



激光原理

《激光原理》

齐新元

地 址：物理系209-2室

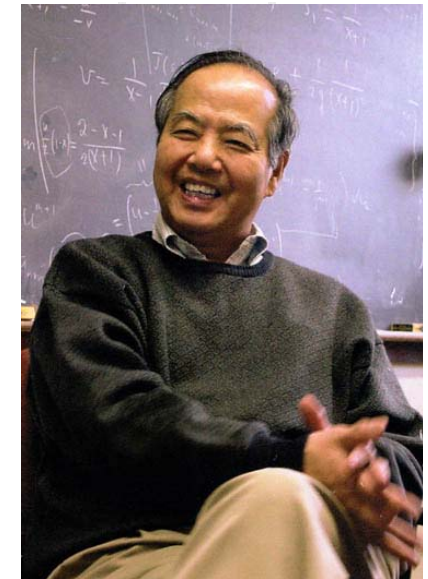
E m a i l : q i x y c n @ f o x m a i l . c o m

电 话：18729228900

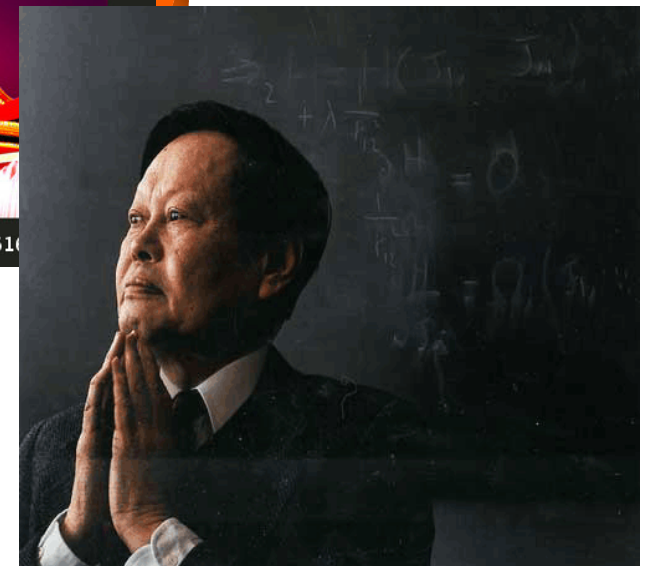
物理学
原理



本科



李政道



杨振宁



1905年是科学史上较为特殊的一年，创造奇迹的一年。当时默默无闻的爱因斯坦（26岁）发表的5篇论文（涉及光电效应、布朗运动和狭义相对论）彻底改变了传统的物理学，也为造福后世的诸多技术奠定了基础。

2005年—国际物理年 World Physics of the year
（联合国通过大会决议）

“爱因斯坦年”（德、英等国直接命名）
恰逢爱因斯坦逝世50周年



学好数理化，走遍天下全不怕



电子、生物和经济等新兴学科的吸引力 ↑



主宰上世纪发展的科学界，正在缓慢而又令人痛苦地衰落，有青黄不接的危机。(法新社

21世纪是否会出现第二个爱因斯坦？



物理宏观领域：宇宙学的一些基本问题，如暗物质、暗能量的来源、组成和性质。

物理微观领域：人类对物质组成的认知还需要更为深入

激光原理

物理学发挥“用”的功能：研究繁杂系统，让物理学为能源、材料、信息和环境问题提出解决方案及与其他学科的交叉和渗透。

《Nature》杂志社论：“在下一次(物理学理论)革命前，物理学的主要成就将出现在工程领域。正在从事这方面工作的物理学家如果保持沉默，是可耻的……物理学不仅是要了解我们的宇宙，而且也致力于制造有用、有时也是激动人心的事物。”

物理工程



电子学—研究电子作为信息和能量载体的科学

光子学—研究光子作为信息和能量载体的科学

光子技术—□相干光的产生 ➡ **激光原理**（54学时）

激光原理

□相干光的控制（调制、偏转）

光频率（波长）变换 ➡

□相干光的检测及应用

激光技术

光电子技术

电子技术—

光与电是“兄弟”，光只是波长更短的电磁波

光电子学是汇集光子学、电子学、光子技术与

电子技术的一门学科

光电子学原理



一些相关的重要学术刊物 (SCI收录期刊)

Nature

Science

激光原理

Physics Review Letters (PRL) 7.0

Applied Physics Letters (APL) 3.8

Optics Letters (OL) 3.4

Optics Express (OE) 3.7

Journal of Applied physics (JAP) 2.281

IEEE Photonic technology Letters (PTL) 2.1

IEEE Journal of Quantum Electronics (JQE)

