

MATERIA
Tecnoloxía do láser

TITULACIÓN
Grao en Física

unidade
didáctica
1

Fundamentos do láser

Raúl de la Fuente Carballo

Área de Óptica

Departamento de Física Aplicada
Facultade de Óptica e Optometría

unidadesdidácticas
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

DESCATALOGADO

© Universidade de Santiago de Compostela, 2014



Esta obra atópase baixo unha licenza Creative Commons BY-NC-ND 2.5
Calquera forma de reprodución, distribución, comunicación pública ou transformación desta obra non incluída na licenza Creative Commons BY-NC-ND 2.5 só pode ser realizada coa autorización expresa dos titulares, salvo excepción prevista pola lei. Pode acceder Vde. ao texto completo da licenza nesta ligazón:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/deed.gl>

Deseño e maquetación

J. M. Gairí

Edita

Vicerreitoría de Estudantes,
Cultura e Formación Continua
da Universidade de Santiago de Compostela
Servizo de Publicacións
da Universidade de Santiago de Compostela

ISBN

978-84-16183-37-1

MATERIA: Tecnoloxía do Láser

TITULACIÓN: Grao en Física

PROGRAMA XERAL DO CURSO

Localización da presente unidade didáctica

Unidade I. Fundamentos do láser

Que é o láser?

O láser básico

Propiedades da radiación láser

Unha ollada aos tipos do láser

Anexos:

1. magnitudes enerxéticas
2. Exercicios

Unidade II. Cavidades Ópticas

Etalón de Fabry-Perot e cavidades ópticas

Modos lonxitudinais e a resonancia

Feixes gaussianos

Modos transversais

Xeometrías dunha cavidade. Estabilidade

Unidade III. Amplificación de radiación

Fotóns e estrutura atómica

Interacción radiación-materia: concepción de Einstein

A liña de emisión

Amplificación de radiación

Bombeo e inversión de poboación

Saturación de ganancia

Análise da ganancia

Unidade IV. Oscilación láser

Limiar de oscilación

Emisión no estado estacionario

Competición modal

Control das características dun láser

Láseres pulsados

Unidade V. Tipos de láser

Láseres de gas

Láseres de colorante

Láseres de estado sólido

Díodos láser

Láseres especiais

Unidade VI. Aplicacións do láser

Aplicacións cotiáns

Aplicacións científicas

Aplicacións médicas

Aplicacións industriais

Comunicacións ópticas

ÍNDICE

PRESENTACIÓN E CONTEXTUALIZACIÓN

OS OBOXECTIVOS

OS PRINCIPIOS METODOLÓXICOS

ACTIVIDADES

A AVALIACIÓN

BIBLIOGRAFÍA

OS CONTIDOS BÁSICOS

1. Que é o láser?
 - 1.1. O acrónimo láser
 - 1.2. Breve historia do láser
 - 1.3. Láseres extremos
 - 1.4. Para que o láser?
2. O láser básico
 - 2.1. Os tres elementos do láser
 - 2.1.1. O bombeo
 - 2.1.2. O medio amplificador
 - 2.1.3. A cavidade resoante
 - 2.1.4. Esquema do láser
 - 2.2. Descrición simple do funcionamento dun láser
3. Propiedades da radiación láser
 - 3.1. Monocromaticidade
 - 3.2. Direccionalidade
 - 3.3. Focalizabilidade
 - 3.4. Irradiancia e brillo
 - 3.5. Coherencia
4. Unha ollada os tipos de láseres
 - 4.1. O láser, o seu espectro de emisión e o tipo de medio amplificador
 - 4.2. O láser e as súas aplicacións
 - 4.3. Seguridade láser
 - 4.4. Láseres en imaxes

ANEXOS

1. Magnitudes enerxéticas
2. Exercicio

PRESENTACIÓN E CONTEXTUALIZACIÓN

Esta unidade é a primeira da materia Tecnoloxía do láser que se imparte no primeiro semestre do 4º curso do grao en Física. A materia é optativa e ten adxudicados 4.5 créditos (36 horas presenciais). Dende a súa implantación no curso 2010-2011 con 7 alumnos a matriculación en Tecnoloxía do láser véñse incrementando ata os 16 alumnos do curso actual. É previsible que nos vindeiros anos a matrícula se estableza no ao redor de 15-25 alumnos.

O láser é seguramente o instrumento óptico con máis variedade de aplicacións. O seu ámbito de uso vai dende o laboratorio de investigación ata os hospitais, os talleres industriais e as nosas casas e oficinas. Tamén destaca dende un punto de vista docente xa que o coñecemento deste instrumento implica moitas áreas diferentes da física. Esta materia está dedicada esencialmente a describir física do láser pero sen descoidar aspectos máis tecnolóxicos. O nivel está adaptado aos últimos cursos de grao, destacando os aspectos fundamentais da teoría do láser e describindo a tecnoloxía asociada máis relevante.

Fundamentos do láser é unha unidade de introdución a este dispositivo, na que se pretende situar o alumno na materia a partir de preguntas tan simples como: que é un láser?, de que consta?, como funciona?, cales son as súas características principais?, para que serve? Empézase a unidade cunha definición do láser baseada no propio acrónimo. Un repaso rápido á historia do láser, unha ollada as capacidades de “láseres extremos” e unha revisión da variedade das aplicacións deste instrumento nos serven para completar a presentación. Para entender o funcionamento do láser revísanse os seus 3 elementos e analízase como se conxuntan para formar o láser. Por outro lado, unha análise das características da radiación láser permite comprender en que se diferencia o láser das demais fontes de radiación e albiscar por que é un instrumento tan versátil dende un punto de vista funcional. Termínase a unidade cunha revisión ampla dos diferentes tipos de láser. Para realizar esta revisión clasifícanse os láseres atendendo a diferentes parámetros: espectro de emisión, tipo de medio activo ou risco no manexo do instrumento. Tamén se indican as principais aplicacións dos diferentes láseres.

Todos os contidos da unidade desenvolveranse en cinco sesións de 90 minutos cada unha delas.

OS OBXECTIVOS

Coa presente unidade didáctica preténdese que o alumno poida:

- recoñecer o significado do acrónimo láser;
- situar historicamente o láser;
- recoñecer a versatilidade dos láseres;
- identificar os tres elementos dos que consta o láser;
- explicar o funcionamento básico dun láser;
- distinguir as características máis salientables dos láser en relación a outras fontes de radiación;

- calcular unha magnitudes enerxética a partires de outra;
- relacionar os diferentes parámetros que caracterizan un feixe láser;
- determinar como afecta unha lente converxente os parámetros do láser;
- enumerar un mínimo de quince aplicacións dun láser.

OS PRINCIPIOS METODOLÓXICOS

A unidade desenvólvese en catro sesións teóricas de 90 minutos e unha sesión de seminarios, tamén de 90 minutos. A parte teórica, en contraposición coa das seguintes unidades, é fundamentalmente descritiva e contén pouco cálculo. Ademais, boa parte dos contidos poden ser desenvolvidos coa axuda de páxinas de internet dedicadas ao láser. Estes dous condicionantes permiten que as sesións teóricas, aínda que segan un formato de clase maxistral, tendan a ser moi participativas.

No seminario os alumnos deben de expoñer encerado a resolución dos problemas despois de habelos traballado en horario non presencial. Para a realización dos exercicios propostos tense confeccionado un boletín de problemas (véxase o segundo anexo) que se manterá o longo dos anos, aínda que poderá sufrir pequenas variacións. Dado o número de alumnos actual da materia e o tempo dispoñible propónse que os exercicios se resolvan por parellas aínda que na aula a presentación do exercicio correrá a cargo dun dos membros.

O profesor actúa en todo momento a modo de guía, incidindo nos aspectos pouco claros e inquirindo sobre aqueles que non foron explicados.

Na exposición de contidos mesturárase a presentacións de diapositivas con explicacións no encerado. Na medida do posible traeráse a aula algún dispositivo láser para que os estudantes constaten as súas características básicas. Tamén se usarán diferentes recursos de internet. Para a resolución dos problemas usarase especificamente o encerado.

Paralelamente á impartición do curso na aula, utilizarase unha aula virtual no campus virtual disposto pola USC para a docencia. Nesa aula disporáse de todo o material (contidos, boletíns de problema, material bibliográfico complementario) necesario para o desenvolvemento do curso. Ademais, a aula servirá para propoñer actividades aos estudantes e como medio de comunicación non presencial entre estudantes e profesor. Nesta unidade prevese como moito a realización de dúas actividades non presenciais.

