estado superior.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Saturação

Type of Laser	$\lambda_{21}(\text{nm})$	$\Delta\nu_{21}(\text{Hz})$	$\sigma_{21}(\text{cm}^2)$	$\Delta N_{21}(\text{cm}^{-3})$	$g_{21}(\text{cm}^{-1})$	$I_{\text{sat}}(\text{W/cm}^2)$
HeNe	632.8	2×10^9	3×10^{-13}	7×10^9	2×10^{-3}	6.2
Argon	488.0	2×10^9	2.5×10^{-12}	1×10^{15}	5×10^{-3}	16.3
HeCd	441.6	2×10^9	9×10^{-14}	4×10^{12}	3×10^{-3}	7.1
Copper Vapor	510.5	2×10^9	8×10^{-14}	6×10^{13}	5×10^{-2}	9.0
CO ₂	10,600	6×10^7	3×10^{-18}	5×10^{15}	8×10^{-3}	1.6×10^{-2}
Excimer	248.0	1×10^{13}	2.6×10^{-16}	1×10^{16}	2.6×10^{-2}	3.4×10^5
Dye (Rh6-G)	577	5×10^{13}	2×10^{-16}	2×10^{18}	2.4	3.4×10^9
Ruby	694.3	3×10^{11}	2.5×10^{-20}	4×10^{19}	1.0	3.8×10^7
Nd:YAG	1064.1	1.2×10^{11}	6.5×10^{-19}	3×10^{19}	2.0	1.2×10^7
Ti:Al ₂ O ₃	760	1.5×10^{14}	3.4×10^{-19}	3×10^{18}	1.0	2.0×10^9
Semiconductor	800	1×10^{14}	1×10^{-15}	1×10^{18}	10^3	2.5×10^9

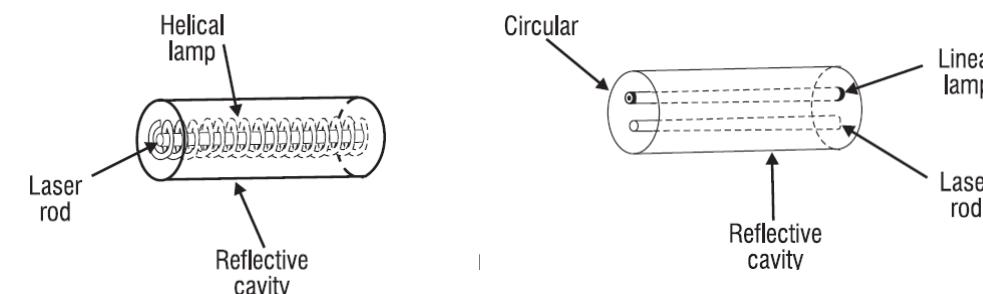
$$I_{\text{sat}} = \frac{h\nu}{\sigma\tau} = \frac{hc}{\sigma\tau\lambda}$$

Material	Wavelengths (μm)	Laser transitions	Lifetime (μs)
Transition Metals			
Cr:BeAl ₂ O ₄ (alexandrite)	0.70 – 0.82	${}^2T_1 \rightarrow {}^4A_2$	260
Ti:Al ₂ O ₃ (Ti-sapphire)	0.66 – 1.18	${}^2E \rightarrow {}^2T_2$	3
Cr:LiCaAlF ₆ (LiCAF)	0.72 – 0.84	${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$	170
Cr:LiSrAlF ₆ (LiSAF)	0.78 – 0.92	${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$	67
Cr:Mg ₂ SiO ₄ (fosterite)	1.17 – 1.35	${}^3T_2 \rightarrow {}^3A_2$	3
Co:MgF ₂ (Co mag fluoride)	1.63 – 2.45	${}^4T_2 \rightarrow {}^4T_1$	60
Lanthanides			
Nd:YAG	0.946, 1.064, 1.338	${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}, {}^4I_{11/2}, {}^4I_{13/2}$	240
Ho:YAG	2.1	${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	8500
	3.0	${}^5I_6 \rightarrow {}^5I_7$	47
Er:YAG	0.86, 1.23, 1.73	${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}, {}^4I_{11/2}, {}^4I_{9/2}$	120
	1.63	${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	9100
	2.94	${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	90
Tm:YAG	1.47, 2.3	${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4, {}^3H_5$	500
	1.94	${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$	14500
Yb:YAG	1.03	${}^3F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	950

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Fonte de bombeamento

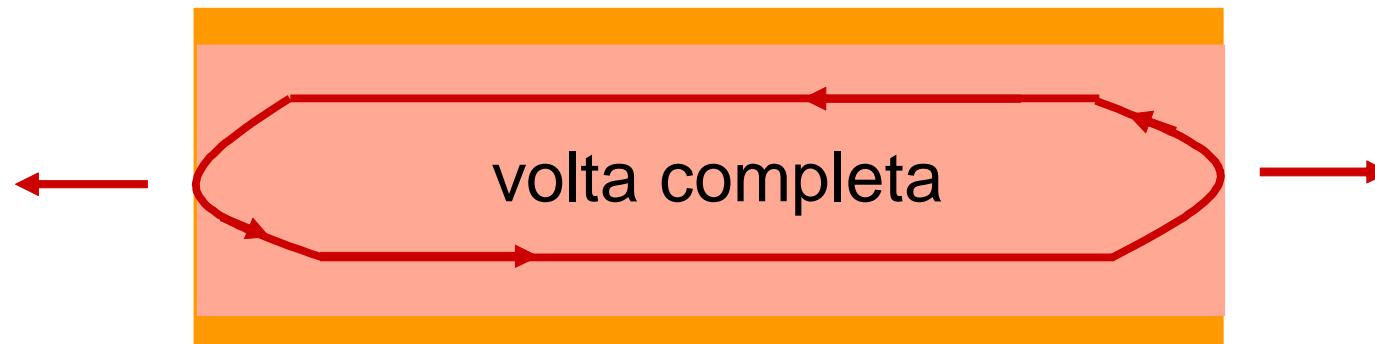
- Meios pelos quais a energia é transferida para o meio de ganho do laser para produzir a inversão populacional necessária ΔN_{21} . Essas fontes de bombeamento geralmente consistem em eletrões que circulam dentro do meio ou na luz sendo absorvida pelo meio
 - **Bombeamento de eletrões** – é usado principalmente em meios de ganho gasosos ou semicondutores.
 - **Bombeamento ótico** – aplica-se ao bombeamento de lasers líquidos (corantes) e a lasers dielétricos de estado sólido e é fornecido por lâmpadas de flash ou outros lasers. Os tipos mais comuns de lâmpadas de flash usadas para bombear lasers são tubos estreitos e cilíndricos de quartzo com elétrodos de metal montados nas extremidades, preenchidos com espécies gasosas como o xénon, que serve como material radiante dentro da lâmpada.
 - Preenchimento de níveis excitados de átomos dentro do gás que irradiam e produzem intensa emissão de luz



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

LASERS

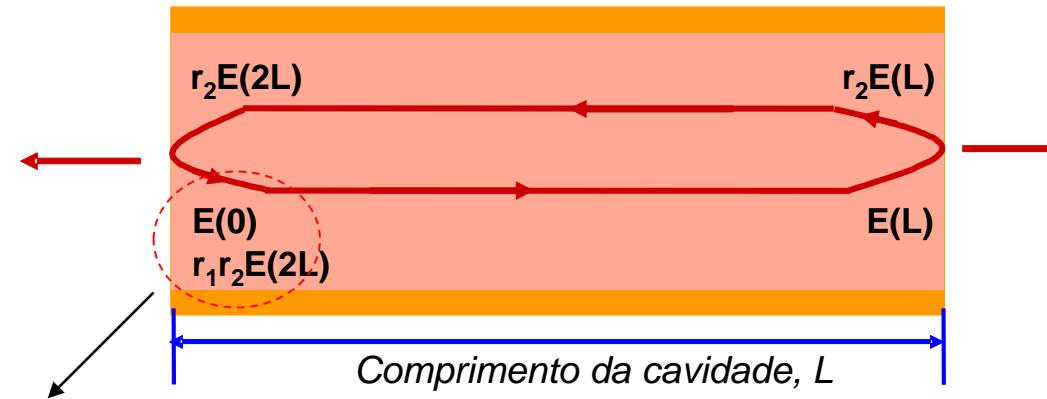
- Para garantir um estado de oscilação estável na cavidade, associado a emissão estimulada, deve-se garantir duas condições:
 - **Condição de fase:** campo eléctrico do sinal ótico, após completar uma volta completa dentro da cavidade, deve ter a mesma fase
 - **Condição de ganho:** campo elétrico do sinal ótico, após completar uma volta completa dentro da cavidade, deve ter a mesma amplitude