2.097

Journal of Lightwave Technology (JLT) 1.983



※ 教学大纲：第八章、第九（不讲）

※ 重点：第六章、第七章

※ 教学手段：

上课内容：演示文稿

课堂练习：课前或课后（10min.）

课后作业：周二课前交，下课后补交按迟交处理

习题讲评&课堂讨论：2-3次

考试方式：期中（学习总结）& 期末（闭卷）

※ 成绩：考勤+作业+练习 20%

期中 20%

期末考查 60%



※ 课堂纪律：上课时不准吃、喝；关闭手机；

上课期间不得随意离开教室

※ 激
光
原
理 学风建设：主动积极听课，把心留在教室里，
认真独立完成作业

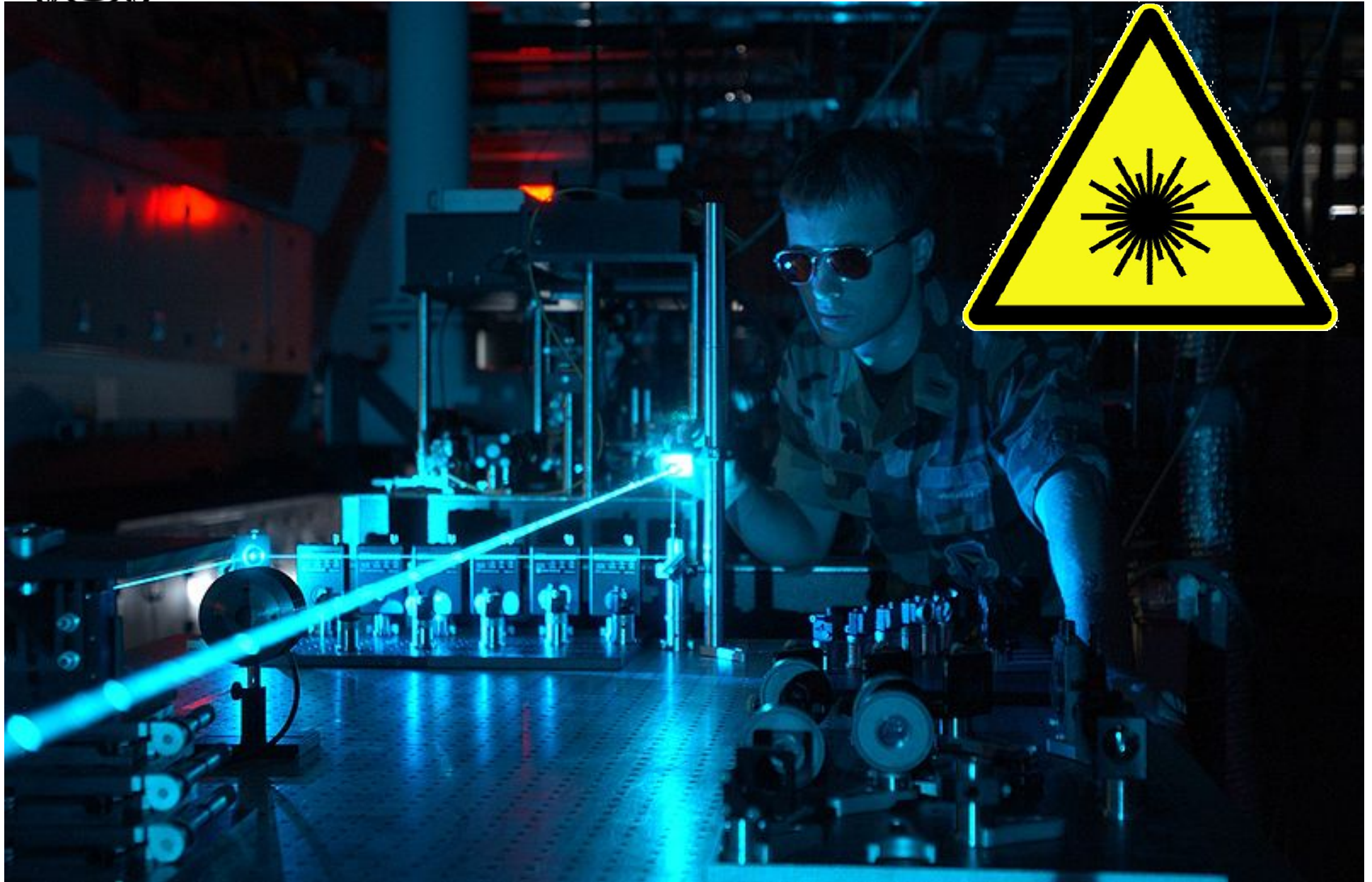
端正态度，不要有投机取巧的侥幸心理

处理好课程学习和考研，出国准备的矛盾

物理学
原理



激光---危险---安全---保护眼睛





激光发展的历史回顾

LASER -- *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

激光原理

- 科学技术发展规律

基础理论研究 → 应用技术 → 产品开发 → 产业

- 基础理论研究是构筑科学大厦的基石
- 为激光发展进行探索的科学家

科学
原理



第一章 激光概论

一、激光学科梗概

1、激光原理(Laser Principle)

激光原理

激光原理是在激光的产生、形成、输出、传播和应用过程中，带有普遍性的、最基本的规律。它是研究激光器件、技术及应用开发的规律及特性的理论基础之一。

物理
原理



1917: 爱因斯坦(A.Einstein)

提出了受激辐射可实现光放大的概念, 为激光发明奠定了理论基础

1917年以后近四十年内:

量子理论的发展; 粒子数反转的有效实现; 电子学与微波技术的发展

1954: 美国汤斯(C.H.Townes)

前苏联巴索夫(N.G.Basov)

普洛霍洛夫 (A.M.Prokhorov)

第一次实现氨分子微波量子振荡器(MASER)



1958年：美国汤斯(Towns)与肖洛(A.L.Schawlow)提出利用开放式光学谐振腔实现光振荡的新思想；

布隆伯根(N.Bloembergen)提出利用光泵浦三能级系统实现粒子数反转分布的新构思

1960年.7：美国休斯公司实验室梅曼(T.H.Maiman)世界上第一台红宝石固态激光器诞生

1961年，我国的邓锡铭、王之江制成我国第一台红宝石激光器。

1997年：朱棣文、菲利普(W.Phillips)和塔罗季(C.Tannoudi)利用激光冷却和钳制原子的研究

2000年：赫伯特·克雷歇尔(H.Pressel)，提出了双异质结构，实现半导体激光器室温工作。



追寻成功者的足迹，给人必要的启迪

- 任何一项发明都是一批科学家前仆后继，大胆探索的结果，
- 勤奋，善于学习，抓住机遇，把握科学前沿。
- 大胆设想，勇于创新，勇于实践，锲而不舍。

激光的发明使光学领域的研究出现新的活力。激光一方面为成熟的领域中现有的各种应用技术带来数量级的改善，另一方面又开辟了一些新的领域和新的应用和新学科。

- 全息术 - D.Gaber，不实用技术 → 成为可能
- 光通信 - 室温工作的双异质结半导体激光器和掺铒光纤放大器带来了光通信的革命性变化
- 国防安全



Components of the first ruby laser

Power

100%-reflective
mirror

Quartz flash tube

Ruby crystal

• Atom
• Photon

• Atom
• Photon

• Atom
• Photon

• Atom
• Photon

物理
工程



产生激光振荡的装置设备主要由三部分组成：

1) 工作物质：激光器的核心，激光产生和形成的物质基础和场所。

2) 激励系统：激光产生和形成过程中供给能量，使工作物质处于激活状态的条件保证。

3) 谐振腔：激光产生和形成过程中提供光学反馈，限制、选择光场分布的模式和影响激光输出光束特性的，由两片或两片以上的反射镜组成的光学装置。

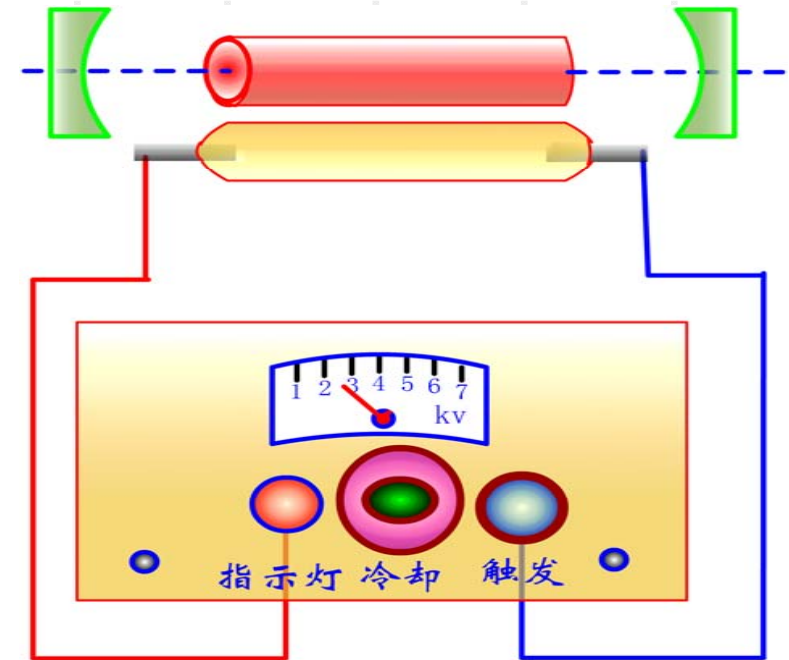


图1-3-1 固体激光器示意图

Solid lasers scheme



三、激光原理课程的介绍

激光原理

1) 讲述内容: 激光的产生、形成、输出和传播过程中的基本规律和机理。

2) 涉及对象: 工作物质、谐振腔、腔内光场及传输的光学系统。

3) 讨论重点: 组成工作物质的粒子 (原子、分子、离子和电子) 体系与光频电磁场间相互作用; 谐振腔结构与腔内激光场的分布形态; 激光束及其传播特征。

4) 理论处理: 主要采用经典理论和速率方程处理。

5) 涉及的理论: Maxwell电磁理论、量子力学理论、热力学统计物理理论、几何光学和波动光学理论、光线矩阵传输理论、电子学与光电子学理论、光谱原理与光谱技术等。

物理
原理



四、激光的理论

对激光过程的描述就涉及两个对象：一是光频电磁场；二是与光场之间发生相互作用的组成激光工作物质的粒子（原子、分子、离子等）体系。

根据对此二者之间相互作用过程采用模型、描述方法的不同激光理论可分为：

(1)全量子理论

光的受激辐射和自发辐射过程都是典型的量子力学效应。因此，激光理论应是一个全量子化理论。

(2)半经典理论

将光频电磁场视为满足Maxwell方程组的经典电磁场，而将工作物质原子之中的电子视为服从量子力学规律的微观粒子。



(3)经典理论

用经典Maxwell方程组描述光频场，以经典电偶极子描述原子，光与原子的相互作用归结为电磁场与电偶极子之间的作用，整个经典辐射理论体系属于电动力学范畴。

它是处理谐振腔与激光传输等问题的理论基础，能定性地解释原子的自发辐射及线宽、光的吸收和放大等光与物质相互作用的现象。

(4)速率方程

把光频电磁场看成量子化的光子，把物质体系看成具有量子化能级的粒子体系，忽略光子的相位和数量涨落起伏的特征，是全量子理论的一种简化形式。

描述激光的光强特性，近似地描述烧孔效应、兰姆凹陷及多模竞争等特性。



五、经典理论：

各向同性介质中光的波动方程

在有介质存在时，**Maxwell**方程组的微分形式为

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases}$$

该方程组对于物理性质连续的空间各点都成立。



由于是有介质存在的，因此还必需满足物质方程：

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \\ \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{cases}$$