ACTIVIDADES

- Resolución dos exercicios do boletín de problemas segundo o marcado no apartado de metodoloxía. Esta actividade pode realizarse por parellas, aínda que a presentación do exercicio na aula corra por conta dun dos membros.
- Realización das tarefas non presenciais propostas a través da aula virtual. Cada tarefa pode consistir en responder a unha ou varias cuestións, na

resolución dun exercicio determinado, nunha busca bibliográfica, na participación nun foro ou no desenvolvemento dalgun tema.

A AVALIACIÓN

Os criterios xerais de avaliación da materia fixan que, de superarse, o peso da avaliación continua chegue ao 100% da cualificación total. A avaliación específica da unidade forma parte da avaliación global e constará dos seguintes puntos:

- actividades non presenciais cun peso do 45%;
- resolución na aula de exercicios propostos cun peso do 40%;
- participación activa nas clases cun peso do 15%.

Na avaliación global, o peso das diferentes unidades será similar.

No caso de non superar a avaliación continua o estudante poderá realizar un exame escrito que constará de cuestións ou problemas asociadas a cada unha das unidades do curso.

BIBLIOGRAFÍA

Pedrotti E. L., L. S. Pedrotti (2007): Introduction to Optics. Prentice-Hall Inc.

Siegman A. E. (1986): Lasers. University Science Books.

Arieli Rami The Laser Adventure. <http://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb> (Xullo, 2014).

El láser, la luz de nuestro tiempo. <http://optica.usal.es/gioe/libro.html> (Xullo, 2014).

Laserfest. <http://www.laserfest.org/> (Xullo, 2014).

OS CONTIDOS BÁSICOS

Figura 1. Theodore Harold Maiman



<http://www.thisislacity.com/famous-faces/famous-la-faces/theodore-h-maiman/>

1. Que é o láser?

1.1. O acrónimo láser

LASER: Acrónimo de *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*. Este acrónimo, suxerido e utilizado a primeira vez por G. Gould en 1959, tradúcese por *Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación* (ALEER?). Que significado ten isto? No primeiro lugar, o láser é unha fonte de luz (ou mellor, de radiación), pero mentres que nunha fonte normal só se xera luz, no láser xérase e amplifícase luz. A amplificación de luz é un fenómeno macroscópico contrario ao de absorción e no que aumenta a cantidade de luz que se propaga nun medio. O xerme microscópico da amplificación é o fenómeno de emisión estimulada; é dicir, como resultado de millóns e millóns de procesos de emisión estimulada obtemos a amplificación da radiación. Outros sistemas físicos que actúan como amplificadores son os transistores ou os fotomultiplicadores (neles amplifícanse sinais eléctricos).

É de notar que o proceso de amplificación de radiación nun láser é eficiente porque normalmente dispón dun dispositivo de **retroalimentación óptica**, como xa veremos máis adiante. Neste senso, un dispositivo láser recibe tamén a denominación de oscilador láser.

1.2. Breve historia do láser

O láser é un dispositivo moderno, aínda que os primeiros elementos conceptuais nos que se fundamenta o láser foron deducidos ou descubertos o albor do século XX. Pero houberon de pasar case 50 anos para que se establecese unha modelización teórica completa do láser e se fabricase o primeiro dispositivo, no ano 1960. Nesta sección non pretendemos realizar un repaso exhaustivo da historia do láser senón dar unha pincelada cronolóxica dos acontecementos que deron lugar o nacemento e, posteriormente, o desenvolvemento do láser é das súas aplicacións.

Os fundamentos

- Introducción do concepto de emisión estimulada: teoría de Einstein de interacción entre radiación e materia (1916). Einstein predixo o fenómeno de emisión estimulada.
- Análise de como a emisión estimulada pode levar a amplificación de radiación: R. Tolman en 1924.
- Confirmación da existencia da emisión estimulada e amplificación de luz (absorción negativa) en gases: R. W. Ladenburg en 1928.
- Métodos para obter inversión de poboación: suxeridos por V. A. Fabrikant en 1940.

A invención do láser

- Antecedente do láser: invención do MÁSER (dispositivo amplificador de microondas ($\nu = 24$ GHz) por emisión estimulada en 1954 por C.H. Townes, J.P. Gordon e H.J. Zeiger e simultaneamente por G. Basov e A.M. Prokhorov.

- Concepto teórico do láser (adaptación do principio do máser a amplificación de radiación óptica): A. Schawlow e C. H. Townes no ano 1958, por unha banda, e G. Gould, por outra.

Os primeiros láseres

- Primeiro láser: láser de Rubí (T.H. Maiman, 1960). Este láser emitía pulsos de luz de duración ao redor do ms é a $\lambda = 694$ nm.
- Segundo Láser: láser de Uranio (P. P Sorokin e M. J. Stevenson, 1960). Era un láser de U3+ nun cristal de CaF₂ emitindo a 2.5 mm. Foi o primeiro láser de 4 niveis.
- Terceiro láser: láser de He-Ne operando a $\lambda = 1.15$ mm (A. Javan, W. Bennet e D. Herriot, 1960). Un ano despois construíuse un láser de He-Ne operando a $\lambda = 632.8$ nm.
- Primeiro láser de semiconductor (R. Hall. 1962). Láser de Arseniuro de Galio, GaAs operando a $\lambda = 850$ nm.

Dende os anos 60, a investigación en láser non deixou de parar, desenvolvéndose novos dispositivos, máis variados, máis especializados e con mellores e novas prestacións. Á par, foron encontrándose e estudando milleiros de aplicacións dos láseres, practicamente en todos os ámbitos da sociedade.

Se queredes saber máis, podedes consultar na web. Por exemplo, nas seguintes ligazóns:

- <http://www.kigre.com/files/historylasers.pdf>;
- <http://www.national-laser.com/laser-history.htm>;

1.3. Láseres extremos¹

Existe unha gran variedade de dispositivos láser, tanto pola súa configuración ou a súa estrutura como polas características da radiación emitida. Por exemplo:

- utilizan diferentes medios amplificadores: líquidos, sólidos ou gasosos;
- emiten radiación en diferentes partes do espectro electromagnético dende 10¹¹Hz (extremo IR) ata 10¹⁷ Hz (raios X);
- con diferentes potencias: rango de nW (10⁻⁹ W) a PW (10¹⁵ W);
- de dimensións moi diferentes: escala 1 mm ata tamaños dun edificio (*Lawrence Livermore Lab.*);
- poden emitir radiación de xeito continuo (láser continuo) ou pulsos (láser pulsado) con duración duns poucos fs (10⁻¹⁵ s);

Entre os dispositivos deseñados e construídos, podemos encontrar láseres que teñen algunha característica límite, a cal permite explorar novas fronteiras da ciencia e desenvolver aplicación moi novedosas. Podemos citar uns cantos exemplos².

- O pulso láser de máis enerxía: 150000 J nun pulso de 10 ns de duración. Foi xerado no ano 2005 no *National Ignition Facility* (NIF) do *Lawrence Livermore National Laboratory* en Livermore, California.

¹ véxase <http://www.laserfest.org/lasers/how/extreme.cfm>

² Os datos que se indican corresponden o ano 2009

- A maior potencia instantánea: por enriba de 1 PW, obtida tamén no NIF no ano 1996.
- A maior potencia media: máis de 1 MW en emisión continua durante uns segundos. Obtido no *Mid-Infrared Advanced Chemical Laser (MIRACL)*, no *High Energy Laser Systems Test Facility* en White Sands Missile Range, New Mexico, no ano 1998.
- O pulso máis curto: menos de 1 fs, creado no *Max Planck Institute for Quantum Optics* en Garching, German no ano 2004.
- O láser máis longo: 1.3 Km. Corresponde a un láser de electróns libres no rango de raios X situado no *Stanford Linear Accelerator Center* e denominado *Linac Coherent Light Source (LCLS)*.
- O láser máis curto: unhas cantas micras de longo. É un tipo de láser de semiconductor, o díodo láser de cavidade vertical e emisión superficial (VCSEL), inventado no *Tokyo Institute of Technology* no ano 2000.
- O láser máis estable: 13 s de emisión case ideal harmónica. Este é o tempo no que un láser do *National Institute of Standards and Technology (NIST)* foi capaz de oscilar sen variar a súa frecuencia.