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

LASERS

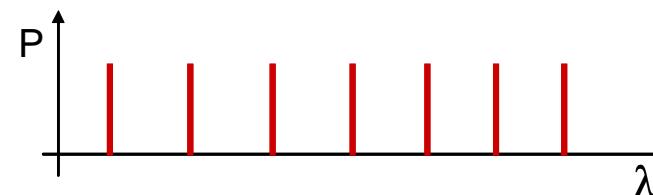
- Condição de fase:



A fase associada a $2L$ deve ser $m2\pi$, $m=0,\pm 1, \dots$

$$\beta 2L = (n2\pi/\lambda)2L = n4\pi L/\lambda \quad \lambda - \text{comp. de onda no vazio}, n - \text{índice de refracção do material}$$

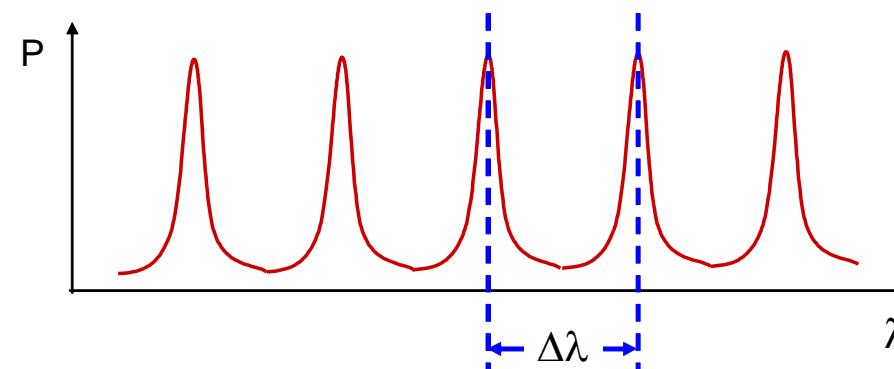
Cavidade ressonante – conjunto discreto de linhas espectrais



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

LASERs

- Condição de fase: Os modos discretos que podem ser suportados pela cavidade designam-se por modos longitudinais



$$\text{Condição de fase: } \frac{2nL}{\lambda} = m \quad f = mc/(2nL)$$

Logo

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad \Delta f = c/(2nL)$$

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

LASERS

- Condição de ganho

Condição de ganho: $E(t,0) = E(t,2L)$

$$E(t,0) = A \exp(j\omega t) \quad \& \quad E(t, 2L) = Ar_1r_2\exp[2L(g-\alpha_i)]\exp[j(\omega t-2\beta L)]$$

Para satisfazer a condição de ganho: $r_1r_2\exp[(g-\alpha_i)2L] = 1$ α_i é o coeficiente de absorção do material

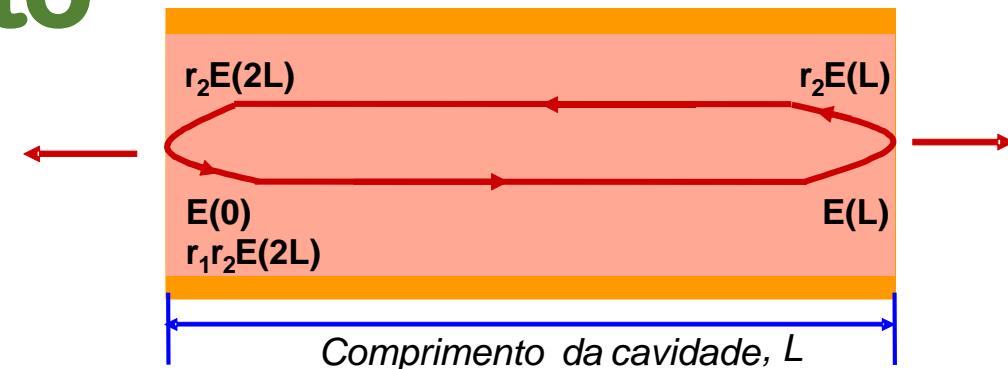
O limiar do ganho: $g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_1r_2}$

Ou seja, o laser só poderá oscilar numa gama de frequências em que o **ganho do material** (associado a emissão estimulada) **é suficiente para compensar as perdas por absorção e outras perdas** (no espelho, dispersão no material, processos não-radiativos)

Para uma cavidade laser mais complexa, na qual os espelhos têm diferentes refletividades R_1 e R_2 , e a_1 e a_2 representam outras perdas dentro da cavidade (além do amplificador), a expressão para o ganho limiar é dada como:

a_1 e a_2 ou r_1 e r_2

$$g = \frac{1}{2L} \ln \left[\frac{1}{R_1 R_2 (1-a_1)(1-a_2)} \right] + \alpha$$



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

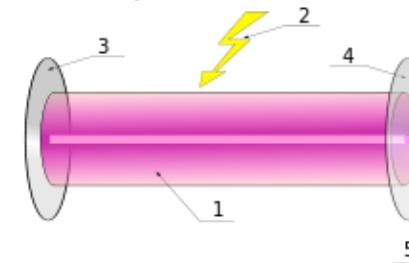
Exercício 8!!!

- a) Considere um laser HeNe com $L = 0.2$ m, no qual as refletividades do espelho possam ser $R_1 = 99,9\%$ e $R_2 = 99\%$ e as perdas de cavidade sejam $a_1 = a_2 = 0,2\%$ e $\alpha_i = 0$. Para essa situação, calcule ganho limiar que seria necessário para operar o laser.



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

LASERS



- A energia útil do laser é obtida localizando um espelho de "saída" de transmissão parcial numa extremidade do amplificador, de modo que parte do feixe saia da cavidade do espelho
- O coeficiente de ganho inicial no amplificador deve ser maior que a perda do espelho transmissor (mais outras perdas de espelho e cavidade) ou o feixe não se desenvolverá conforme descrito em:
$$g_{21} = \sigma_{21}\Delta N_{21}$$

$$I = I_0 e^{g_{21}L}$$
- Transmissão óptima do espelho T_{opt} em termos do coeficiente de ganho de sinal g , do comprimento real do amplificador L e da perda de absorção a (média de uma passagem única de um espelho para o outro) pode ser expressa como:

$$T_{opt} = (gL a)^{1/2} - a$$

- A intensidade de saída I_{max} do feixe de laser emitida pelo espelho de saída também pode ser estimada em termos da intensidade de saturação I_{sat} , T_{opt} e a absorção média por passagem:

$$I_{max} = \left(\frac{T_{opt}^2}{2a} \right) I_{sat}$$

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Exercício 9!!!

Um tubo de laser pulsado Nd:YAG de comprimento 10 cm e diâmetro de 8 mm é bombeado por uma lâmpada flash e é medido para ter um ganho na razão I/I_0 de 5 num comprimento de onda 1.064 μm. A duração do bombeamento e o pulso é de 240 us. O tubo tem perdas por espalhamento de 0.5%. Qual deveria ser a transmissão ótima para um espelho de saída se o espelho altamente reflector é usado num dos lados da cavidade? E qual seria a potência de saída com essa combinação? Assume que o laser tem o mesmo diâmetro do tubo de laser. (R: $8.47 \times 10^{-2} /m$; 865W)



Type of Laser	$\lambda_{21}(\text{nm})$	$\Delta\nu_{21}(\text{Hz})$	$\sigma_{21}(\text{cm}^2)$
HeNe	632.8	2×10^9	3×10^{-13}
Argon	488.0	2×10^9	2.5×10^{-12}
HeCd	441.6	2×10^9	9×10^{-14}
Copper Vapor	510.5	2×10^9	8×10^{-14}
CO_2	10,600	6×10^7	3×10^{-18}
Excimer	248.0	1×10^{13}	2.6×10^{-16}
Dye (Rh6-G)	577	5×10^{13}	2×10^{-16}
Ruby	694.3	3×10^{11}	2.5×10^{-20}
Nd:YAG	1064.1	1.2×10^{11}	6.5×10^{-19}
$\text{Ti}: \text{Al}_2\text{O}_3$	760	1.5×10^{14}	3.4×10^{-19}
Semiconductor	800	1×10^{14}	1×10^{-15}

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Exercício 10!!!