在线性极化近似下：

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$$

考虑到物质方程，则Maxwell方程可化为：

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \\ \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \end{cases}$$



在线性各向同性均匀介质中， $\vec{M} = \mathbf{0}$ ，从Maxwell方程组可推出对光现象起主要作用的电场强度所满足的波动方程，对上面第一式两边取旋度

激光原理

利用矢量关系

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \frac{\partial (\nabla \times \vec{H})}{\partial t}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$$

由以上各式可得：

$$\nabla^2 \vec{E} - \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) = \mu_0 \frac{\partial \sigma \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}$$

物理
原理



如果所考虑的是均匀各向同性介质，电磁波是在不包含电荷的非导体介质中传输，则 $\sigma=0$, $\vec{J}=\sigma\vec{E}=0$ ，电荷密度 $\rho=0$ ，因而 $\nabla \cdot \vec{E}=0$ ，则得到光在非导体中传输的波动方程式为：

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}$$

上式是线性光学的基本方程，它描述了各向同性均匀介质中的所有光学现象。但是不能描述光波在等离子体(导体)、磁化介质和双折射晶体中的传输。



六、光的本质(Nature of Light)

光的量子学说认为,光是一种以光速 c 运动的光子流。粒子属性(能量、动量、质量等)和波动属性(频率、波矢、偏振等)密切联系。

光的基本属性可归纳如下(5条):

(1)光子的能量 ε 与光波频率 ν 对应

$$\varepsilon = h\nu$$

(2)光子具有运动质量 m , 并可表示为

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$$

光子的静止质量为零, 也即在自然界中没有静止光子存在。



(3)光子的动量 \vec{p} 与单色平面光波的波矢 \vec{k} 对应

$$\vec{p} = mc\vec{n}_0 = \frac{h\nu}{c} \vec{n}_0 = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}_0 = \hbar \vec{k}$$

\vec{n}_0 为光子运动方向 (平面光波传播方向) 上的单位矢量。

(4)光子具有两种可能的独立偏振状态，对应光波场的两个独立偏振方向。

(5)光子具有自旋

其自旋量子数 $S=1$ 为整数，故光子为玻色子，它的状态的分布集合服从量子统计中玻色-爱因斯坦统计规律，即处于同一状态中的光子数目是没有限制的。



七、模式、状态与简并度

1、从波动的观点推导光波模式数

从场的波动理论，也即从光的经典电磁理论来看，光的运动服从Maxwell方程组。

对于在给定空间内任一点处光(电磁场)的运动情况，在初始条件和边界条件确定后，原则上就可以通过求解Maxwell方程组获得。

一般可得到许多解，而且这些解的任何一种线性组合都可满足Maxwell方程组。每一个特解，代表存在于所给定的空间内的一种电磁场(光)的分布形态，即表示电磁场(光)的一种本征状态。



在光频域，一种光的模式对应Maxwell方程组的一个特解，代表具有一定偏振、一定频率、一定传播方向和一定寿命的光波。由此，可求得在给定空间体积内，所可能存在的光波模式的数目 g 。

下面讨论光在如图所示的体积为 V 的各向同性介质中运动时，可能存在的模式数目，为简明清晰分三种特定情况讨论。

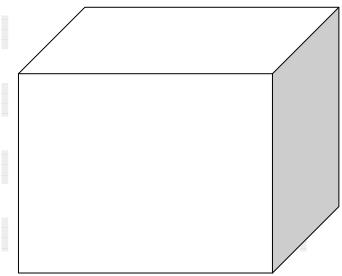


图1.6.1 体积为 V 的各向同性介质空间

- (1) 偏振和频率一定，传播方向不同，可能存在不同模式。
- (2) 偏振和传播方向一定，频率不同可能存在的模式数。
- (3) 偏振状态不同而可能存在的模式数。



(1) 偏振和频率一定，因传播方向不同，可能存在的模式数目

由波动光学可知，各种模式的光，在传播方向上的区别由其衍射来决定。

假设光波为平面波，任何两个模式的光束在方向上必须相差一个平面波的衍射角，才能分辨开来 (瑞利判据)，对于从尺度为 d 的光源发出的波长为 λ 的光，因衍射限制，在距光源 R 处所张的立体角为：

$$\Delta\Omega = \frac{ds}{R^2} \approx \left(\frac{\theta}{2} R\right)^2 \frac{\pi}{R^2} = \frac{\pi}{4} \theta^2 \approx \theta^2 \approx \left(\frac{\lambda}{d}\right)^2$$



若取衍射孔径 d 的大小为单位尺寸，则有

$$\Delta \Omega = \lambda^2$$

因此在整个空间 4π 立体角内，在单位体积中可以分辨出的模式数为：

$$\frac{4\pi}{\Delta \Omega} = \frac{4\pi}{\lambda^2}$$

(2)传播方向和偏振一定，频率不同可能存在的模式数目

设频率分布在 $\nu - \nu + \Delta \nu$ 内，一个寿命为 Δt 的光波波列，根据测不准关系：

$$\delta \varepsilon \Delta t \approx h, \quad \delta \varepsilon = h \delta \nu, \quad \delta \nu = \frac{1}{\Delta t}$$

式中 $\Delta t = l_c / c$ ， c 为光速， l_c 为光波列长度，所以 $\delta \nu \approx c / l_c$ ，两个光波的频率之差大于 $\delta \nu$ 时，才能在测量中分辨出来。

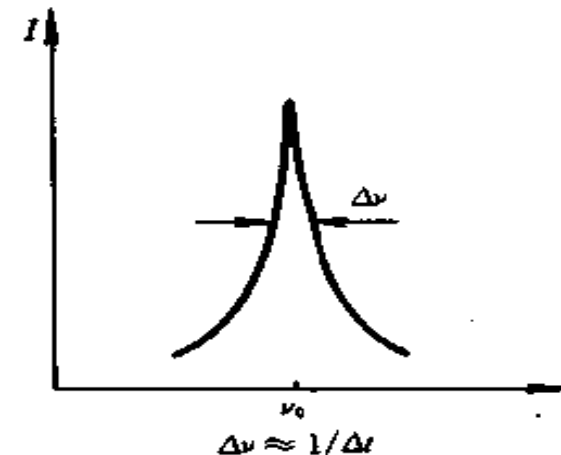
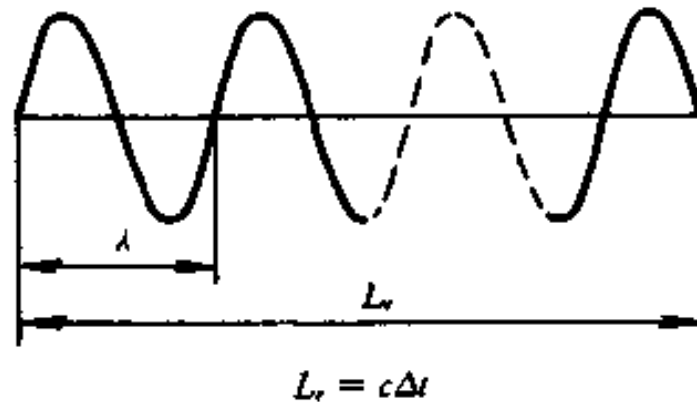


在 $\nu - \nu + \Delta \nu$ 频率间隔内的光，可能有模式数为

$$\begin{cases} \delta \nu = \frac{1}{\Delta t} \approx \frac{c}{l_c} \\ \frac{\Delta \nu}{\delta \nu} = \frac{l_c \Delta \nu}{c} \end{cases}$$

若光波的波列长度为单位长度，即 $l_c=1$ 时，则上式成为：

$$\frac{\Delta \nu}{\delta \nu} = \frac{\Delta \nu}{c}$$



单原子发光的光波列和频谱



(3) 偏振状态不同而可能存在的模式数

具有任意偏振状态的单色平面波，都可以分解为两个振动方向互相垂直的、且彼此有一定相位关系的线偏振光波，所以互相垂直的两个线偏振态是描写光偏振特性的两个独立的偏振状态。