1.4. Para que o láser?

Nos inicios do láser fíxose famosa a frase: *unha solución en busca dun problema*, aludindo o feito de que a análise deste instrumento era moi interesante dende un punto de vista teórico pero sen ningunha aplicación a nivel práctico. Non obstante, pronto empezaron a xurdir aplicacións e campos moi diversos, aplicacións que foron aumentando en número no tempo a unha velocidade vertixinosa. Por nomear algunha delas:

- aplicacións cotiáns: impresoras láser, discos ópticos, código de barras, punteiro láser;
- aplicacións científicas: espectroscopía, radares ópticos (LIDAR), arrefriamento de átomos, fusión nuclear;
- aplicacións médicas: cirurxía, oftalmoloxía, cicatrización de feridas, tratamento de tumores;
- aplicacións industriais: gravado, corte, perforado ou soldado mediante láser;
- aplicacións metrolóxicas: aliñamento de obxectos, medida de distancias ou velocidades;
- técnicas de imaxe: produción de imaxes holográficas, microscopía confocal, tomografía de coherencia óptica;
- comunicacións: comunicacións por fibras, comunicación ópticas no espazo baleiro, fontes de comunicación, amplificadores de sinal.

2. O láser básico

2.1. Os tres elementos do láser

Podemos considerar que un láser típico está constituído por tres partes ben diferenciadas,

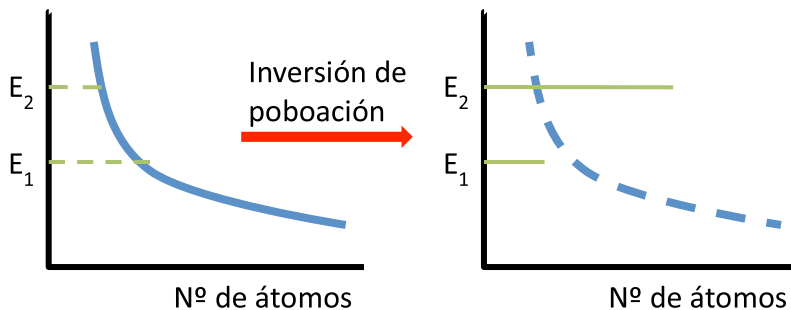
- unha fonte externa de enerxía ou fonte de bombeo;
- o medio amplificador;
- unha cavidade ou resoador óptico.

Nesta sección imos definir que é e que papel xoga cada unha das partes.

2.1.1. O bombeo

É o dispositivo que prové ao medio láser da enerxía necesaria para que se produza amplificación da luz. Segundo a natureza desta enerxía, falamos principalmente de bombeo eléctrico ou bombeo óptico, pero tamén pode ser bombeo químico, térmico, por feixes de electróns, con raios X... A función principal do bombeo é producir **inversión de poboación** no medio activo. Isto consiste en xerar unha configuración nun medio na que existen máis átomos cunha enerxía dada elevada que átomos con outra enerxía dada menor. En ausencia de bombeo é maior a poboación de átomos de enerxía menor.

Figura 2. Distribución de enerxías atómicas



Unha gran inversión de poboación implica que se produzan moitos procesos de emisión estimulada

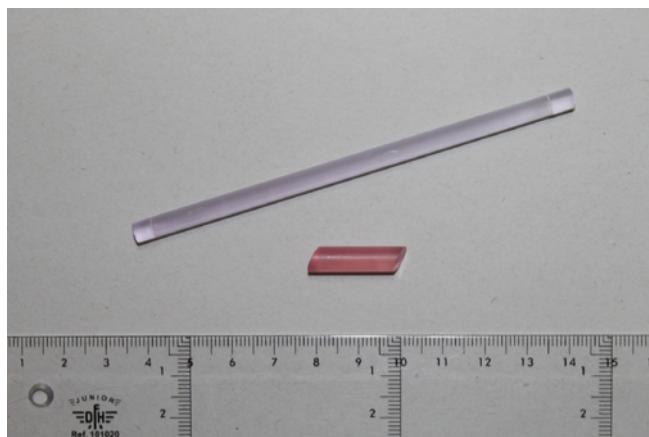
Figura 3. Lámpadas de arco de luz branca usadas para bombear un láser tipo Neodimio (cristal dopado con Nd)



2.1.2. O medio amplificador

Este é o medio onde se produce a amplificación de radiación. Tamén recibe o nome de medio láser ou medio activo. Moitos láseres reciben o seu nome do medio amplificador. Como exemplo temos láseres de He-Ne, CO₂, Argon, Hidróxeno, colorantes, Nd-YAG (óxido de Itrio e aluminio dopado de neodimio. YAG: Granate de Itrio e Aluminio.), Ti-Zafiro, Rubí, semicondutores (GaAs, InP) e moitos máis. A existencia de tantos medios é debido a necesidade de ter láseres con diferentes características, frecuencia de emisión sobre todo, pero tamén potencia, emisión continua ou pulsada, etc.

Figura 4. Barra de Nd:YLF (arriba) e de Ti:Zafiro (abaixo)



Se botamos unha ollada o que ocorre no medio láser, temos que a nivel microscópico prodúcense procesos de **absorción** e emisión de radiación. Entre os procesos de emisión distínguense procesos de **emisión espontánea** e de **emisión estimulada**. Estes últimos son inducidos pola radiación que penetra no medio. Cando nun medio se produce unha inversión de poboación os procesos de emisión estimulada superan os procesos de absorción e se produce, a nivel macroscópico, amplificación de radiación.

Nun bo medio é fácil producir unha gran inversión de poboación, co que o proceso de emisión estimulada é abundante e, polo tanto, amplifícase moito a radiación.

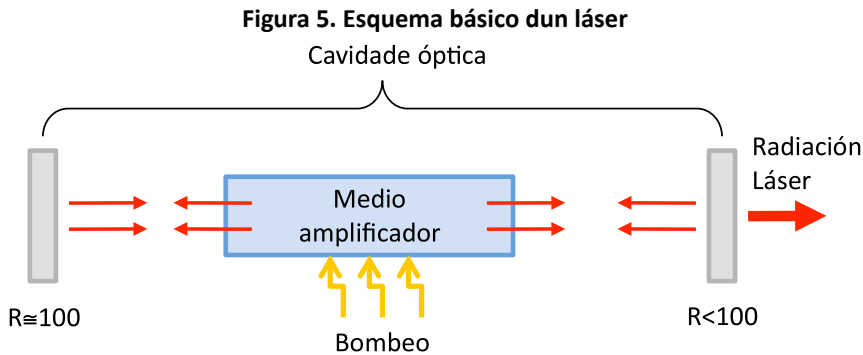
O proceso de amplificación é espectralmente selectivo. Un medio específico só é capaz de amplificar radiación nunha banda determinada de frecuencias

2.1.3. A cavidade resoante

É o dispositivo de retroalimentación óptica do láser, é dicir, a cavidade redirixe a radiación amplificada ata o medio para volver a amplificala. Consta basicamente de dous (algunhas veces máis) espellos esféricos ben aliñados. Ademais a cavidade láser determina como varía a cantidade de luz (irradiancia) emitida nun plano transversal ao de propagación e actúa como un filtro en frecuencias.

A xeometría da cavidade determina en gran medida as características do láser

2.1.4. Esquema do láser

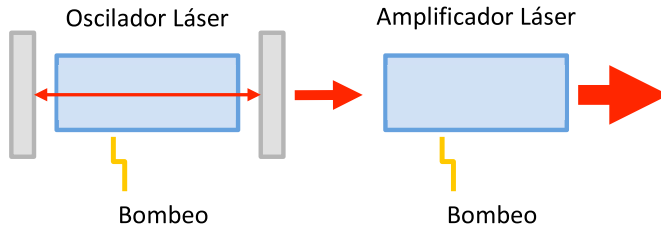


Un exemplo de “láser acústico”, a guitarra:

- o bombeo: o músico;
- o medio amplificador: as cordas;
- a cavidade resoante: a caixa.