- a) Um laser de Ar a operar a 488 nm com um região de ganho de 0.3 m é determinado para ter uma densidade de população de $1 \times 10^{16} / \text{m}^3$ no nível superior e $6 \times 10^{15} / \text{m}^3$ no nível menos excitado. Se uma prova de feixe de intensidade I_0 é transmitido num meio de ganho então qual será a razão I/I_0 onde I é a intensidade de saída do feixe depois de atravessar o meio? (R: 1.35)
- b) Qual é o coeficiente de ganho do laser em a)? (R:1/m)
- c) Qual deveria ser o ganho limiar da a) se os espelhos tivessem refletividades de 99.9% e 95% e se as perdas por espalhamento de 0.5%? Assuma que o coeficiente de absorção do material dentro do meio de ganho é nula) (R:0.1039/m)



Type of Laser	$\lambda_{21}(\text{nm})$	$\Delta\nu_{21}(\text{Hz})$	$\sigma_{21}(\text{cm}^2)$
HeNe	632.8	2×10^9	3×10^{-13}
Argon	488.0	2×10^9	2.5×10^{-12}
HeCd	441.6	2×10^9	9×10^{-14}
Copper Vapor	510.5	2×10^9	8×10^{-14}
CO ₂	10,600	6×10^7	3×10^{-18}
Excimer	248.0	1×10^{13}	2.6×10^{-16}
Dye (Rh6-G)	577	5×10^{13}	2×10^{-16}
Ruby	694.3	3×10^{11}	2.5×10^{-20}
Nd:YAG	1064.1	1.2×10^{11}	6.5×10^{-19}
Ti:Al ₂ O ₃	760	1.5×10^{14}	3.4×10^{-19}
Semiconductor	800	1×10^{14}	1×10^{-15}

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Modos longitudinais da cavidade

- Quando o feixe viaja para frente e para trás, certos comprimentos de onda dentro da largura de banda de ganho do laser tendem a ser mais “aprimorados” que outros.
 - Estes são comprimentos de onda (ou frequências) em que o feixe de luz na cavidade forma uma onda estacionária.

Normalmente, haverá várias centenas de milhares de picos de ondas para cada onda estacionária que ocorre dentro da cavidade.

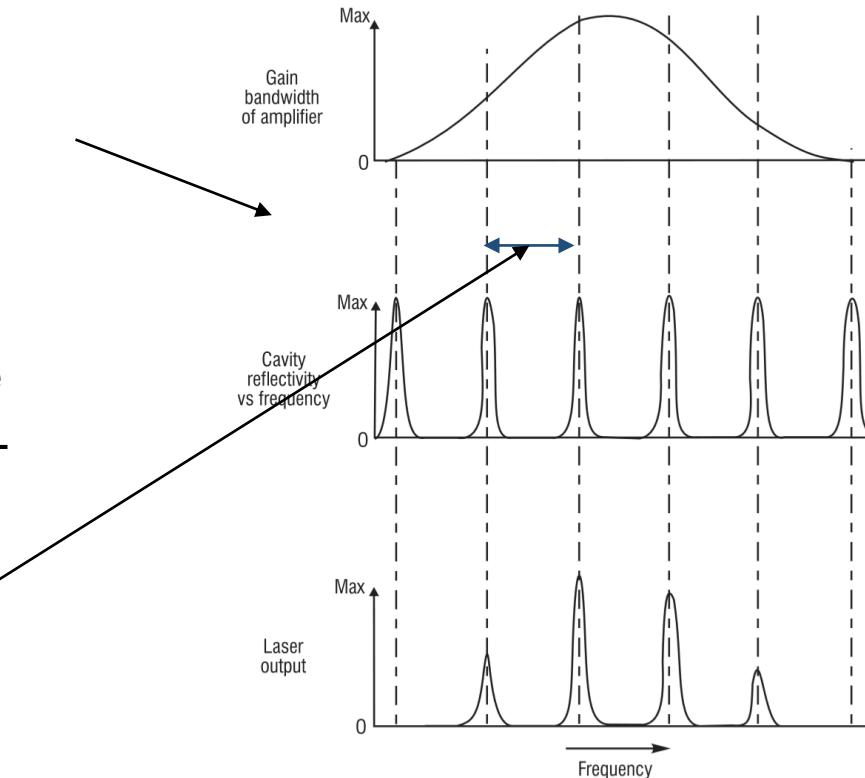
Se houver mais de uma onda estacionária, cada onda estacionária (modo longitudinal) será separada em frequência através da onda seguinte por uma quantidade fixa que depende do comprimento da cavidade do laser L (2 L para volta completa)

coerência longitudinal (ou temporal)



$$\ell_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

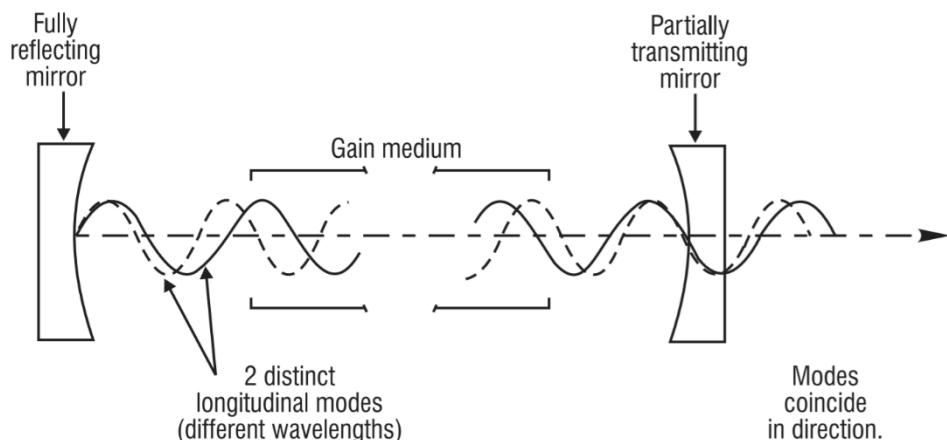
$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}$$



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Modos longitudinais

- Cada onda estacionária discreta é chamada de modo longitudinal associado à cavidade do laser.
- 2 desses modos dentro de uma cavidade (Figura abaixo)
 - Sempre haverá pelo menos um modo longitudinal e poderá haver muito mais, dependendo da frequência ou largura de banda do meio de ganho do laser.
- Se mais de um modo longitudinal estiver a ser gerado, eles serão indistinguíveis.
 - Todos eles viajam na mesma direção e sua cor será indistinguível porque seus comprimentos de onda (frequências) são muito semelhantes



Largura de frequência de um único modo longitudinal pode ser muito estreita, na faixa de 10^6 a 10^8 Hz

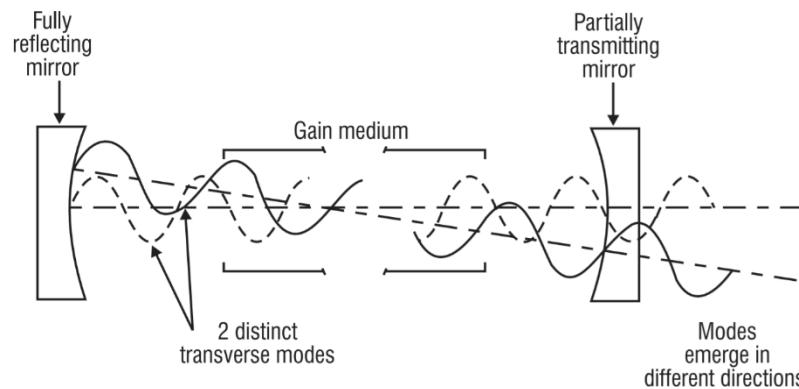
- refletividade do espelho (espelhos com alto reflexo produzem larguras de banda mais estreitas)
- estabilidade da cavidade (livre de vibrações)
 - Laser monomodo

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Modos transversais

Ao contrário, diferentes modos transversais envolvem caminhos óticos ligeiramente diferentes através do amplificador - têm direções ligeiramente diferentes quando emergem do laser

Devido aos diferentes comprimentos do caminho ótico, eles também têm frequências ligeiramente diferentes.