对于给定的传播方向和频率的光，就可能有两种不同的独立偏振态，当然最多也只可能有**两种不同的模式**。



在单位体积中，频率从 ν — $\nu + \Delta \nu$ 间隔内，因传播方向、频率及偏振状态的不同，所可能存在的光波模式数为：

$$\frac{g}{V} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \times \frac{\Delta \nu}{c} \times 2 = \frac{8\pi}{\lambda^2} \frac{\Delta \nu}{c} = \frac{8\pi \nu^2 \Delta \nu}{c^3}$$

在体积 V 中，频率从 ν — $\nu + \Delta \nu$ 间隔内，光波的模式数为：

$$g = \frac{8\pi \nu^2 \Delta \nu}{c^3} V = \frac{8\pi}{\lambda^3} \frac{\Delta \nu}{\nu} V$$

对于光频段 g 通常是一个很大的数目，如 $V=1\text{cm}^3$ ， $\nu=10^{14}\text{Hz}$ ， $\Delta \nu=10^{10}\text{Hz}$ ，则得 $g=10^8$ ，对于微波段的频率范围为 $10^9\sim 10^{11}\text{Hz}$ ，波长范围约为 $10^{-3}\sim 10^{-1}\text{m}$ ， g 通常不大。



2、从粒子的观点讨论光波的状态数

在经典力学中，质点运动状态完全由其坐标(x, y, z)和动量(p_x, p_y, p_z)确定，可以用广义笛卡尔坐标所描述的六维空间来描述质点的运动状态。六维空间被称为了相空间，在相空间内，一个点表示质点的一个运动状态。

由光子的量子统计理论可知，光子的运动状态与经典宏观质点的运动有着本质的区别，不能用相空间中的一点来代表，受量子力学测不准关系的制约。



测不准关系表明微观粒子的坐标和动量不能同时准确测定，位置测得越准确，动量就越测不准。

对于一维运动情况，测不准关系表示

$$\Delta x \Delta p_x \approx h$$

三维情况下的测不准关系

$$\Delta x \Delta y \Delta z \Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z \approx h^3$$

相空间体积元，只能对应光子的一种状态，即在相空间体积元 h^3 内的各点，物理上是不能区分的，因而属于同一状态。



因此，在六维相空间 (x, y, z, p_x, p_y, p_z) 内，光子的一种状态所对应的相体积元为：

$$\Delta x \Delta y \Delta z \Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z \approx h^3$$

称为**相格**。相格是相空间中用任何实验手段所能分辨的最小尺度。光子的某一运动状态只能定域在一个相格中，但不能确定它在相格内的对应位置。

在以动量 p_x 、 p_y 、 p_z 组成的动量空间内，光子的一种运动状态占据的体积元为：

$$\delta p = \Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z \quad \longrightarrow \quad \delta p = \frac{h^3}{\Delta x \Delta y \Delta z} = \frac{h^3}{V}$$



在频率 $\nu—\nu+\Delta\nu$ 间隔内，因光子的动量不同，所可能存在的状态数，相当于光子在动量球壳内的光子数：
半径为 $p=h\nu/c$ ，厚度为 $dp=h\Delta\nu/c$ 的球壳。

再考虑光子可能存在两种不同的偏振状态，由此得到在体积 V 中，频率 $\nu—\nu+\Delta\nu$ 间隔内，因能量、动量及偏振状态的不同所可能存在的光子状态数为：

$$g = \frac{4\pi p^2 dp}{\delta p} \times 2 = \frac{8\pi p^2 dp}{h^3/V} = \frac{8\pi \nu^2 \Delta\nu}{c^3} V = \frac{8\pi}{\lambda^3} \frac{\Delta\nu}{\nu} V$$

这表明从波动的观点得到的光波模式与从光子的观点得到的量子状态是相同的。



3、光波模式与光子的量子状态

光的模式和光子的量子状态两者在概念上是等效的。在给定的体积内，可能存在的光波的模式数目等于光子的运动状态数，所以一种光波的模式对应光子的一种量子状态，在六维相空间占据一个相格。

现在考虑在空间 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 体积内驻波形式的光模式。

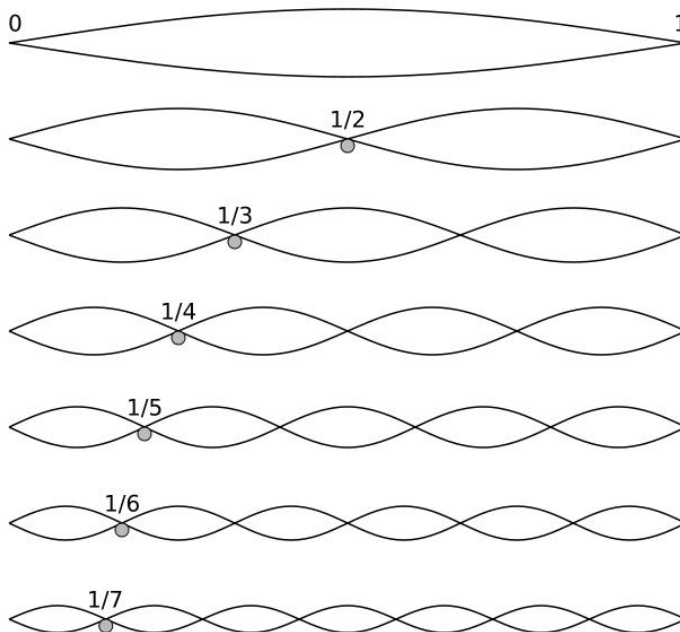
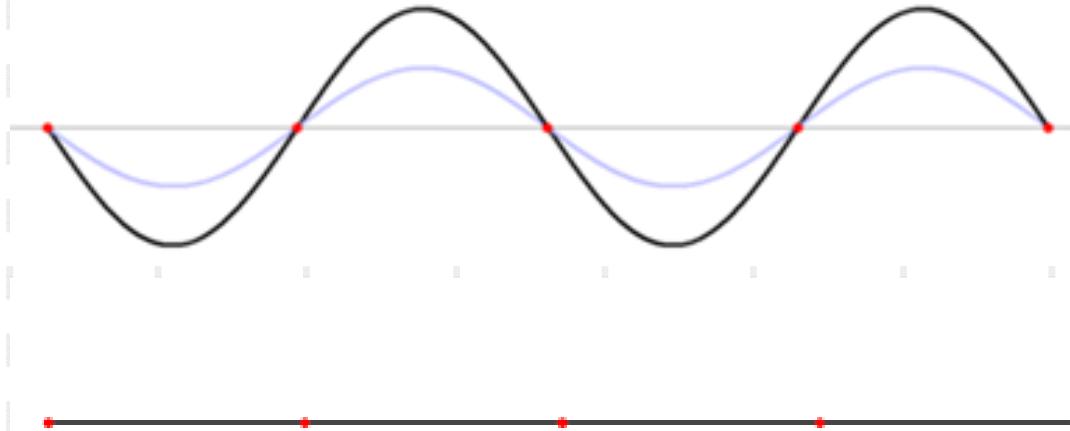
驻波场：

往返一周位相变化为 2π 整数倍的条件，从而形成驻波形式，即沿光轴方向相反，振幅、频率相同两列波叠加的结果。



激光原理

量子力学



因此，一个光波模式在动量相空间 p_x 、 p_y 、 p_z 方向所占的尺度可表示为

$$\begin{cases} \Delta p_x = 2\hbar \Delta k_x \\ \Delta p_y = 2\hbar \Delta k_y \\ \Delta p_z = 2\hbar \Delta k_z \end{cases}$$



沿三个坐标轴方向传播的波分别应满足驻波条件:

$$\begin{cases} \Delta x = m \frac{\lambda}{2} \\ \Delta y = n \frac{\lambda}{2} \\ \Delta z = q \frac{\lambda}{2} \end{cases}$$

式中 m 、 n 、 q 为正整数, 而波矢量 \vec{k} 的三个分量应满足下列条件:

$$\begin{cases} k_x = \frac{\pi}{\Delta x} m \\ k_y = \frac{\pi}{\Delta y} n \\ k_z = \frac{\pi}{\Delta z} q \end{cases}$$