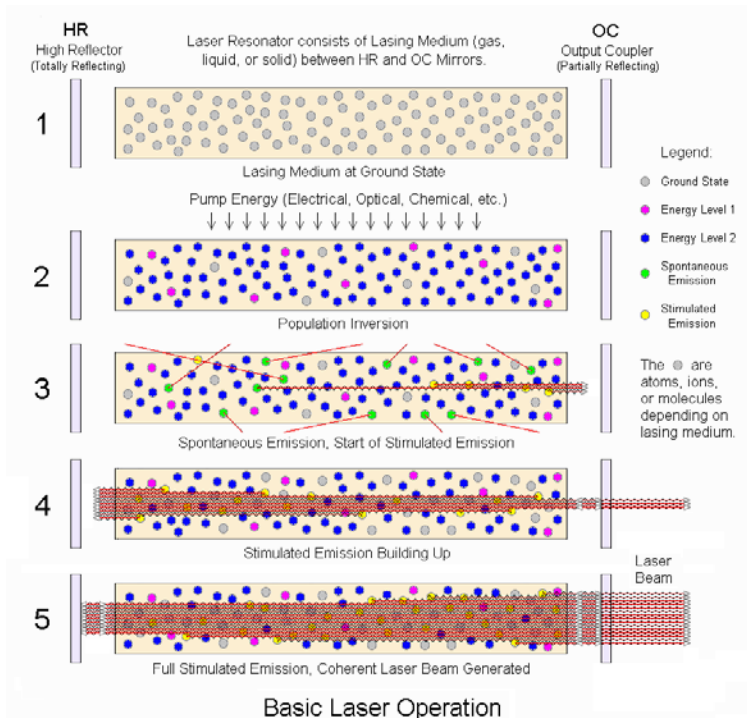
Aínda que a configuración anterior é a máis típica, non todos os láseres dispoñen de cavidade, ou ben porque só amplifican a luz doutro láser, ou ben porque a amplificación se produce nunha fibra óptica moi longa.

Figura 6. Un amplificador láser bombeado por un oscilador láser



2.2 Descrición simple do funcionamento dun láser

Figura 7. O funcionamento do láser en 5 pasos



www.repairfaq.org/sam/laserop.gif

- Paso 1: os niveis enerxéticos dos átomos ou moléculas do medio seguen a distribución de Boltzmann. A maioría deles está no estado fundamental.
- Paso 2: empeza a funcionar o bombeo. A fonte de bombeo transmite enerxía ao medio amplificador e prodúcese o proceso de inversión de poboación entre dous niveis dados 1 e 2.

- Paso 3: o medio láser cede parte da enerxía recibida en forma de radiación electromagnética (EM). A emisión é producida en todas direccións e con características variadas. É **emisión espontánea**. Esta é o xerme da **emisión estimulada**, que xa pode empezar a producirse ao longo do medio.
- Paso 4: pouco a pouco empeza a aumentar a emisión estimulada no medio. A reflexión dos espellos favorece a emisión estimulada e a radiación é amplificada o longo do eixe da cavidade. O proceso de amplificación é **coherente**.
- Paso 5: A radiación amplificada oscila na cavidade, volvendo a ser amplificada. Despois dun pequeno transitorio chégase a un estado estacionario. Parte da radiación que circula na cavidade é transmitida por un dos espellos; constitúe a radiación emitida polo láser.

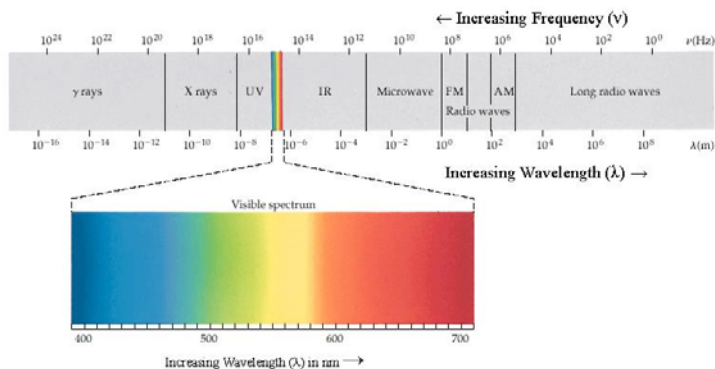
3. Propiedades da radiación láser

Dende o punto de vista fundamental a radiación do láser é como calquera outra radiación electromagnética. Non obstante, ten unhas características peculiares que posibilitan que sexa usado en multitude de aplicacións.

3.1. Monocromaticidade

Como ben sabedes, o espectro electromagnético e a distribución ou clasificación da radiación EM segundo a súa frecuencia ($\nu = \omega/2\pi$) ou ben a súa lonxitude de onda (λ), e que vai dende as ondas largas (frecuencias pequenas) de raio ata os raios γ (lonxitudes de ondas pequenas). Dentro deste vasto conxunto de radiacións, o espectro visible ocupa unha pequena rexión ao redor de 480-780 nm de lonxitude de onda.

Figura 8. O espectro electromagnético



<http://www.cbu.edu/~seisen/Photosynthesis.htm>

A relación entre lonxitude de onda e frecuencia vén dada pola ben coñecida fórmula: $\nu = c/\lambda$, onde c é velocidade da luz no baleiro. Por exemplo, para o rango visible: $\lambda = 380\text{-}780\text{ nm}$; $\nu = 3.85\text{-}7.9 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$.

A distribución espectral da luz emitida por unha fonte determina a súa cor

A cada unha das radiacións que compoñen o espectro, e dicir, á radiación dunha frecuencia determinada, denomínase **radiación monocromática**. Corresponde a unha onda harmónica pura. É unha onda ideal. Calquera radiación real resulta da composición de radiacións monocromáticas. Refírese o **Grao de monocromaticidade** a canto se asemella o espectro dunha radiación determinada a unha radiación monocromática. Canto maior sexa a semellanza, maior é o grao de monocromaticidade. A primeira característica típica da radiación láser é que posúe un elevado grao de monocromaticidade.

Pero, como coñecer o grao de monocromaticidade? A resposta é sinxela: separando as distintas compoñentes espectrais da radiación mediante un espectrógrafo ou espectrómetro e medindo a irradiancia ou a potencia espectral.

Figura 9. Descomposición do espectro mediante un prisma

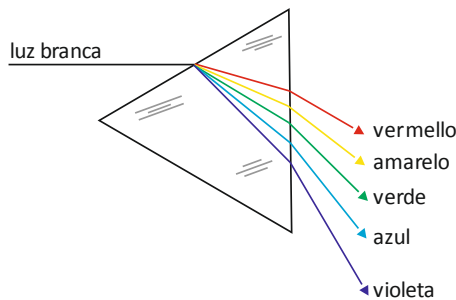
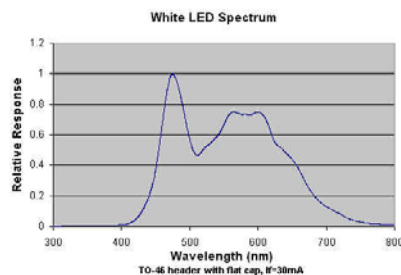
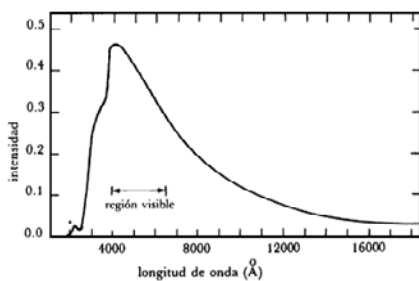
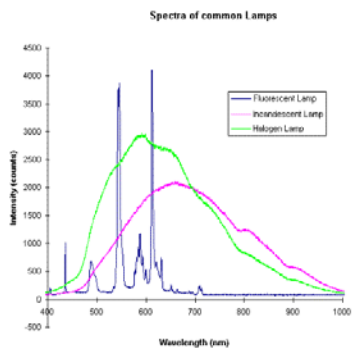


Figura 10. Espectro de varias fontes de luz

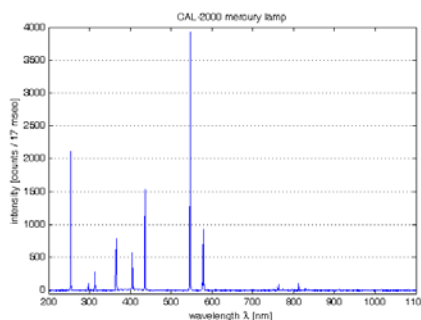


http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/38/html/sec_6.html

http://www.trainweb.org/girr/tips/tips7/white_led_tips.html



http://www1.union.edu/newmanj/Physics100/Light%20Production/producing_light.htm



<http://h25458.aquarius.hp.com/blogs/color/archive/0001/01/01/3682.html>

Na figura 8 ilustranse uns cantos exemplos de espectros de fontes. Por un lado, nas tres primeiras figuras temos fontes cun espectro moi amplo que abarca ao visible e máis (UV, IR). Por outro lado, nas lámpadas de descarga nun gas a baixa presión como a que corresponde a cuarta figura o espectro está constituído por varias bandas moi estreitas; estas son **raias** ou **liñas espectrais**. Na táboa seguinte mostramos os parámetros espectrais correspondentes as raias principais no rango visible dunha lámpada espectral de Hg.