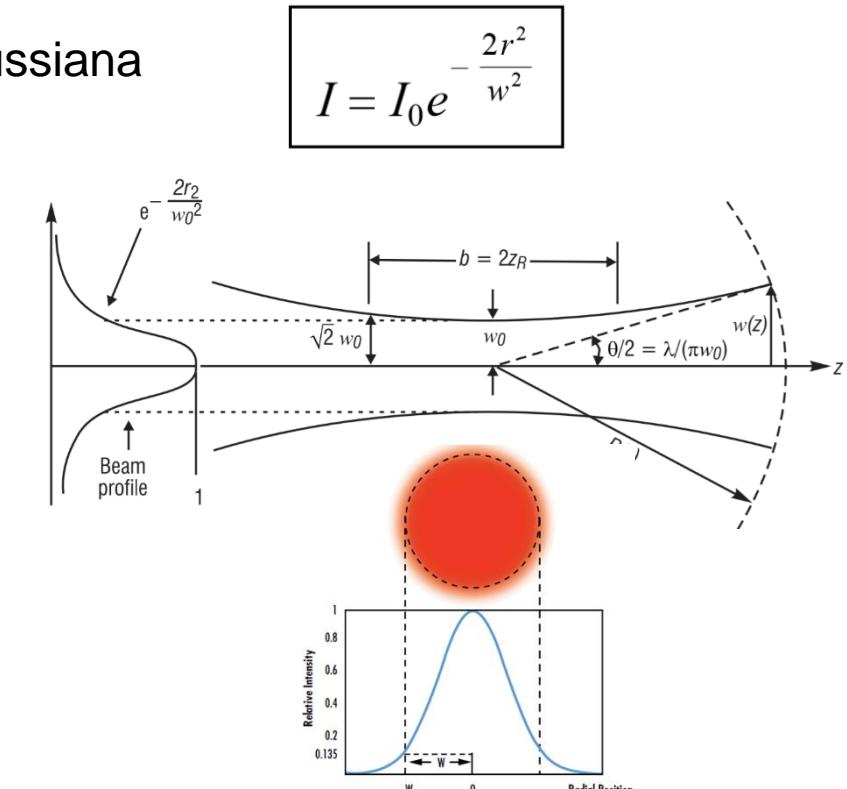
Cada um desses modos estáveis evolui porque a luz que viaja por esse caminho específico repete-se exatamente de uma ida e volta do feixe para o próximo, evoluindo, portanto, para um feixe constante: modo TEM00



modo desejado: propaga com a menor divergência de feixe

Função Gaussiana

$$I = I_0 e^{-\frac{2r^2}{w^2}}$$



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Cavidades para lasers

Uma variedade de arranjos de espelhos para laser pode ser considerada na construção de uma cavidade a laser

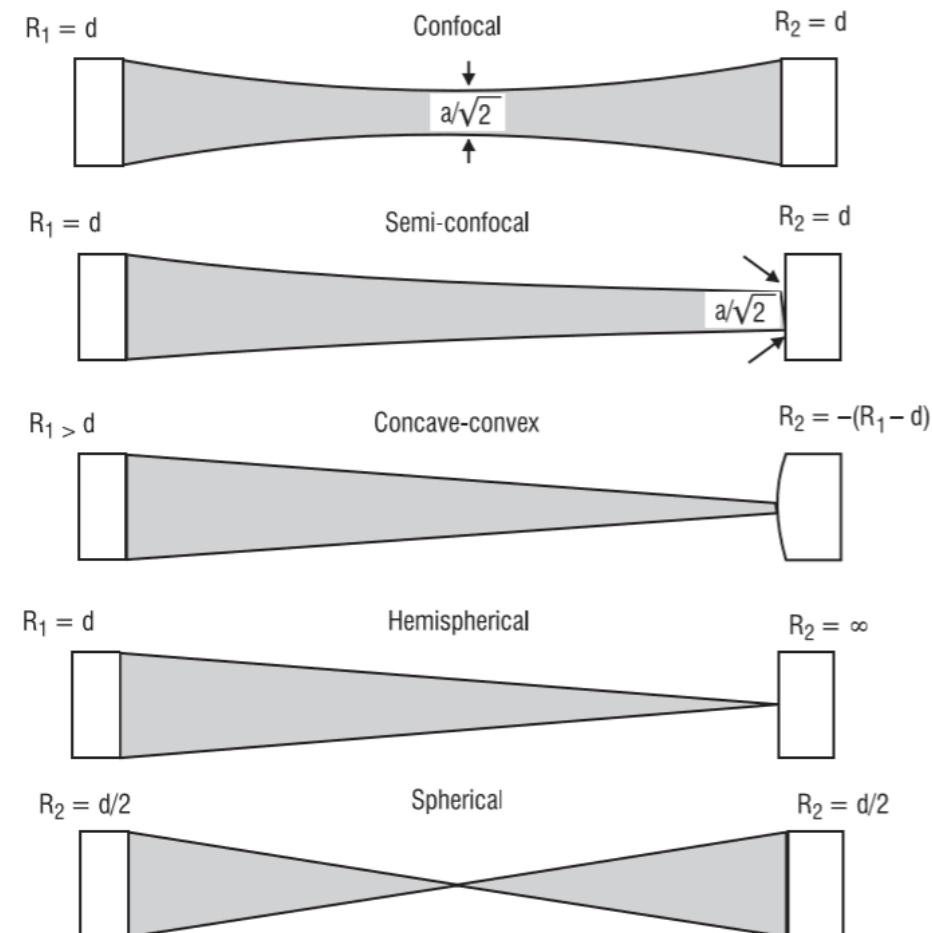
- os raios de curvatura do espelho são definidos em termos da distância de separação d entre os espelhos.

Nem todas essas cavidades permitem uma operação estável do laser

- Estável se refletido no eixo do amplificador.

Dentre as cavidades mostradas, as estáveis:

- a cavidade confocal, a cavidade semifocal e a cavidade côncava-convexa.



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

LASERs

- Em relação aos LEDs
 - Emissão estimulada – luz coerente
 - Maior coerência espacial (melhor acoplamento com fibra, ou em espaço livre)
 - Ganho → maior potência de saída
 - Maior largura de banda, devido ao menor tempo de recombinação dos portadores associado à emissão estimulada

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Tipos de Lasers

Integrated Absorption Modulators

Q-switching

Mode-locking and Self-pulsating lasers

Distributed Bragg Refractor (DBR)