每一组 m 、 n 、 q 对应于腔内的一种模式 (包括两种偏振态)。



如果以 k_x, k_y, k_z 为坐标轴，在波矢空间中表示光波模，每个模对应波矢空间的一点，每个模式在三个坐标轴方向与相邻模的间隔为

$$\begin{aligned}\Delta p_x \Delta p_y \Delta p_z \Delta x \Delta y \Delta z &= 2 \frac{h}{2\pi} \Delta k_x 2 \frac{h}{2\pi} \Delta k_y 2 \frac{h}{2\pi} \Delta k_z \Delta x \Delta y \Delta z \\ &= \frac{h^3}{\pi^3} \frac{\pi}{\Delta x} \Delta m \frac{\pi}{\Delta y} \Delta n \frac{\pi}{\Delta z} \Delta q \Delta x \Delta y \Delta z \\ &= h^3\end{aligned}$$

可见，一种光波模式在相空间也占一个相格，所以光波模式和光的量子状态在物理概念上是等效的，模式表示光波在时空中存在的形态，即代表可以相互区分的光子的量子状态。



4、光子简并度 δ

(1) 热平衡状态下（玻尔兹曼分布）的光子简并度

当体系处于热平衡状态时，光子出现在能量为 $\varepsilon_i = h\nu_i$ 状态的最可几的光子数目为

$$n_i = \frac{g_i}{e^{h\nu_i/kT} - 1}$$

同一个能级，可以存在大量不同状态（ g_i 个态）的光子，每个态的平均光子数 δ 乘以状态数 g_i 即得最可几光子数 n_i 。

当光波场与物质间的相互作用处于热平衡态时，处于能量 ε_i 的每一个运动状态的平均光子数为

$$\delta = \frac{n_i}{g_i} = \frac{1}{e^{h\nu_i/kT} - 1} \quad g_i \text{ 为状态数。}$$



(2)非热平衡状态下的光子简并度与光源的单色亮度

在非热平衡状态下，光子的分布规律一般无法用简单的数学解析式表达。如果光辐射为准平行、准单色辐射，这可按以下方法粗略估算每个状态内平均光子数的近似值。

设光束截面为 Δs ，空间立体发散角为 $\Delta \Omega$ ，频宽为 $\Delta \nu$ ，平均功率为 P ，则 Δt 时间内流过 Δs 截面内的总光子数为：

$$n = \frac{P \Delta t}{h \nu}$$



在频率 ν — $\nu + \Delta \nu$ 范围、分布在立体角 $\Delta \Omega$ 内的光子状态数得

$$g_{\Delta \Omega} = \frac{\Delta \Omega}{4\pi} g = \frac{2\nu^2 \Delta \nu}{c^3} V \Delta \Omega = \frac{2\Delta \nu}{\lambda^2 c} V \Delta \Omega$$

在 Δt 时间内，光束在垂直于 Δs 截面时，光束所占据的空间范围应为：

$$V = \Delta s \Delta t c$$

准平行准单色辐射光按不同状态平均算得的光子简并度：

$$\delta = \frac{n}{g_{\Delta \Omega}} = \frac{P \Delta t / h\nu}{\frac{2\nu^2 \Delta \nu}{c^3} \Delta s \Delta t c \Delta \Omega} = \frac{P}{\frac{2h\nu}{\lambda^2} \Delta s \Delta \nu \Delta \Omega} = \frac{\lambda^2}{2h\nu} B_\nu$$



B_v 为光源的光辐射单色辐射亮度

$$B_v = \frac{P}{\Delta s \Delta \nu \Delta \Omega}$$

由此可见，对于频率确定的光辐射源，光子简并度与单色辐射亮度成正比，由于激光器的单色辐射亮度很高，所以，激光是一种高光子简并度的光。

光子简并度具有几种相同含义：同一状态内的光子数；同一模式内的光子数；相空间同一相格内的光子数；同一相干体积内的光子数。



八、激光的特性与激光光谱

1、激光的特性

(1)高方向性

在单模和均匀介质时，激光的发散角 θ 已接近衍射极限角 θ_m

$$\theta_m = 1.22 \frac{\lambda}{d} \approx \frac{\lambda}{d}$$

一般激光器输出的激光光束发散角为毫弧度(mrad)数量级。如果折合成立体角，激光输出的能量是在 10^{-6} 立体角内。



(2)高单色性

同一种粒子从一个高能级 E_2 跃迁到另一个低能级 E_1 而发出的光，其频率为 ν ，称这种粒子发射了一条频率为 ν 的光谱线。

实际上，光谱线总有一定的频率宽度 $\Delta \nu$ ，这是由于粒子的激发态总是有一定的宽度(称自然宽度)引起的。除此之外，由于粒子发光过程中受到外界干扰(如受到其他粒子的碰撞)或由于发光粒子的运动(多普勒效应)也会使谱线进一步加宽。



激光原理

在普通光源中，氪同位素灯发出的波长 $\lambda=605.7\text{nm}$ 的光谱线的单色性最好。在低温条件下，其宽度 $\Delta \nu = 4.7 \times 10^{-4} \text{ nm}$ 。

单模稳频氦氖激光器所发出的 $\lambda=632.8\text{nm}$ 的激光，其宽度可窄至 $\Delta \nu < 10^{-8} \text{ nm}$ 。

科学
物理



(3)高亮度

设光源的发光面积为 ΔS ，时间 Δt 内向着其法线方向上的立体角 $\Delta \Omega$ 范围内发射的辐射能量为 ΔE ，光源表面在该方向上的亮度 B 等于

$$B = \frac{\Delta E}{\Delta \Omega \Delta S \Delta t} = \frac{p}{\Delta \Omega \Delta S}$$

上式表示， B 等于单位面积的光源在其法线方向上的单位立体角范围内传输的辐射功率。

由上式可以看出，在其他条件不变的情况下，光束的立体角 $\Delta \Omega$ 越小，亮度 B 就越高；发光时间 Δt 越短，亮度 B 也就越高。



光源的单色辐射亮度定义为:

$$B_{\nu} = \frac{B}{\Delta \nu} = \frac{\Delta E}{\Delta \Omega \Delta S \Delta \nu \Delta t} = \frac{p}{\Delta \Omega \Delta S \Delta \nu}$$

影响光源辐射亮度的三个因素:

1) 光束的立体角 $\Delta \Omega$ 。

由于一般激光光束的立体角 $\Delta \Omega$ 可小至 10^{-6} 的数量级, 而普通光源发光的立体角要比前者大百万倍左右, 因此即使两者在单位面积上的辐射功率相差不大情况下, 激光的亮度也应比上述普通光的亮度高上百万倍。



2) 发光的时间 Δt 。

红宝石激光器被脉冲氙灯激励一次而发出的激光的时间 Δt 为 10^{-4}s ，在 Δt 的时间内输出辐射能量 1J ，其功率可高达 10^4W 。

利用调 Q 和锁模等技术，进一步把一定的辐射能量压缩在很短的时间突然发射出去，还能大大提高输出功率。

例如，一台调 Q 的红宝石激光器，每个脉冲的输出功率达 10^9W ，发散角约为几个毫弧度，它比普通光源中以高亮度著称的高压脉冲氙灯的亮度还要高几十亿倍。



3) 窄脉冲

由于激光所辐射的光谱颜色非常纯，辐射光的光谱范围非常窄， $\Delta\nu < 10^{-8}\text{nm}$ ，单色性好。因此，其单色辐射亮度比太阳表面高出**100**万亿倍。

由以上讨论可以看出，正是由于激光能量在空间、时间及频率上的高度集中，才使得激光具有普通光源辐射所无法比拟的高亮度。



(4) 高相干性

时间相干：在间隔不大于 τ_c 的两个不同时刻发出的光，经过不同的路程后在空间汇合时，尚能发生干涉，则称此两部分光具有时间相干性。

相干长度 l_c \longrightarrow 可发生干涉现象最大光程差

$$\tau_c = \frac{1}{\Delta \nu}$$

$$l_c = c\tau_c = \frac{c}{\Delta \nu} = \frac{v\lambda}{\Delta \nu} = \left| \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} \right|$$