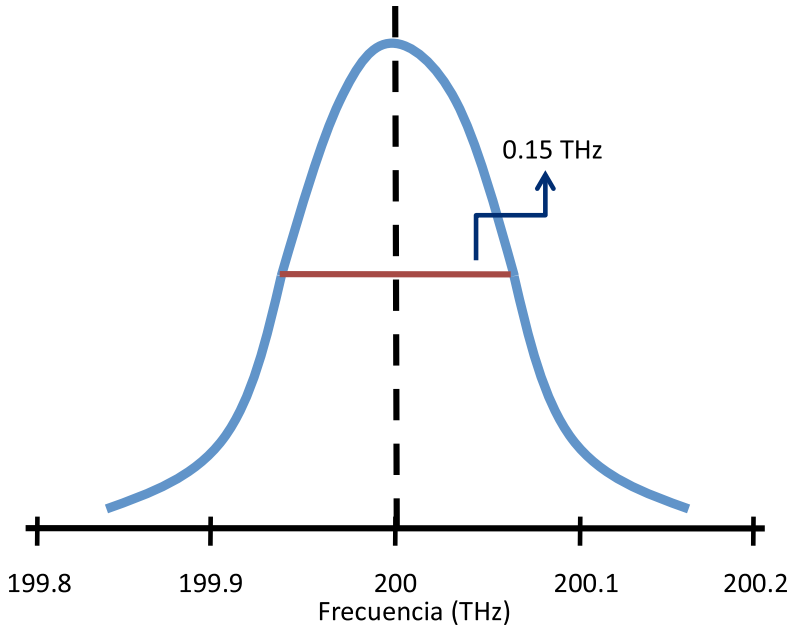
Táboa 1. Liñas dunha lámpada de mercurio no rango visible

| | | | | | |
|-------------------------|---------|--------------|-------|---------|---------|
| λ (nm) | 405 | 436 | 546 | 577 | 579 |
| cor | violeta | azul-violeta | verde | amarelo | amarelo |
| ν (10 ¹⁴ Hz) | 7.4 | 6.86 | 5.5 | 5.2 | 5.18 |

Para caracterizar unha determinada raia espectral necesitamos definir dous parámetros: a frecuencia central e **ancho da banda** en frecuencias; ou ben, a lonxitude de onda central e ancho de banda en lonxitude de ondas. Non existe un criterio estrito para definir estes parámetros. Por exemplo, a frecuencia central pode ou ben corresponder o máximo da liña espectral ou ben o seu centro. Respecto o ancho de banda aínda que o criterio non é único, utilízase amplamente o concepto de **ancho de banda a metade do máximo** ($\Delta \nu$, $\Delta \lambda$). Defínese como a diferenza entres as frecuencias (ou lonxitudes de ondas) nas que a irradiancia espectral corresponde a metade do máximo:

$$I'(\nu_1) = I'(\nu_2) = I'_{\max} / 2 \Rightarrow \Delta \nu = |\nu_2 - \nu_1| = c \left| \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right| = c \frac{\Delta \lambda}{\lambda_1 \lambda_2}$$

Figura 11. Medida do ancho de banda en frecuencias



Usando estas definicións, fálase de radiación **case-monocromática** como aquela radiación cun espectro tal que a súa frecuencia (ou lonxitude de onda) central e moito menor que o seu ancho de banda (en frecuencia ou lonxitude de onda, segundo corresponda): $\Delta\lambda \ll \lambda_c$, $\Delta\nu \ll \nu_c$. Se a radiación é case-monocromática verifícase que:

$$\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda_c \Rightarrow \Delta\nu = c\Delta\lambda / \lambda_c^2 \Rightarrow \frac{\Delta\nu}{\nu_c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_c}$$

Táboa 2. Parámetros espectrais de fontes diversas

| | λ_c (nm) | ν_c (10^{14} Hz) | $\Delta\lambda$ (nm) | $\Delta\nu$ (Hz) |
|---|------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| Liña amarela Na | 589.6 | 5.09 | 0.1 | $9 \cdot 10^{10}$ |
| Liña vermella Cd | 643.8 | 4.65 | $1.3 \cdot 10^{-3}$ | $9.4 \cdot 10^8$ |
| Láser de He-Ne típico | 632.8 | 4.74 | 10^{-3} - 10^{-4} | 10^8 - 10^9 |
| Láser de He-Ne alta calidade | 632.8 | 4.74 | 10^{-8} | $7.5 \cdot 10^3$ |
| Láser pulsado de Ti-Zafiro (pulsos de 100 fs) | 800 | 3.75 | 10 | $4.7 \cdot 10^{12}$ |

Polo tanto, para unha radiación de elevado grao de monocromaticidade o cociente $\lambda_c / \Delta\lambda = \nu_c / \Delta\nu$ é grande.

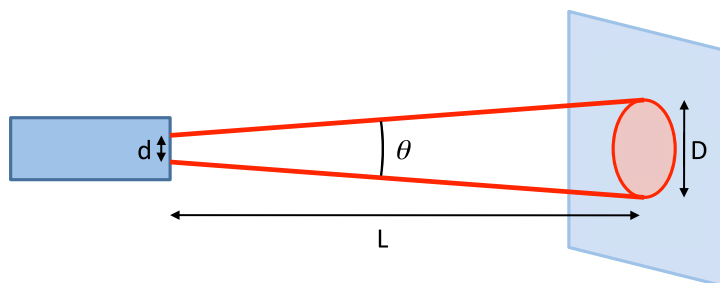
A pureza espectral dun láser ven determinada polo medio amplificador e pola cavidade óptica

3.2. Direccionalidade

Un foco de iluminación emite nun amplo conxunto de direccións. É unha fonte moi diverxente. Mentres, unha fonte láser emite ao redor dunha dirección dada. É moi direccional. Para definir a **diverxencia** dun feixe de radiación debemos de considerar o tamaño ou diámetro (D) da zona iluminada pola fonte a unha distancia (L) é o tamaño (d) no foco emisor. Se supoñemos que o tamaño aumenta linealmente, tense:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{D-d}{2L}$$

Figura 12. Fonte iluminando unha pantalla



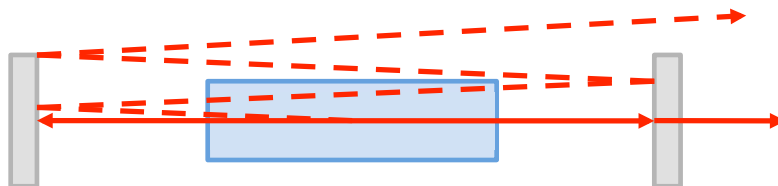
E se $d \ll D$ (aproximación de fonte puntual): $\tan(\theta/2) \approx D/(2L)$. Ademais, se a diverxencia é pequena, $\theta \approx (D-d)/L$, ou para fontes puntuais, $\theta \approx D/L$. Como exemplo, se supoñemos $\theta = 0.2$ rad (11.5°), $\tan(\theta/2) = 0.1003$ e a aproximación de diverxencia pequena corresponde a un erro relativo de $3 \cdot 10^{-3}$. Un feixe que ten unha diverxencia moi pequena dise que é un **feixe colimado** (un feixe colimado perfecto ou ideal tería unha diverxencia nula).

A diverxencia dun láser é da orde do mrad³ e vén determinada pola cavidade óptica

A que se debe a baixa diverxencia nun láser? No interior da cavidade do láser, a radiación oscila entre os seus espellos moitas veces antes de ser emitida. Soamente a radiación que se propaga ao redor do eixe da cavidade é realmente emitida.