Quantum Wells

Lasers Based on Fiber Rings

Tunable Distributed Bragg reflector

External Cavity DBR

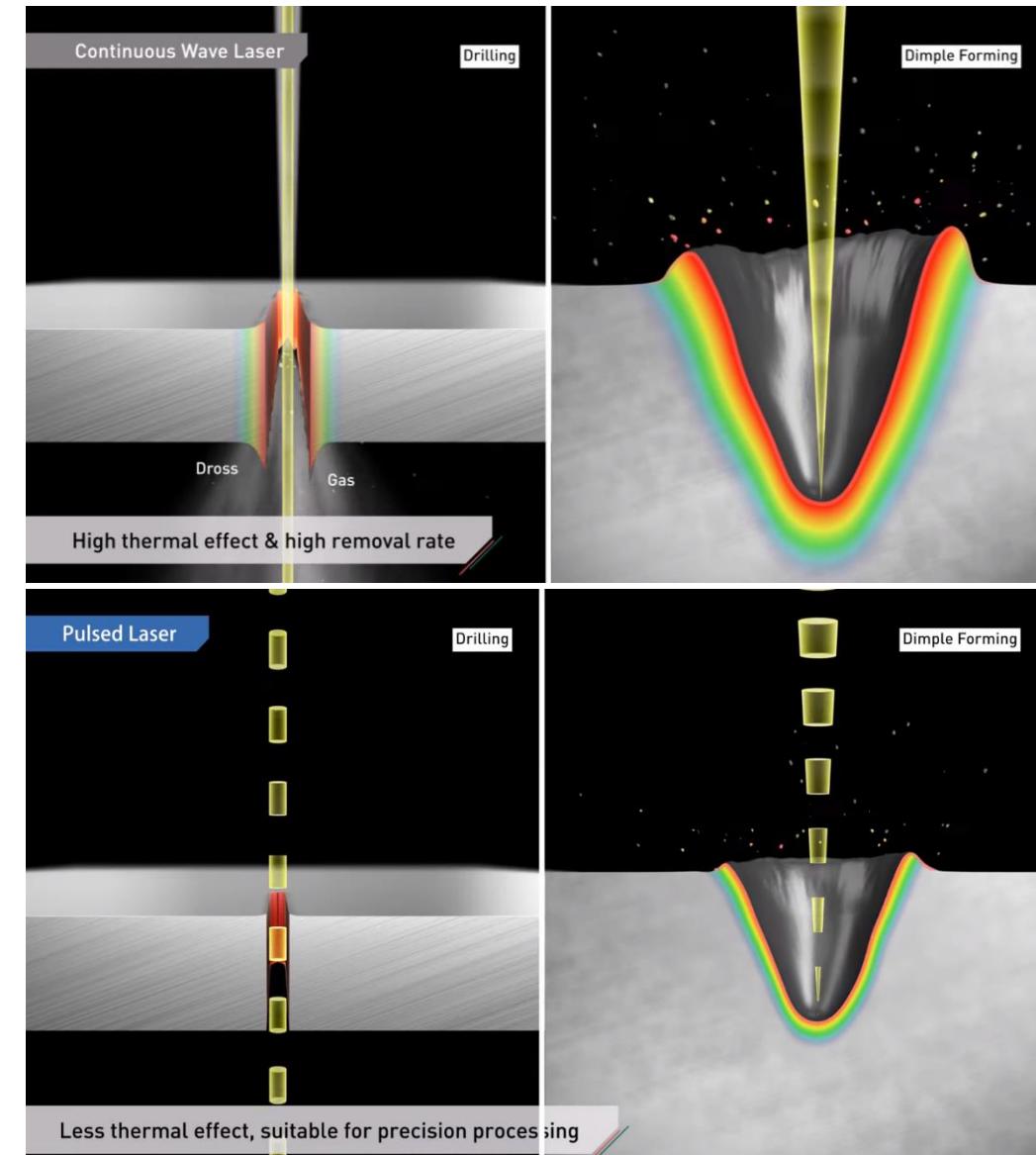
DBR with external fiber cavity

VCSEL's (Vertical Cavity Surface Emitting
Lasers)

Fiber Lasers

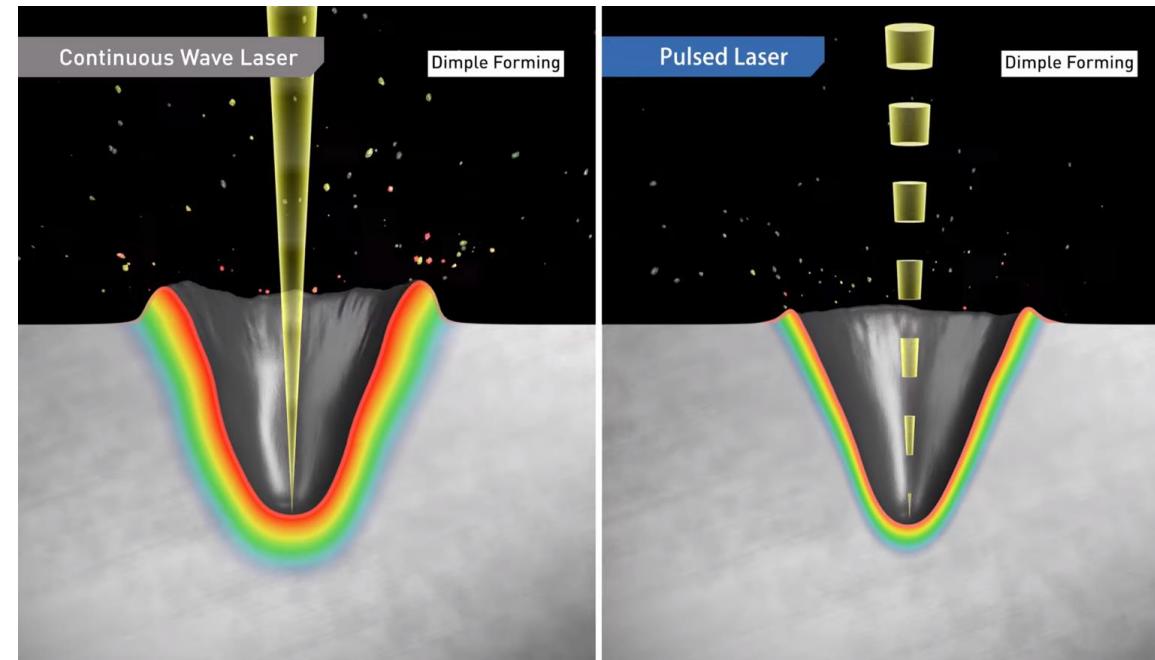
Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Micromachining by laser