如普通光源中相干性最好的氪的650.7nm的谱线，
 $\Delta \lambda = 4.7 \times 10^{-3} \text{nm}$ ， $l_c = 0.385 \text{m}$ 。

激光输出波长为632.8nm的氦氖激光器， $\Delta \lambda < 10^{-8} \text{nm}$ ， l_c 可达几千米。



2、激光光谱学

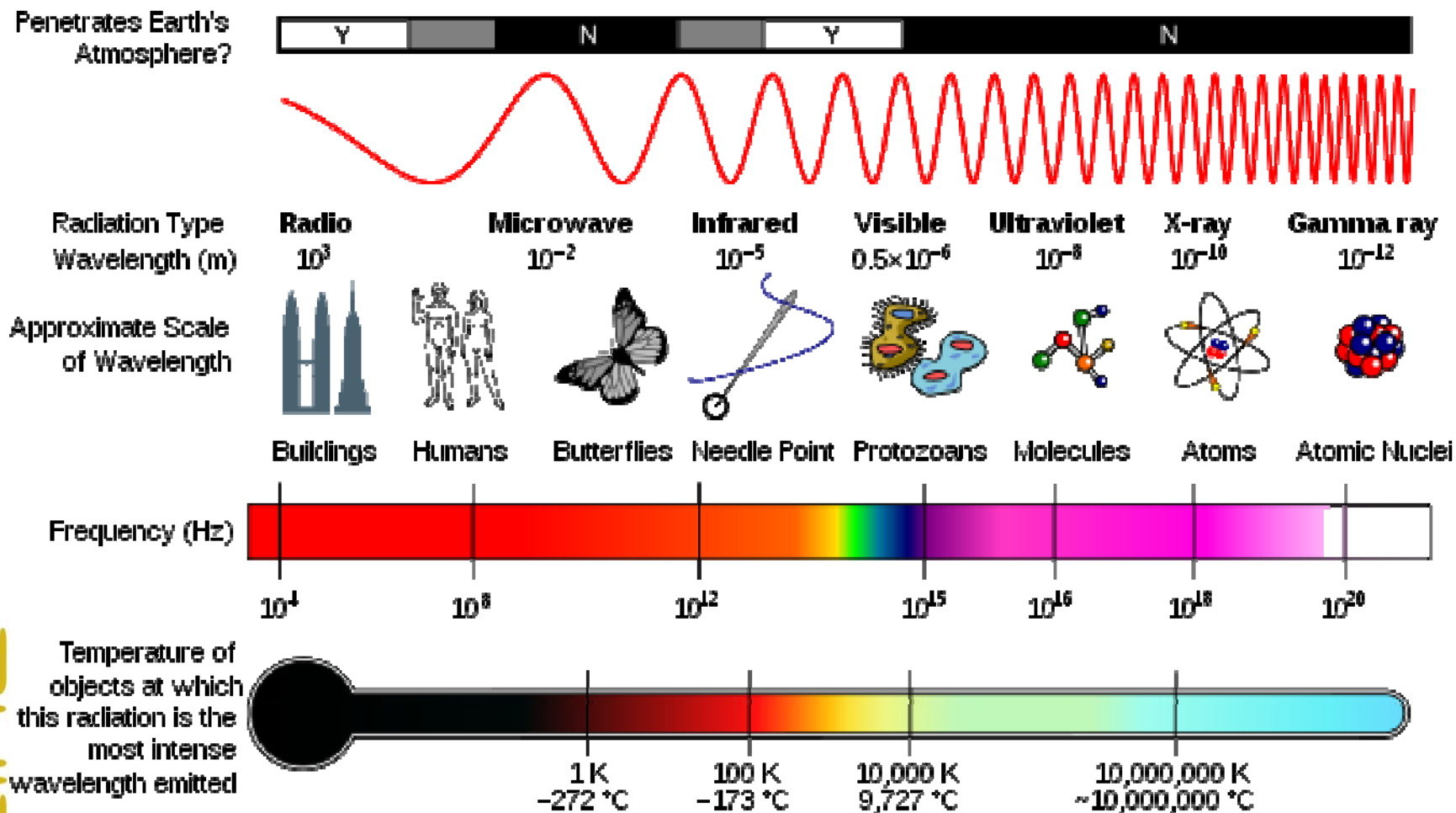
激光光谱学是一门研究激光代替常规光源对原子或分子等微观粒子进行探测，以测定其各种物理参量的学科。

激光在光谱学中的应用，是**由于激光的高强度和窄频宽的性质决定的**，所以激光能够有选择地激发原子或分子到达特殊的能级。并进一步被用来研究这些受激态其后的衰变。



把电磁波按照波长的长短或频率的高低顺序进行排列
所得到的有规则的序列集合，称为电磁波谱。

激光原理



科学



激光引入光谱分析后，极大扩展和增强了光谱分析能力：

分析的灵敏度大幅度提高；

光谱分辨率达到超精细程度；

可进行超快（**10-100 fs**量级）光谱分析；

把相干性和非线性引入光谱分析；

光谱分析用的光源波长可调谱。



根据应用领域的不同将光谱学进行分类:

- (1)非线性光谱学
- (2)高分辨光谱学
- (3)时间分辨光谱学
- (4)高灵敏光谱学
- (5)交叉光谱学



激光器件的分类

按照工作物质划分：

固体、气体、液体、半导体、光纤、化学、有机物质、自由电子、原子和X射线等十类激光器。

按运转方式可分为：

连续式运转激光器、单脉冲式运转激光器、重复频率式运转激光器、 Q 突变式运转激光器、波型(模式)可控式运转激光器等。

波型(模式)可控式运转激光器又可分为：单波型(选纵模、选横模)激光器、稳频激光器、锁模激光器、变频激光器等。



按激励方式划分为:

光泵式激光器(泵浦灯激励和LD激光激励又分端面泵浦、侧面泵浦)、电激励式激光器、化学反应式激光器、热激励式激光器和核能激励式激光器等。

按谐振腔类型划分:

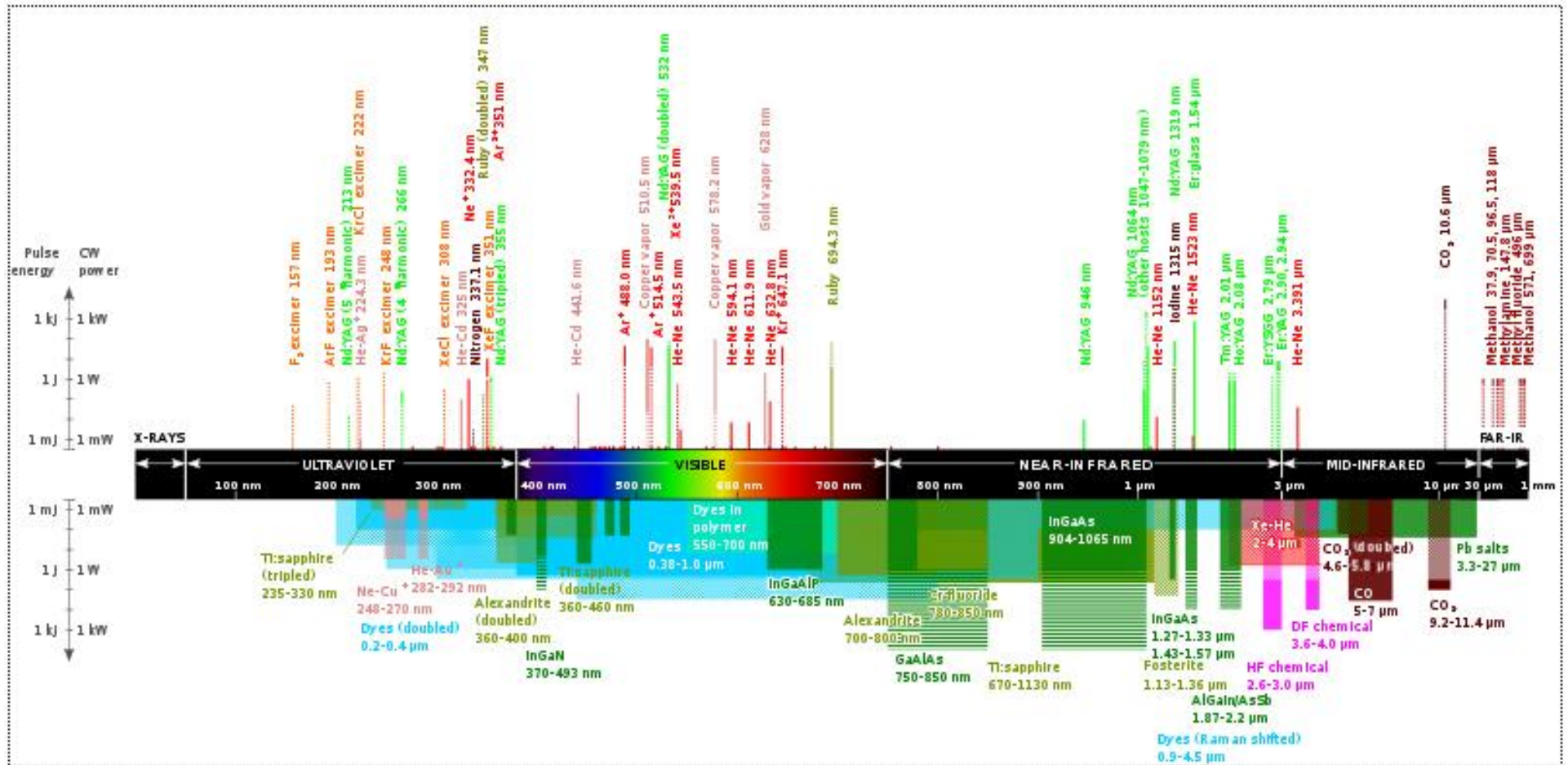
稳定腔激光器、临界腔激光器和非稳腔激光器等。

按谐振腔的几何形状划分:

平—平腔激光器、平—凹腔激光器、双凹腔激光器、凹—凸腔激光器、双凸腔激光器等。



按激光器输出的中心波长所属波段划分:



微波段激光器、远红外段激光器、中红外段激光器、近红外段激光器、可见光段激光器、紫外段激光器 及X射线段激光器等。

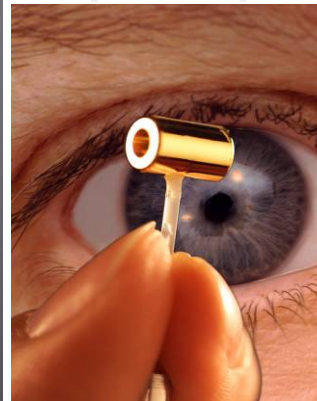
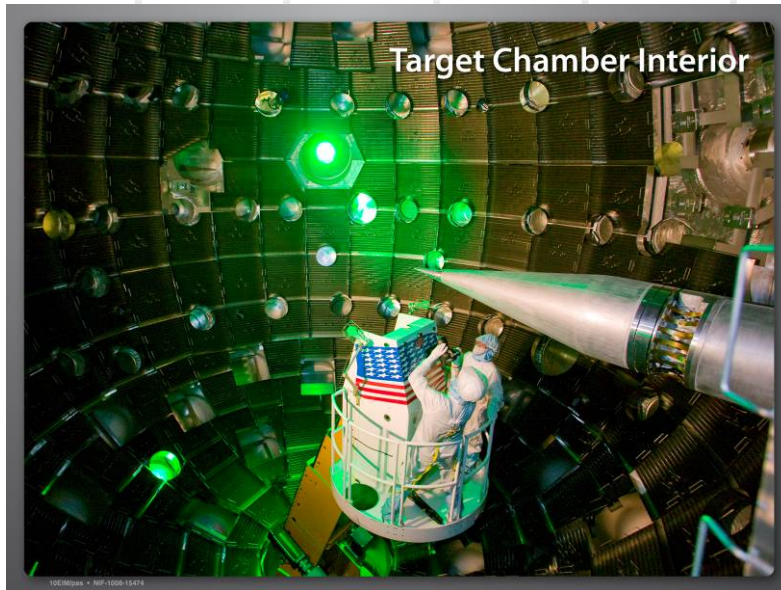


3、典型激光器件简介

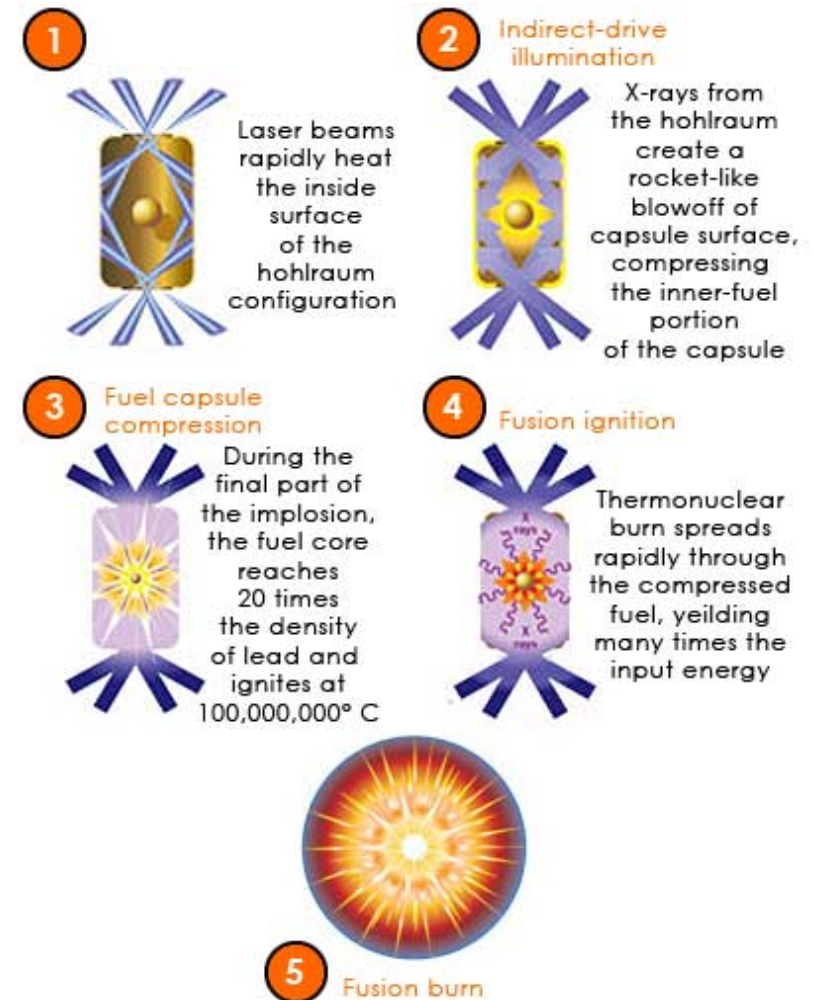
- (1) 固体激光器
- (2) 气体激光器
- (3) 半导体激光器
- (4) 光纤激光器
- (5) 液体激光器
- (6) 化学激光器
- (7) 自由电子激光器
- (8) 原子激光器
- (9) X射线激光器
- (10) 有机物质激光器



Laser Ignition

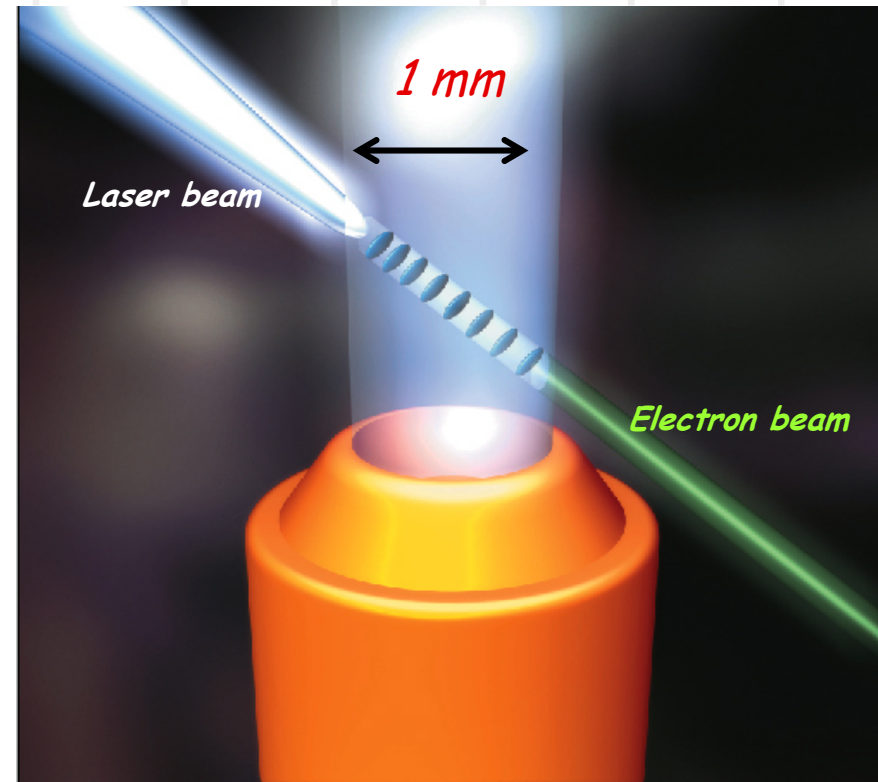


The **National Ignition Facility (NIF)** Project in Livermore, California is the largest laser in the world (192 beams, cost = 1.2 billions).

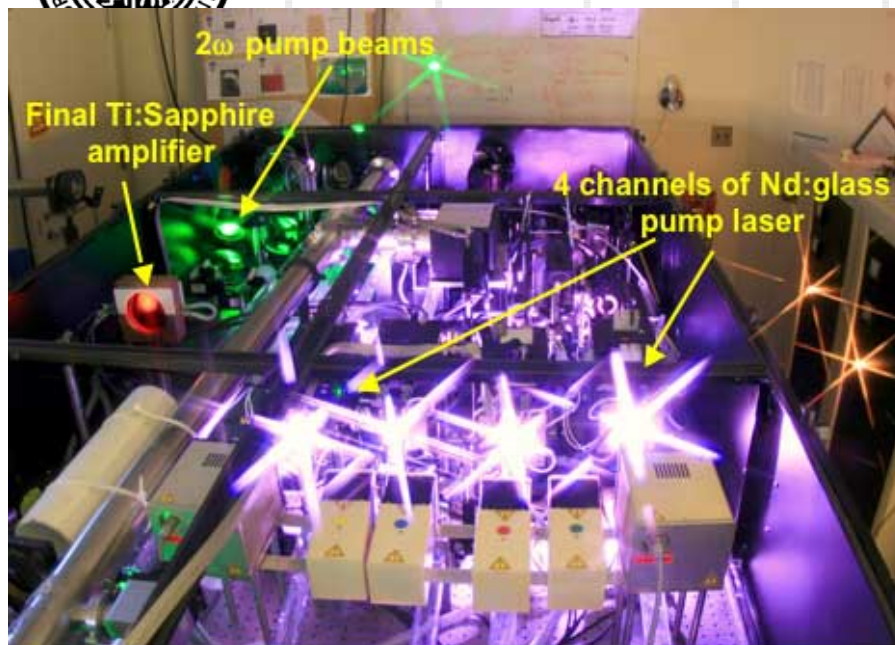




Laser Particle Acceleration



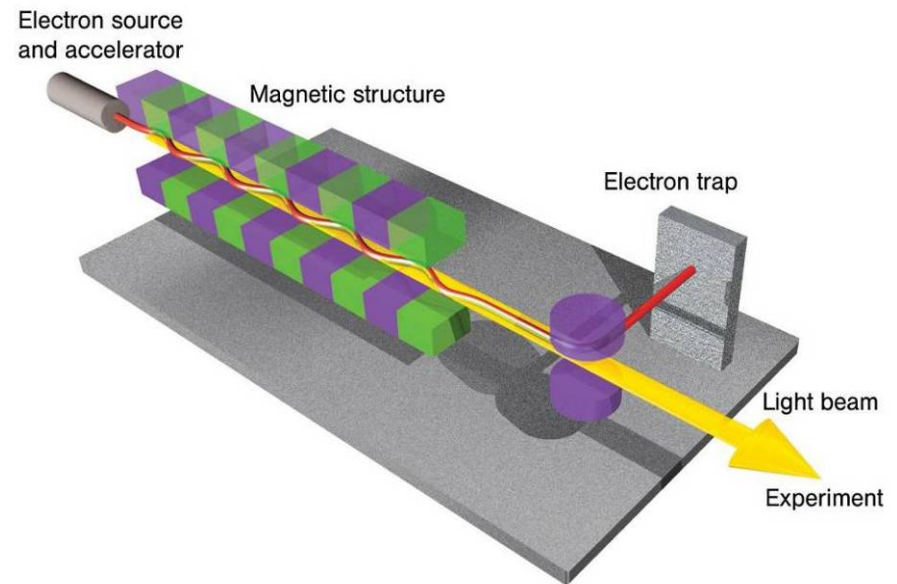
物理
工程



HERCULES Petawatt laser:
 $2 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$ at 1.5 eV ($\sim 750 \text{ nm}$)

(2025: ELI up to 10^{26} W/cm^2)

物理
工程



DESY-FLASH (Free Electron Laser):
 100 eV at 10^{17} W/cm^2

(2014: European XFEL up to 10 keV)



九、 激光技术(Laser Techniques)

1)激光单元技术

激光调 Q 技术、锁模技术、稳频技术、选横模技术、选纵模技术、光放大技术、非线性光学技术、激光调制技术、激光偏转技术、激光传输技术和激光检测技术等。

2) 激光应用(Laser Applications)

信息光学、非线性光学、激光光谱学、光化学、光生物学、光物理学、激光医学、光通讯、光传感器、光计算机、光神经网络、光子学、光电子学、集成光学、导波光学、傅立叶光学、激光热核聚变及高速摄影等迅速兴起。



(1) 激光调制

按调制的性质又可把激光调制分为调幅、调频、调相、调强、脉冲调制以及脉冲编码调制等。为实现各种不同类型的调制，可以采用各种不同的调制方法，诸如机械调制、电光调制、磁光调制、电源调制及声光调制等。



(2) 激光偏转

使激光束相对于原始位置作一定规律的偏转扫描，是激光应用中的关键技术之一，**根据光束偏转的连续与否可以把光偏转技术分为两种类型**：一种是模拟式偏转，即光的偏转角是连续变化的，它能描述光束的连续位移；另一种是数字式偏转，即在给定空间中某些特定位置上使光离散，而不是连续的偏转。前者用于各种显示术，后者主要用于光存储等。



(3) 激光调 Q 技术

通过调节激光谐振腔的 Q 值，控制激光能量的释放时间，使激光输出在时间域内更加集中的技术。

(4) 激光锁模

激光模式的锁定 (锁模) 技术，通过使能量分布在频率上的集中，而达到能量分布在时间上更加集中的技术过程。可以获得as量级 (几百阿秒) 超短脉冲。激光器的模式有纵模、横模两大类。锁模也就有所谓纵模锁定、横模锁定以及纵、横模同时锁定等三种，但最有价值的是纵模锁定。



(5) 非线性光学

二次谐波技术，涉及倍频、和频、差频等激光技术。

红宝石激光 ($\lambda=694.3\text{nm}$) 经过透镜聚焦于石英晶体上，其出射光由三棱镜分光，在光屏上可观察到两种波长的光波：红光 ($\lambda_1=694.3\text{nm}$) 和紫外光 ($\lambda_2=347.2\text{nm}$)，即 λ_2 是 λ_1 的倍频光。

(6) 光放大技术

工作物质在光泵激励下，处于粒子数反转分布状态，当有外来的光信号通过它，则激发态上的粒子在外来光信号的作用下产生强烈的受激辐射，



(7) 模式选择技术

(8) 稳频技术

(9) 光传输技术

(10) 激光检测技术



激光原理

第一章作业:

1、3、4、5、8、13

物理
原理