³ 1mrad = 0.057° = 0°3'26''

Figura 13. Perdas laterais de radiación nunha cavidade láser



Táboa 3. Diverxencia de diferentes láseres

| Láser | He-Ne | Argon | CO ₂ | Rubí | Nd:YAG | AlGaAs |
|-----------------|-------|---------|-----------------|------|--------|--------|
| θ (mrad) | 0.5-1 | 0.5-1.0 | 1-5 | 1-5 | 1-10 | 20x200 |

No que segue imos obter una relación entre a diverxencia dun feixe láser e o seu diámetro (isto é un adianto da unidade 2). Se consideramos que un láser ten un perfil transversal tipo gaussiano a súa semianchura (w) varía ao longo da propagación (z) segundo a fórmula:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2},$$

onde w_0 é a semianchura mínima e na fórmula supuxemos que corresponde a semianchura no plano $z = 0$. A diverxencia corresponde a pendente da función anterior:

$$\frac{\theta(z)}{2} \approx \tan\left(\frac{\theta(z)}{2}\right) = \frac{dw}{dz} = \left(\frac{\lambda}{\pi w_0}\right)^2 \frac{z}{w(z)},$$

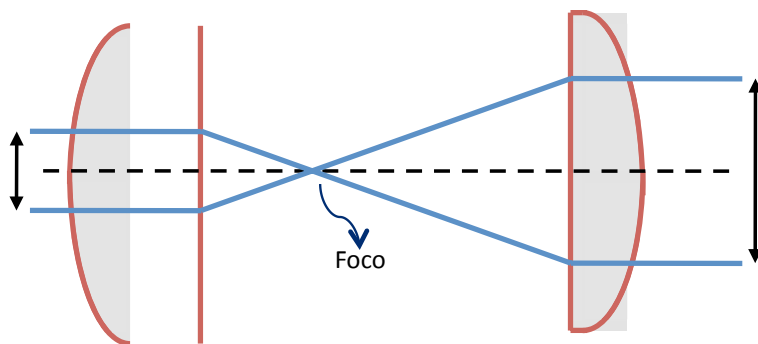
e para distancias suficientemente grandes o segundo factor na fórmula da semianchura domina fronte o primeiro ($w(z) \approx \frac{\lambda z}{\pi w_0}$) de forma que obtemos $\theta \approx \frac{2\lambda}{\pi w_0} \approx \frac{2w(z)}{z}$.

Na práctica, o perfil transversal do láser non é exactamente gaussiano, de forma que a fórmula obtida non é rigorosa, pero si cualitativamente correcta. Se ademais consideramos que o diámetro do láser a saída do mesmo (d) é máis ou menos o mínimo (e dicir, $d \approx 2w_0$), temos en boa aproximación $\theta \approx \lambda/d$. Como exemplo: $\lambda = 0.5$ mm e $d = 1$ mm $\Rightarrow \lambda = 0.5$ mrad.

Se queremos diminuír a diverxencia dun láser debemos aumentar o seu tamaño inicial, por exemplo usando un sistema afocal. Se o sistema está constituído por dúas lentes de distancias focais f_1, f_2 o tamaño final é $d' = \frac{f_2}{f_1} d$ e a diverxencia

$$\theta' \approx \frac{f_1}{f_2} \theta.$$

Figura 14. Sistema afocal



3.3. Focalizabilidade

O modelo Óptico xeométrico predí que un feixe perfectamente colimado pode ser focalizado nun punto. É un límite ideal no que se despreza a difracción. Ademais, non existe un feixe colimado perfecto. Para focalizar un feixe utilízase unha lente de focal curta. O feixe estará tanto máis focalizado canto máis colimado chegue a lente. O cálculo do tamaño do feixe que se pode acadar no foco é bastante complicado. Non obstante existen dúas situacións límites nas que o cálculo vólvese sinxelo. A primeira das situacións corresponde a unha configuración na que o feixe atravesa sobradamente a lente (o diámetro da apertura da lente é moito maior que o diámetro do propio feixe). Neste caso temos que o tamaño no foco é $d_f = \theta f'$, onde f' é a distancia focal da lente; ou co visto no apartado anterior, para un láser $d_f = \lambda f' / d$. Pode chegarse sen problemas a tamaños de poucas micras. Por exemplo, se a lonxitude de onda do feixe é $\lambda = 0.5 \text{ mm}$, o seu tamaño na lente de $d = 1 \text{ mm}$ e a distancia focal desta última é $f' = 5 \text{ cm}$, obtemos $d_f = 25 \text{ mm}$. A segunda situación corresponde a cando o feixe excede sobradamente a lente. Neste caso a abertura da lente actúa como un diafragma é o diámetro do feixe no foco é $d_f = \lambda f' / d_L$ onde d_L é o diámetro da lente.

3.4. Irradiancia e brillo

Unha alta direccionalidade e unha forte capacidade de focalización implican que se poda concentrar moito a radiación dun láser. Para un láser que ilumina unha área circular A de diámetro D , temos unha irradiância media: $I = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi D^2}$. Se

consideramos por exemplo a irradiância dun láser de He-Ne de 1 mW cun diámetro de 1 mm, esta vale $I = 0.127 \text{ W/cm}^2$. E no caso dun láser de CO_2 de 100 W focalizado nun *spot* de 10 mm, a irradiância é $I = 1.27 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$. Podemos comparar estes valores coa irradiância dun foco de 10 W a unha distancia de 1 m. Neste caso, e

suposta iluminación uniforme, para calcular a irradiancia media consideramos unha superficie esférica de radio $r = 1 \text{ m}$:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = 7,95 \cdot 10^{-5} \text{ W / cm}^2$$

Outra magnitude que é elevada nun láser é a **radiancia** (ou **brillo**). Defínese como a potencia por unidade de área A (normal a propagación) é de ángulo sólido Ω . Se consideramos o brillo medio, temos:

$$B = \frac{P}{A\Omega} \text{ W / m}^2 \text{ sr}$$

Para un feixe de diverxencia q o ángulo sólido de emisión é: $\Omega = \pi\theta^2 / 4$ (para obter este resultado considérase o ángulo sólido subtendido por un cono de semiángulo $\theta / 2$, e faise a aproximación de ángulos pequenos). Considerando un feixe de diámetro D , e tendo en conta a relación entre diverxencia e tamaño do feixe a saída do láser obtense:

$$B = \frac{P}{\left(\pi \frac{D^2}{4}\right) \left(\pi \frac{\lambda^2}{4d^2}\right)} = \left(\frac{4d}{\pi\lambda D}\right)^2 P \approx \left(\frac{d}{D}\right)^2 \frac{P}{\lambda^2}$$

Por exemplo, para os láseres anteriores e considerando $D \approx d$ temos $B = 2.5 \cdot 10^9 \text{ W/(m}^2\text{sr)}$; no caso do He-Ne ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) e $B = 8.9 \cdot 10^{11} \text{ W/(m}^2\text{sr)}$ no caso do CO_2 ($\lambda = 10.6 \text{ mm}$) sen focalizar. Para fonte de iluminación considerada máis arriba o ángulo sólido é de 4π é o brillo de $0.06 \text{ W/(m}^2\text{sr)}$