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

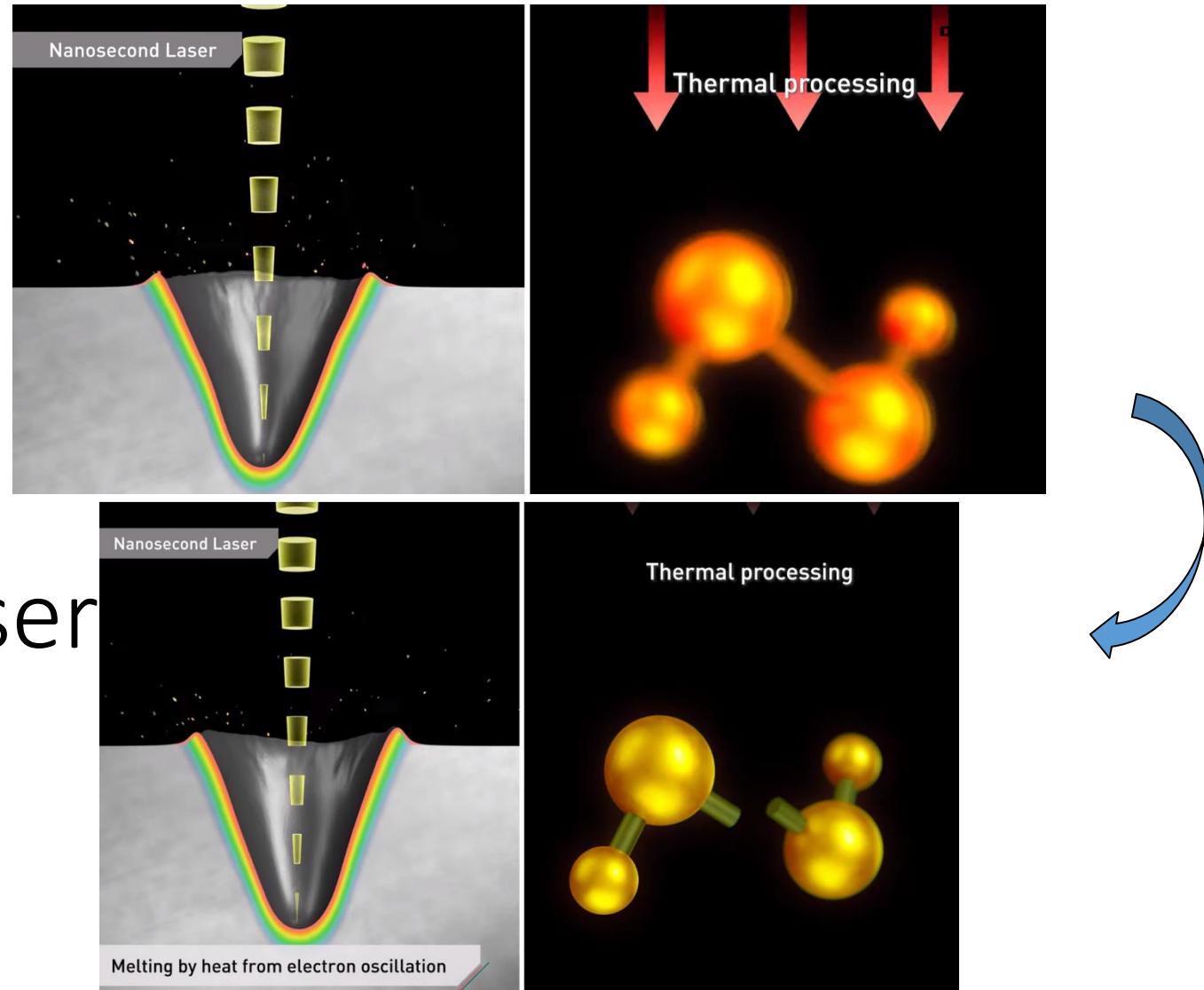
Micromachining by laser



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

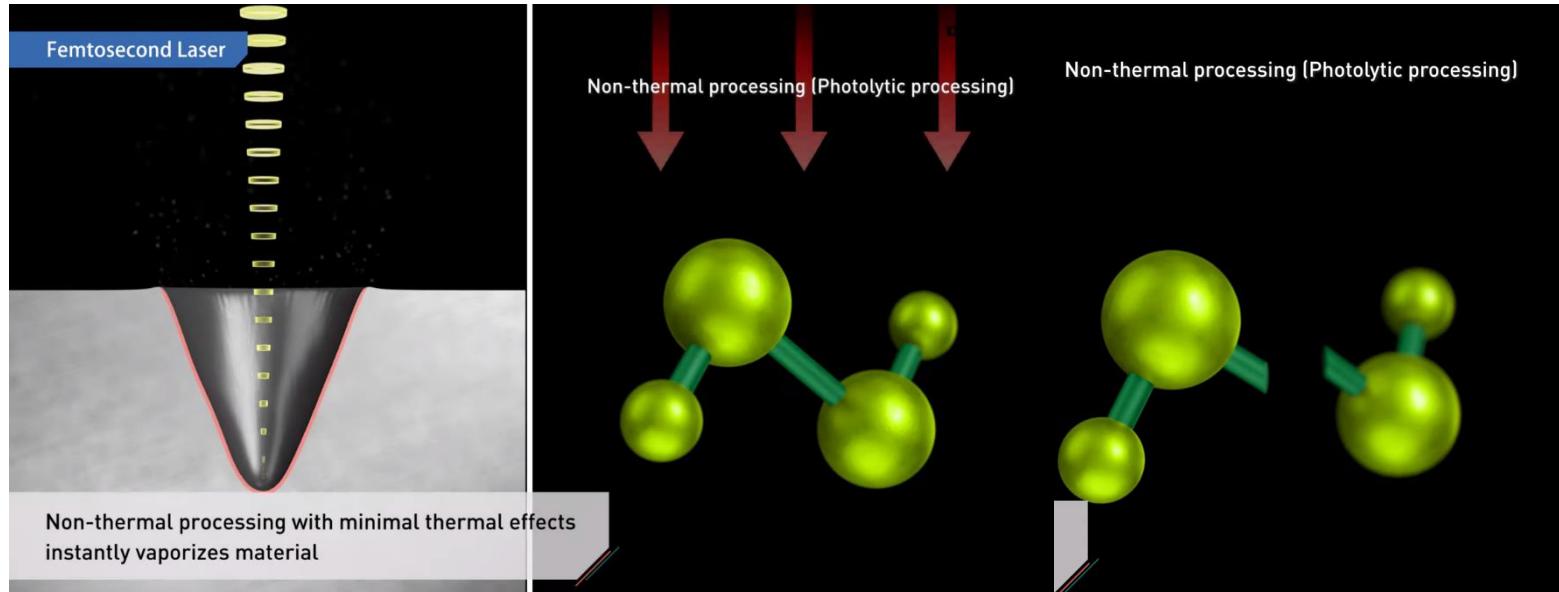
Micromachining by laser

Derretimento ou fusão a partir de oscilação eletrónica



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Micromachining by laser



Decomposition or dissociation of chemical compounds caused by light

O processo fotolítico é a dissociação ou dissociação de compostos químicos causados pela luz ou pela radiação

Tecnologias emergentes para conversão e armazenamento

Comparison

Nanosecond laser

Femtosecond laser

CW

Nano

Pico

Femto

Burr-free, high-quality processing

The optimal laser specifications for each customer

High-precision processing of hard-to-cut materials

Aluminum, die steel, iron, etc.

Cemented carbide, glass, ceramics, etc.

arbide

tools

Femtosecond Laser

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

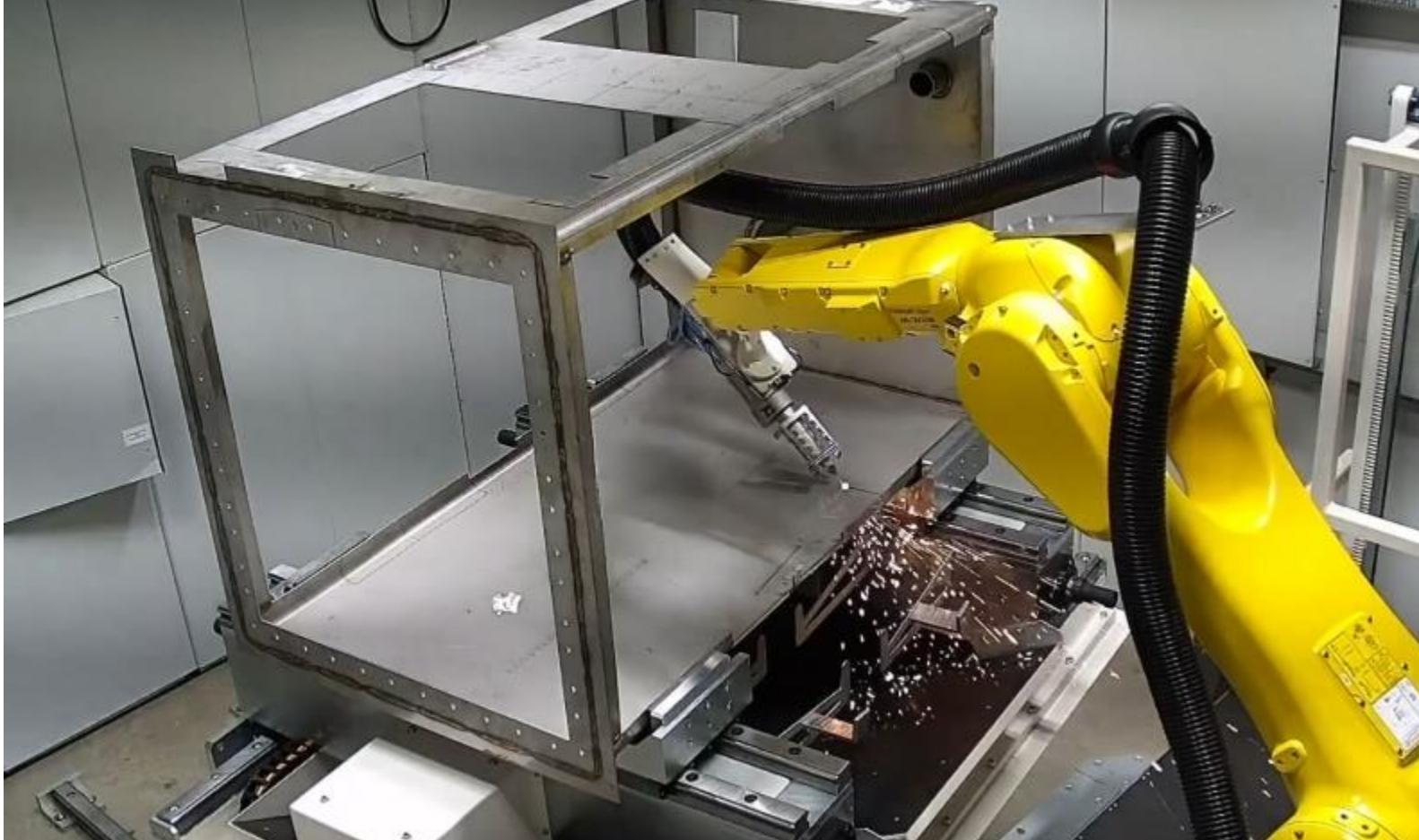
Ultrashort pulse Lasers



Cyan Tec has developed a bespoke flatbed solution for processing extra-large steel sheets: 12m long and 4m wide