3.5. Coherencia

Este apartado debe ser desenvolto polos estudantes

Táboa 4. Parámetros de diferentes láseres

TABLE 21-2 LASER PARAMETERS FOR SEVERAL COMMON LASERS

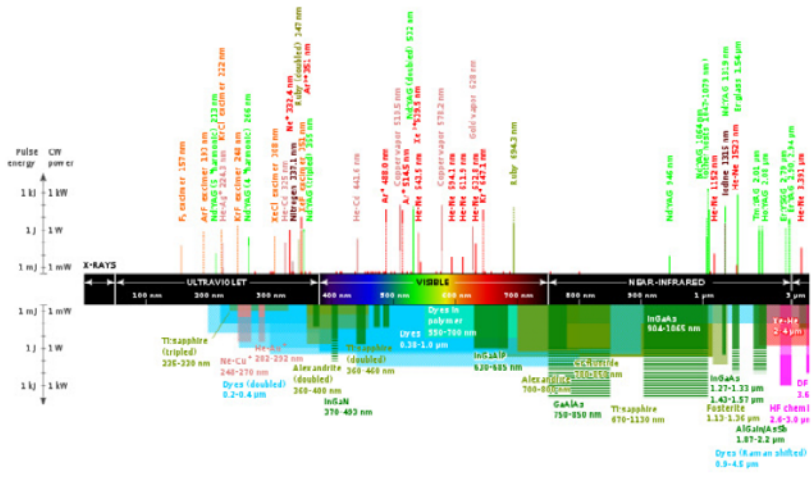
| Type | Wavelength | Power/energy | Type of output | Beam diameter | Beam divergence | Efficiency ¹ |
|--|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Helium-neon (gas) | 632.8 nm | 0.1–50 mW | cw | 0.5–2 mm | 0.5–1.7 mrad | <0.1% |
| Ruby (solid) | 694.3 nm | 0.03–100 J (per pulse) | pulsed | 1.5 mm–2.5 cm | 0.2–10 mrad | <0.5% |
| Carbon dioxide (gas) | 10.6 μm | 3–100 W | cw | 3–4 mm | 1–2 mrad | 5–15% |
| Nitrogen (gas) | 337 nm | 1–300 mW (average per pulse) | pulsed | 2 × 3–6 × 30 mm (rectangular) | 1–3 × 7 mrad | <0.1% |
| Nd:YAG (solid) | 1.064 μm | 0.04–600 W | cw | 0.75–6 mm | 2–18 mrad | 0.1–2% |
| Ni-glass (solid) | 1.06 μm | 0.15–100 J (per pulse) | pulsed | 3 mm–2.5 cm | 3–10 mrad | 1–5% |
| Argon ion (gas) | 488 nm or 514.5 nm | 5 mW–20 W | cw | 0.7–2 mm | 0.4–1.5 mrad | <0.1% |
| Dye (liquid) | 400–900 nm (variable) | 20–800 mW | cw/pulsed (pumped by argon ion laser) | 0.4–0.6 mm | 1–2 mrad | 10–20% |
| Argon fluoride (excimer) | 193 nm | Up to 10 W (average per pulse) | pulsed | 6 × 23–20 × 32 mm (rectangular) | 2–6 mrad | <0.5% |
| Hydrogen fluoride (chemical) | 2.6–3 μm | 0.01–150 W cw or 2–600 mJ per pulse | cw/pulsed | 2 mm–4 cm | 1–15 mrad | 0.1–1% |
| Gallium arsenide (semiconductor diode) | 780–900 nm | 1–40 mW cw or average per pulse | cw/pulsed | N/A (diverges too rapidly) | 200 × 600 mrad (oval in shape) | 1–20% |

¹ The efficiency given here is the overall operational efficiency, often referred to as a "wall-plug" efficiency, to denote the ratio of laser-beam power out over wall-plug electrical power in. The quantum efficiency, always higher than the wall-plug efficiency, is defined as the ratio of the laser's transition energy ($E_{\text{upper}} - E_{\text{lower}}$) to the pump energy ($E_{\text{pump}} - E_{\text{ground}}$).

4. Unha ollada os tipos de láseres

4.1.O láser, o seu espectro de emisión e o tipo de medio amplificador

Figura 15. O espectro dos láseres máis comúns



Gas lasers

- Excimer laser
- Noble gas laser
- Metal vapor laser
- Chemical laser
- Molecular gas laser
- Far infrared laser

Solid state lasers

- Lanthanides
- Semiconductor laser
- Transition metals
- Organic dye in polymer host

Liquid lasers

- Dyes

- CW emission
- pulsed emission
- laser diode bars or stacks

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Commercial_laser_lines.svg

Na figura 15 amósanse os láseres máis típicos indicando a súa longura de onda central ou ben, cando son sintonizables (os que figuran por debaixo da barra de longuras de onda), a súa banda de emisión. A altura dunha liña é unha indicación da máxima potencia de emisión continua ou enerxía por pulso, segundo corresponda. Coa cor codifícase o tipo de medio amplificador

4. 2. O láser e as súas aplicacións

Para estudar este apartado véxase por exemplo:
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_laser_types.

4. 3. Seguridade láser

O láser pode ser perigoso se non o usamos con precaución. A principal causa de dano atinxe á visión, pero tamén pode causar lesións na pel, ou pode levar a riscos adicionais como os asociados ao uso dunha fonte de alta tensión. A lexislación vixente preocupouse de realizar unha clasificación dos láseres en atención o se risco e de definir medidas de seguridade para o seu uso. A última clasificación data de 2007, aínda que é frecuente atoparse con normas asociada á clasificación do ano 1970.

Sistema vello (1970)

- Clase I : láseres que, baixo condicións normais, non poden causar dano.
- Clase II : (< 1mW, visible) láseres nos que o acto reflexo de pechar o ollo permite evitar o dano.
- Clase IIa : (< 4 mW) poden queimar a retina o miralos fixamente durante 1000 s.
- Clase IIIa : (< 5 mW) láseres que poden causar dano en combinación con instrumentos ópticos que varíen o tamaño do feixe e/ou a densidade de potencia.
- Clase IIIb : (5 – 500 mW) láseres que causan dano ao miralos directamente, pero nos que a reflexión difusa non é perigosa. Os de máis potencias poden queimar a pel.
- Clase IV : (> 500 mW) Inclúe a todos os láseres non clasificados anteriormente.

Nova clasificación (2007)

- Clase 1: estes láseres non son perigosos en condicións normais de utilización.
- Clase 1m: láseres seguros salvo que se miren a través de instrumentos de aumento como microscopios ou telescopios.
- Clase 2: láseres no rango visible, nos que os reflexos de aversión protexen o ollo.
- Clase 2m: como a clase anterior, pero perigosos cando se observan a través de instrumentos ópticos.
- Clase 3R: láseres de risco moderado, pero potencialmente perigosos aínda con exposición accidental.
- Clase 3M: láseres perigosos en visión directa, mentres que a reflexión difusa é normalmente segura.
- Clase 4: son os láseres máis perigosos. Poden queimar a pel e producir un dano permanente no ollo por visión directa, indirecta ou difusa.