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

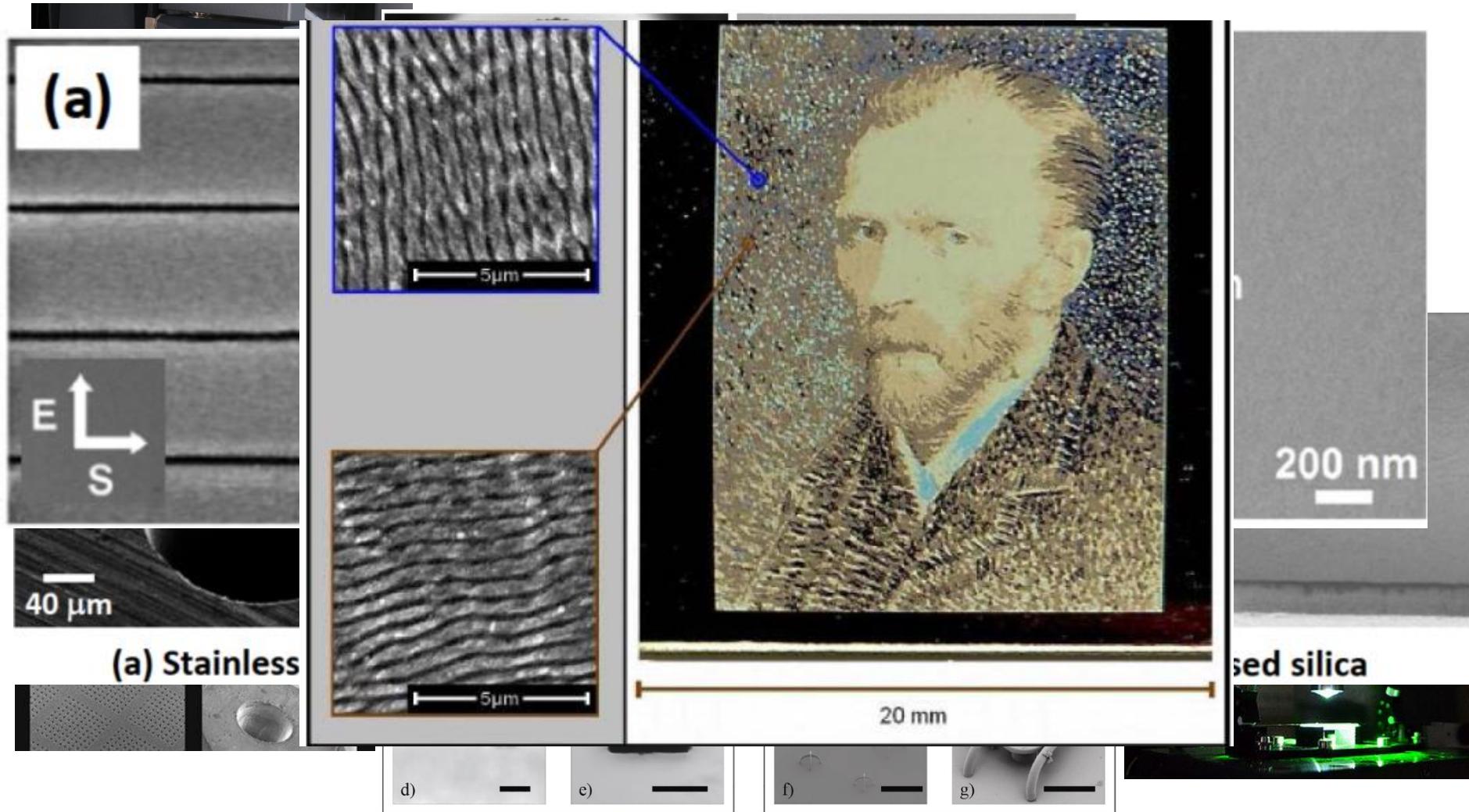
Ultrashort pulse Lasers



Robotics are frequently included as part of Cyan Tec's automated sheet metal processing solutions.

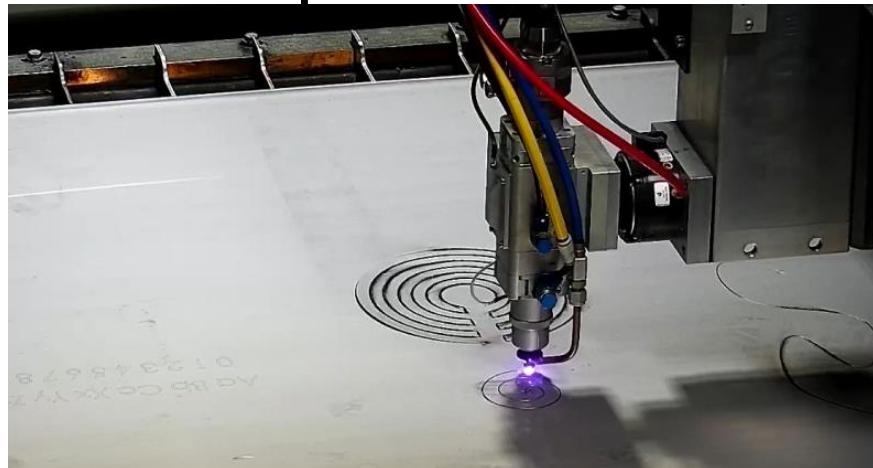
systems up to 20kW+ are available

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Ultrashort pulse Lasers

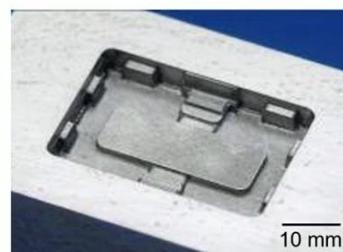


A fibre laser based sheet metal cutting application



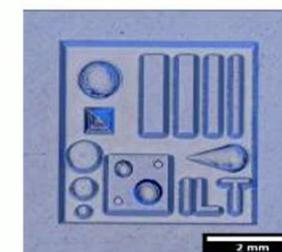
fs lasers are increasingly being used to mark medical devices: kidney dishes (left) and syringes (right) with anti-corrosive traceability codes and other key information.

Steel



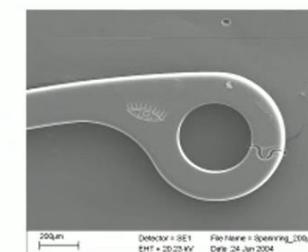
- Injection molds
- Molding tools
- Surface structuring to decrease wear

Ceramics



- Ceramic substrates for PCBs
- Ceramic micro parts
- PCD and sapphire tools

Polymers



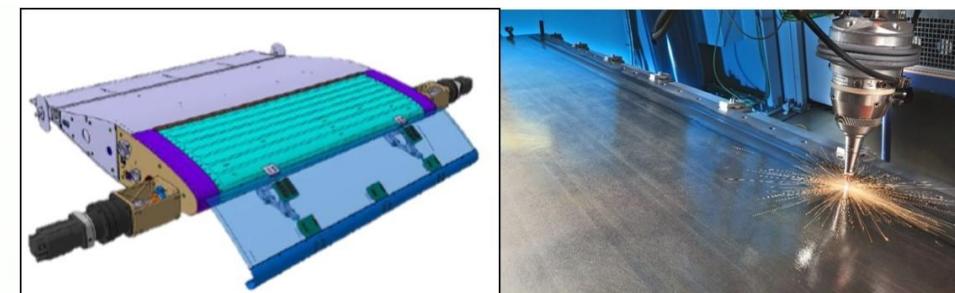
- Medical technology
- Micro fluidics
- Micro optics

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Ultrashort pulse Lasers

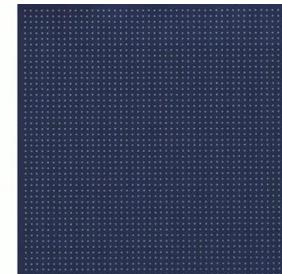
Aerospace: Eliminação do fluxo turbulento (**menos consumo de combustível**) por meio de furos a laser nas asas das aeronaves

Área larga de estrutura com radiação laser



Microfuros nas asas do avião:

- Diâmetro <200 µm
- Velocidade de perfuração: > 12.000 furos/s
- Geometria variável de padrões de furos
- Fluxo de ar otimizado devido à geometria apropriada do furo de perfuração



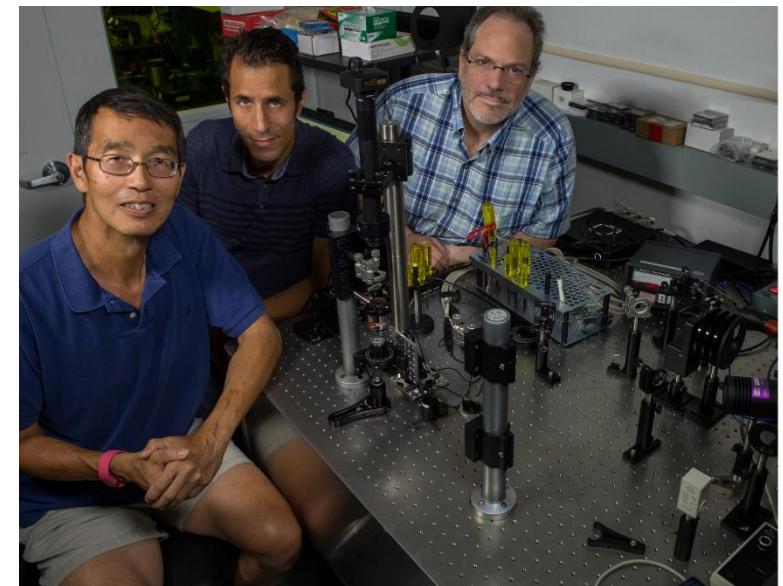
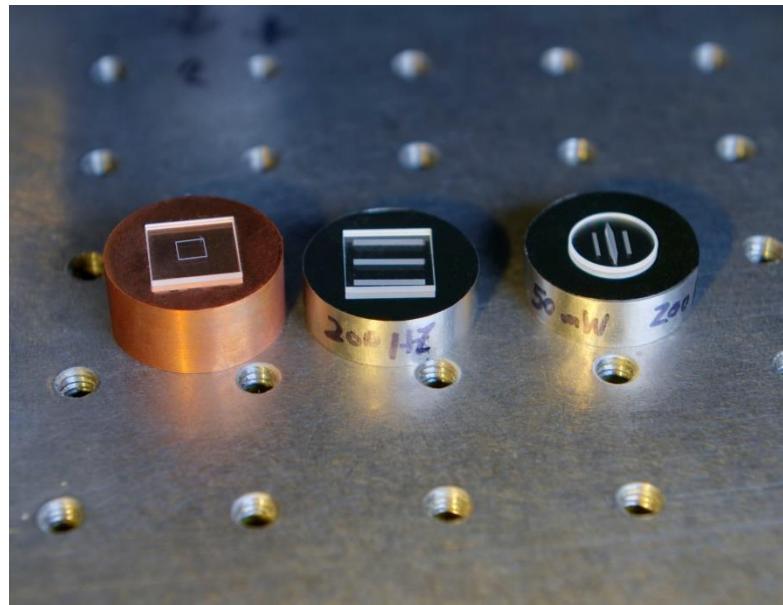
<https://www.youtube.com/watch?v=zk2XP3cgl-Q>

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Ultrashort pulse Lasers

Aerospace / NASA:

- laser ultrarrápido para unir materiais diferentes, com o objetivo de eliminar resinas (colas) que libertam gases e contaminam componentes sensíveis na aeronáutica
- materiais diferentes e gravar canais microscópicos ou guias de ondas através dos quais a luz poderia viajar em circuitos integrados fotónicos e transmissores de laser.



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Laser para energia nuclear

Diferentes métodos podem ser considerados para criar condições de fusão apropriadas em pressão e temperatura.

Durante muitos anos, fortes campos magnéticos foram explorados para reter o plasma, mas agora:

- A luz laser pulsada é considerada um mecanismo de ignição promissor.
- É baseado em condições medidas experimentalmente e cientificamente confirmadas.

Além disso, os sucessos da investigação nos últimos anos trouxeram progressos inovadores no desenvolvimento de ímanes fortes e lasers de alta potência.

Neste ambiente, está a emergir atualmente um verdadeiro ecossistema de empresas de áreas tecnológicas adjacentes.

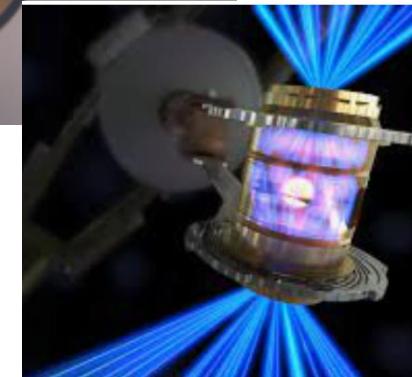
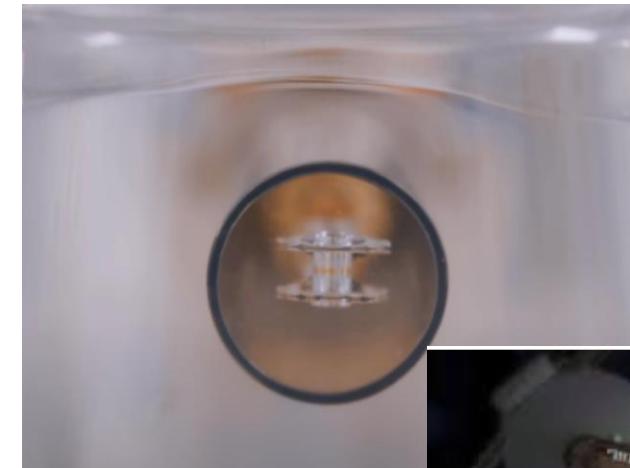
Talvez seja possível ver a primeira planta de demonstração totalmente operacional na década de 2030.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Laser para energia nuclear

Fusão a laser

- O deutério e o trítio servem como combustível para a fusão do hidrogénio.
- Numa experiência típica de fusão a laser, os dois isótopos são alojados num pellet ou alvo com cerca de 2 mm de diâmetro com um revestimento especial.
- Numa câmara de fusão especialmente construída, pulsos de luz laser atingem o pellet e aquecem abruptamente o seu invólucro.
- Este vaporiza de forma explosiva e causa um recuo que acelera extremamente os isótopos de hidrogénio no pellet, comprimindo e aquecendo o combustível.
- Neste combustível de fusão aquecido e comprimido, os isótopos colidem e fundem-se, libertando a chamada energia de fusão inercial



Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Laser para energia nuclear

Como a eletricidade pode ser gerada a partir desse processo?

- Cada reação de fusão deixa para trás não apenas um núcleo de hélio, mas também um neutrão livre que se choca contra a parede do reator em alta velocidade.
 - Essa energia gera calor, que pode ser convertido diretamente em eletricidade.
- Primeiro: um flash de laser verde comprime a cápsula antes que um feixe de protões subsequente gerado por laser aqueça a matéria densa até a temperatura de ignição.
- Funciona com muito mais eficiência graças às fases separadas de compressão e ignição.
- Esta abordagem é preferida para a produção comercial de energia porque torna viável os requisitos rigorosos dos lasers necessários para comprimir o combustível e oferece uma abordagem mais viável para os elevados ganhos de energia superiores a 100x necessários para a produção de eletricidade.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

Laser para energia nuclear

Ainda haja passos a tomar, a energia de fusão inercial através de lasers de alta potência está agora muito mais próxima de ser viável em condições terrestres.

Os avanços alcançados apontam para a viabilidade do mercado muito mais cedo do que o esperado – nos próximos 10 anos.

Entre outros, avanços recentes incluem:

- Em agosto de 2021, o Lawrence Livermore National Laboratory's National Ignition Facility na Califórnia produziu >1,3 MJ de rendimento de fusão com 1,9 MJ de acionamento de laser – uma conversão de 70% de energia de laser em energia de fusão.
- Eficiência muito alta em fontes de protões acionadas por laser foi observada experimentalmente. Mais de 10% da energia do pulso de **laser de picosegundos** foi convertida numa explosão de protões, e novas técnicas para fabricar alvos de ignição rápida estão a ser desenvolvidas.
- Lasers com muitas centenas de joules de energia a operar a 10 Hz podem agora ser construídos, e lasers pulsados de 100 J operando a 10 Hz foram colocados em campo.
- Isto está apenas dentro de um fator de 10 ou 20 do que será necessário para os feixes de laser numa planta de fusão em operação.

Tecnologias emergentes para captação, conversão e armazenamento

FIM

Obrigado!