4.4 Láseres em imaxes

Figura 16. Láser de He-Ne



Figura 17. Láser de Argón

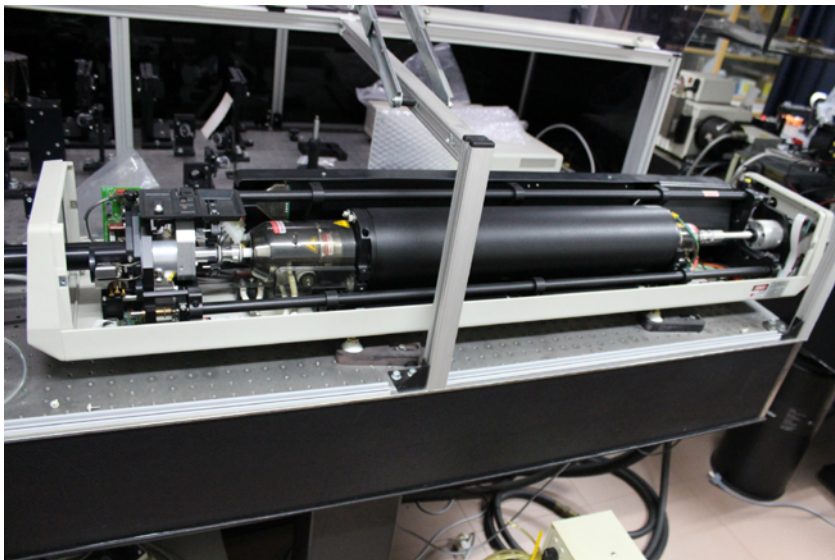


Figura 18. Láser de Ti-zafiro

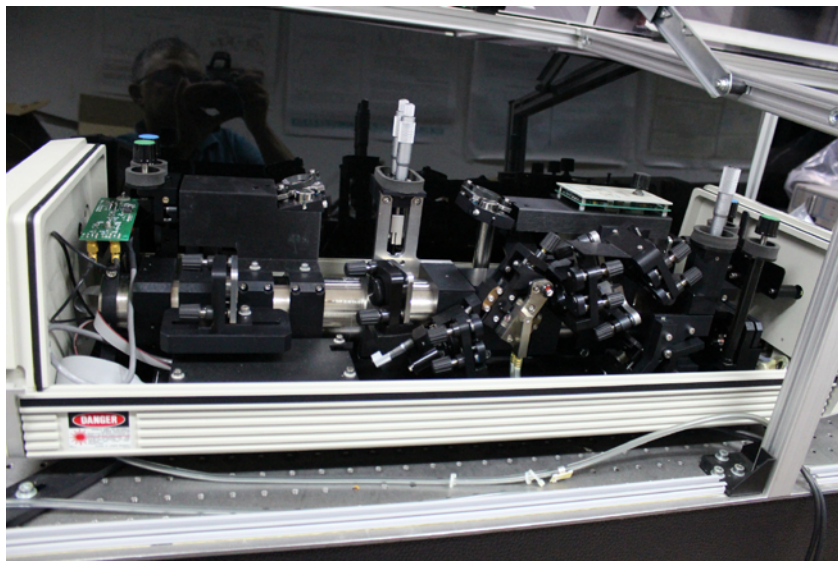
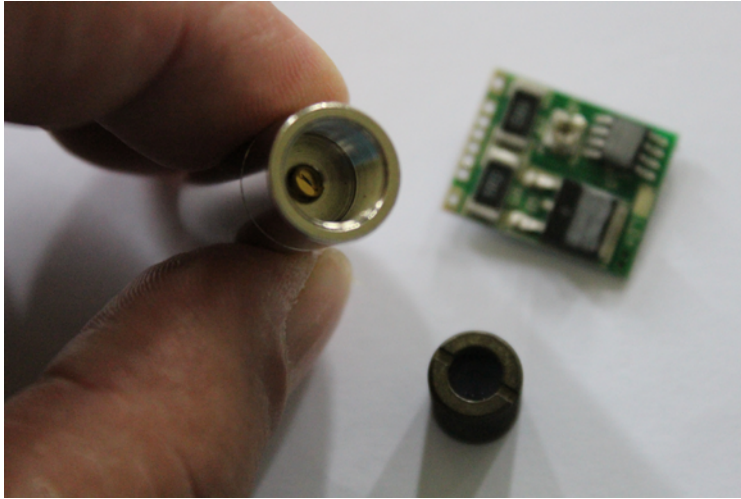


Figura 19. Láser de Nd:YLF



Figura 20. Láser de diodo



ANEXOS

1. Magnitudes enerxéticas

Potencia: enerxía por unidade de tempo $P = \frac{dE}{dt}$ (W = J/s) .

Enerxía correspondente a un intervalo de tempo T en función da potencia:

$$E = \int_T P dt.$$

Potencia media: Enerxía nun intervalo de tempo T dividida entre ese intervalo

$$P_m = \frac{E}{T}.$$

Irradiancia: potencia por unidade de área (considérase unha superficie normal á dirección de propagación da radiación), $I = \frac{dP}{ds}$ (W/m²) .

Segundo a teoría EM da luz a irradiancia é igual o módulo do vector de Poynting

Potencia ou fluxo que atravesa unha superficie A en función da irradiancia:

$$P = \int_A I ds.$$

Irradiancia media: fluxo ou potencia que atravesa una superficie determinada dividido entre o área A desa superficie, $I_m = \frac{P}{A}$.

Magnitudes espectrais: magnitudes por unidade de lonxitude de onda ou frecuencia. Exemplo: Irradiancia espectral, $I'(\lambda) = \frac{dI}{d\lambda}$ (W/m³) (irradiancia correspondente a banda de lonxitudes de onda entre λ e $\lambda + d\lambda$, dividido entre a

anchura desa banda) ou, en función das frecuencias, $I'(\nu) = \frac{dI}{d\nu}$ (W·s/m²). E a irradiancia nunha determinada banda espectral é: $I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I'(\lambda) d\lambda = \int_{\nu_2}^{\nu_1} I'(\nu) d\nu$.

2. Exercicios

1. Considera un láser pulsado de Rubí ($\lambda = 694\text{nm}$) que emite pulsos de 50 ns e dunha enerxía de 1 μJ cunha cadencia de 1000 pulsos por segundo. Cal é a potencia dun pulso e cal é a potencia media do láser? Se focalizamos o feixe nun círculo de diámetro de 1mm, cal é a irradiancia dun pulso láser? Cal é a magnitude do campo eléctrico?

2. Mídese a potencia espectral da luz emitida por un láser de He-Ne ($\lambda = 633\text{nm}$) e tense que segue a seguinte lei: $P'\lambda = \frac{A}{(\lambda - \lambda_0)^2 + k^2}$ onde λ_0 é a lonxitude de onda central da emisión láser, $A = 6 \cdot 10^{-10}\text{W}\cdot\text{nm}$ e $k = 10^{-6}\text{nm}$. Cal é a anchura espectral (en lonxitudes de onda e frecuencias) do láser? Cal é a potencia total emitida polo láser?

3. Calcular a anchura espectral (tanto en frecuencias como en lonxitudes de onda) dun feixe láser que ten a seguinte irradiancia espectral: $I'(\nu) = I_0 \exp\left[-\alpha \ln 2 (\nu - \nu_0)^2\right]$ con $\alpha = 6.4 \cdot 10^{-23}\text{s}^2$. Qué vale ν_0 se o láser é un Nd:YAG?

4. Determinade a relación entre a potencia espectral dun feixe de radiación definida no dominio das frecuencias, $P'(\nu)$, e a súa potencia espectral definida no dominio de lonxitudes de onda $P'(\lambda)$.

5. Medimos a anchura da zona iluminada por un láser de Argon ($\lambda = 514\text{nm}$) en dous planos diferentes distantes entre si 2 m. No plano máis próximo ao láser obtemos unha anchura de 1 cm e no plano máis afastado 1.4 cm. Cal é a diverxencia do feixe láser é o tamaño do mesmo a saída do láser?

6. Unha fonte puntual, cunha diverxencia de 5° ilumina unha pantalla situada a 5m da mesma. Calcula o tamaño da zona iluminada supoñendo que a diverxencia é pequena. A partires de que valor da diverxencia a aproximación de diverxencia pequena deixa de ser válida? Considera para este cálculo que un erro relativo na estimación do tamaño do feixe maior de 1 milésima é apreciable.

7. Un láser de Nd:YAG ($\lambda = 1.06\text{mm}$) de 1 mm de diámetro apunta cara a lúa. Calcula o tamaño do láser na superficie da lúa se esta está situada a unha distancia de 384000 Km da terra. Se o láser ten unha potencia de 10 W, cal é a irradiancia na superficie da lúa?

8. Iluminamos unha lente converxente cun láser de Argon. Xusto antes da lente o diámetro do feixe láser é de 2 mm é no foco da lente queda reducido a 50 mm. Se na lente a irradiancia media do láser é de 50 W/cm², canto vale esta no foco? Canto é a potencia do láser? Supón que a lente transmite practicamente toda a radiación.

9. Considera un láser de He-Ne de 0.5 mW e diverxencia de 2 mrad. Determina a irradiancia do láser na retina, se ó miramos directamente a unha distancia de 5 m,

e compara esta irradiancia coa irradiancia xusto enfronte do ollo. Supón que a retina está situada a unha distancia de 2 cm do cristalino (lente do ollo) e que toda a luz do láser penetra no ollo.

10. Certo láser de He-Ne emite un feixe de luz de 10 mW de potencia nun diámetro de 1 mm. O noso ollo, en boas condicións, é capaz de percibir ata un mínimo de 100 fotóns por segundo. Se o tamaño da pupila do ollo é de 8 mm, ata que distancia poderá ser percibido o láser anterior?

11. Unha noite, un técnico pouco coidadoso apuntou cun láser de Argon ($\lambda = 514 \text{ nm}$) a un helicóptero que sobrevoaba a unha distancia de 100 m, e cegou temporalmente o piloto (caso verídico). Se o láser tiña unha potencia de 5 W e unha diverxencia de 5 mrad, cal foi a irradiancia na retina do piloto? Supón que o diámetro da pupila é de 7 mm e que a retina está situada a 2 cm do cristalino.

12. Compara a irradiancia da imaxe do sol na retina coa obtida cun punteiro láser nas seguintes condicións:

- i) A irradiancia do sol na zoa de observación (diante do ollo do observador) é de 850 W/m^2 e o seu tamaño angular é de 0.5° .
- ii) O punteiro láser emite 5 mW a 640 nm cunha diverxencia de 1 mrad e está situado a 5 m do observador.
- iii) O diámetro da pupila do observador é de 3 mm e a distancia focal do ollo de 16.7 mm.

NOTA: Considerade o ollo como un sistema óptico sinxelo que contén un diafragma (a pupila), unha lente (o cristalino) e unha capa detectora (a retina) situada no plano focal da lente.



Unha colección orientada a editar materiais docentes de calidade e pensada para apoiar o traballo do profesorado e do alumnado de todas as materias e titulacións da universidade

unidadesdidácticas
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA