

《激光原理》 部分

丘志仁

物理学院
2021年2月

联系方式：stsqzr@mail.sysu.edu.cn

电话：84111411，
13622278890, 18664868897

所有课件请不要外传及上传网络

激光发展的历史

- 1940S: MASER Concept

- Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

- 1956: First Solid State Maser

- 1958: Optical and Infrared Maser
(1964年诺贝尔奖成果)

“激光” (LASER) 一词是受激辐射光放大

(**L**ight **A**mplification by **S**timulated
Emission of **R**adiation) 的缩写。

钱学森翻译，

台湾翻译 “镭射”

光是 (波长较短的) 电磁波

电磁波谱图

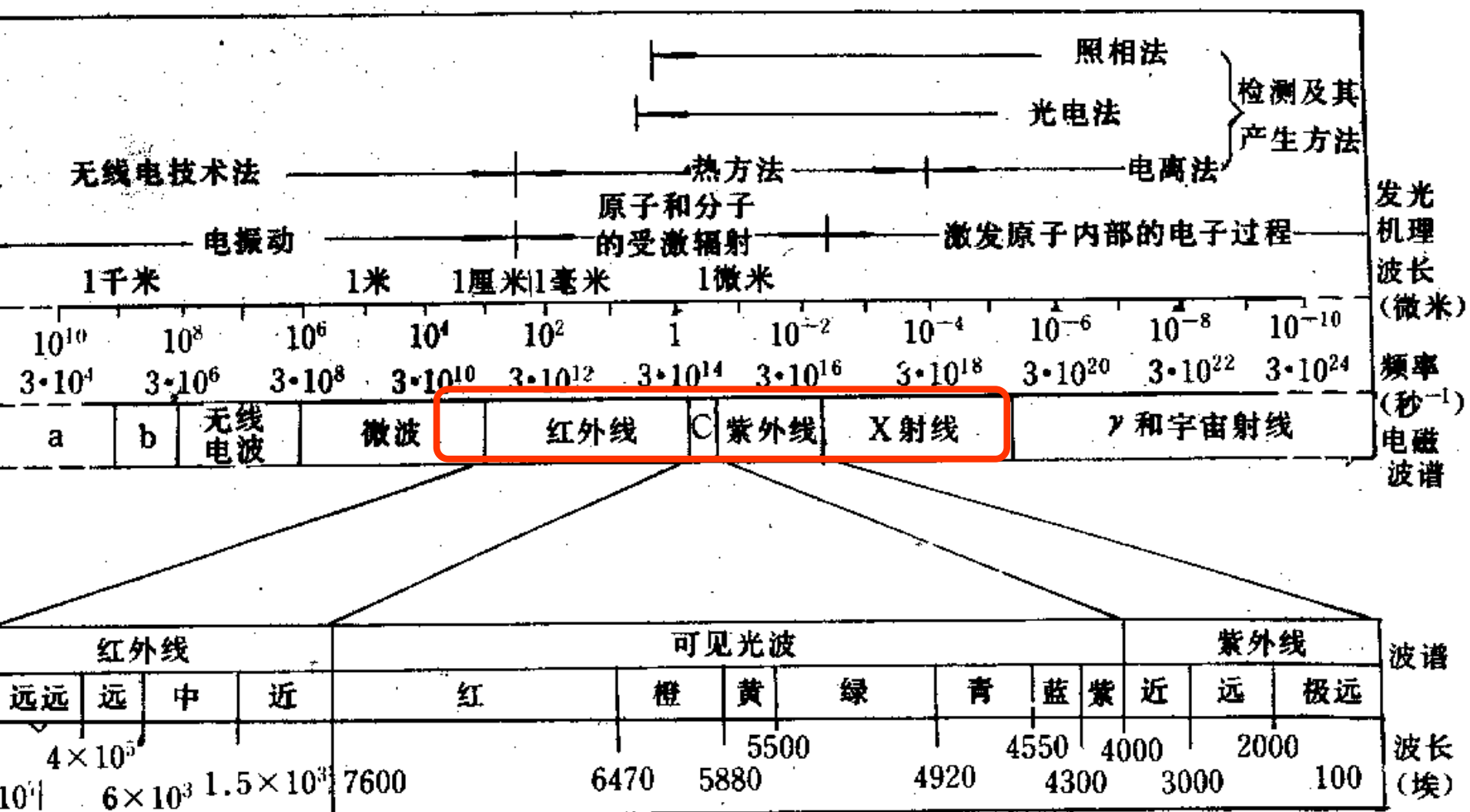


图 1-1 电磁波谱图

- 1960.5: Solid State Laser($\text{Cr}^{+3}:\text{Al}_2\text{O}_3$)

美国休斯研究实验室的梅曼

制成了第一台红宝石激光器

- 1961: He-Ne Laser(CW) (伊朗人 : 贾万)

- 1962: 半导体二极管激光器 (三组科学家)

- 1964: CO_2 Laser, Nd:YAG laser

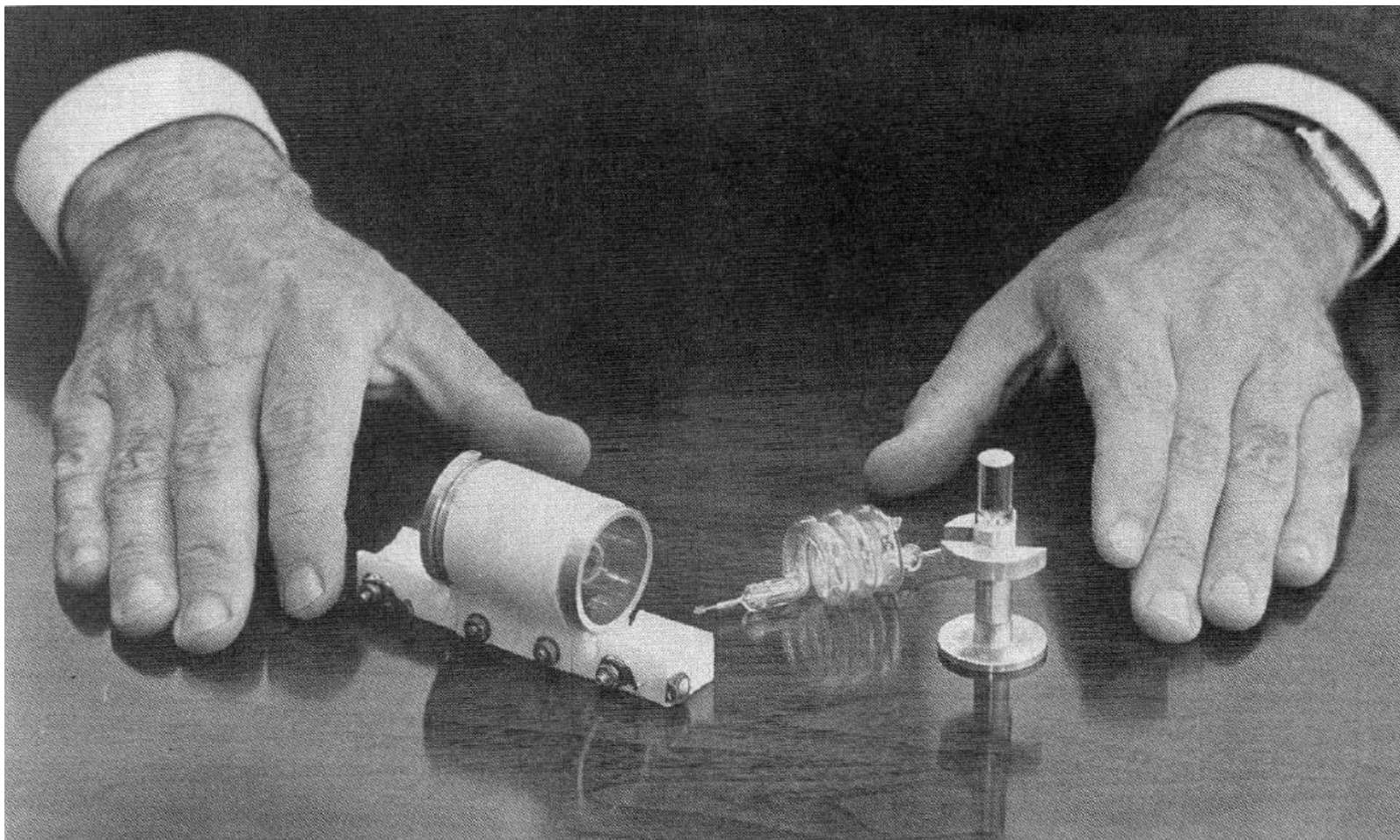
- 1966: 气体激光光放大

- **1967** : 第一个被动锁模激光器 (1皮秒)
- **1968** : 第一个用于光纤的半导体激光器
- **1968-70** : MBE (Molecular Beam Epitaxy)发明制作原子层量级膜层
- **1969** : 提出了集成光电路
- **1970** : 双异质结激光、分布反馈激光 (DFB)
- **1970S**: 掺稀土光纤激光 , 光纤放大器概念

- **1975 : 光学多量子阱激光器 InGaAsP laser**
- **1981: 第一个产生光孤子的激光**
- **1983 : 第一个可调谐单波长激光**
- **1980 : 第一个飞秒激光器 (对碰锁模染料激光器)**
- **1990S : 固体飞秒激光器 (Ti:Al₂O₃等)**
-
.....
- **未来发展方向 ? ? ?**

- **激光的发展史应该追溯到1917年**：爱因斯坦提出光的受激辐射的概念，预见到受激辐射光放大器诞生，也就是激光产生的可能性。
- **20世纪50年代**：美国科学家**汤斯**及前苏联科学家**普罗科霍罗夫**等人分别独立发明了一种低噪声微波放大器，即一种在微波波段的受激辐射放大器Maser (Microwave amplification by stimulated emission of radiation)。
- **1958年**：美国科学家**汤斯**和**肖洛**提出在一定条件下，可将这种微波受激辐射放大器的原理推广到光波波段，制成受激辐射光放大器Laser (Light amplification by stimulated emission of radiation)。
- **1960年7月**：美国的**梅曼**宣布制成了第一台红宝石激光器。

梅曼的第一台红宝石激光器



1961年9月中国科学院长春光学精密机械研究所制成了我国第一台激光器。

●1961年我国科学家王之江、邓锡铭制成我国第一台红宝石激光器，称其为“光学量子放大器”。随后我国科学家钱学森建议统一翻译成“激光”或“激光器”

我国第一台红宝石激光器



我国第一台
红宝石激光器

我国激光器研究情况

激光器的第一台	研制成功时间	研 制 人
红宝石激光器（我国第一台）	1961年11月	邓锡铭、王之江
He-Ne激光器	1963年7月	邓锡铭等
掺钕玻璃激光器	1963年6月	干福熹
GaAs同质结半导体激光器	1963年12月	王守武
CO ₂ 分子激光器	1965年9月	王润文等

请同学们

回顾历史，学习、思考与创新

- 1、激光发明的历史过程及关键科学家**
- 2、中国激光研究先驱及机构**
- 3、中山大学激光研究概况**

第一章：辐射的基础知识及 激光束的基本特性

§1—1、光辐射的一般规律

- 1、辐射通量**：用功率的单位，即用瓦（[焦耳/秒]或[尔格/秒]）表示。
- 2、辐射通量密度**：入射到一个表面的辐射强度称为 N 。在MKKS制中，其单位为[瓦/平方米]。指定方向辐射。
- 3、辐射的能量密度 $\rho(\nu)$** ：单位体积内包含的辐射能量。

4、指定方向的单位立体角内，辐射体单位投影面积的辐射通量密度N：

已知辐射表面的面积为A，而所取方向同表面法线成 Θ 角，于是在围绕指定方向的球面度 $d\Omega$ 的小锥体内，辐射通量是 $NA\cos\Theta d\Omega$ 。

5、朗伯定律：当N不依赖方向时，我们说这表面按朗伯定律辐射。表面的总辐射为

$$W(\lambda, T) = \pi NA。$$

6、普朗克定律：当腔内的电磁辐射在绝对温度T处于热平衡时，辐射密度（黑体辐射）按频率的分布服从普朗克定律：

$$\rho_{\nu} d\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

式中，h是普朗克常数；k是玻尔兹曼常数；
c为光速。

7、单位面积辐射通量密度 $W(\lambda, T) = \rho c/4$

$$W(\lambda, T) d\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5} d\lambda}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

[瓦/ 厘米²]

$$c_1 = 2\pi h c^2; c_2 = hc/k$$

$$c_1 = 3.74 \times 10^{20} \text{瓦/厘米}^2 \text{埃}^4; c_2 = 1.438 \times 10^8 \text{埃} \cdot K$$

8、 按斯替藩—玻尔兹曼定律，黑体总辐射为：

$$W = \int_0^\infty W(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

其中 $\sigma = 5.679 \times 10^{-12} \text{瓦/厘米}^2 \cdot \text{度}^4$

$W(\lambda, T)$ 是某一温度下，白炽体辐射波长分布。

9、维恩位移定律

- 对于每一温度，必有一个发射辐射为最大的波长，这个波长可由维恩位移定律算出

$$\lambda_M T = 2.898 \times 10^7 \text{ 埃} \cdot K$$

- $T = 5200K$: $\lambda_M = 5575 \text{ \AA}$

- $T_{\text{人体}} = 37^\circ\text{C}$: $\lambda_{\text{人体}} = 10 \text{ 微米}$

- 而对于指定温度 T ，辐射能 $W(\lambda, T)$ 的峰值为

$$W_M(T) = W(\lambda_M, T) = 1.290 \times 10^{-19} T^5 \text{ 瓦/厘米}^2 \cdot \text{埃}$$

10、普通光源 (非相干光源)----热平衡

比如:照明光源、显示光源等

单色性弱：辐射源的能量都分布在一个相当宽的频谱范围中。

方向性差：辐射光束的准直性一般是差的。

亮度不高：来自普通扩展光源的辐射不能靠成像来增加亮度。

激光辐射源---非热平衡状态（粒子数反转）

11、光产生的方法

热激发、电激发、场致激发、化学激发、光致激发、 γ 射线（夜光表）.....

激光光强 I =

I （频率，偏振，空间，波矢，相位，时间）

应用：波长应用，全息照相，光聚焦，非线性光学，相干性应用，光开关与调制

信息IT: 光通信、光盘（驱动）、打印机

能量 E ：精密加工、武器、手术刀、核聚变、农学、化学

激光是受激辐射的光放大：

受激辐射？

光放大？

§1—2、光与物质的相互作用 ——辐射能量的交换

- 原子物理课：构成物质的粒子（原子、离子、分子）具有一系列的定态。
- 较高的定态具有能量 E_2 ，由波函数 φ_2 描述；较低的能态具有能量 E_1 ，波函数为 φ_1 。粒子吸收光子 $h\nu$ ，可以从较低能态跃迁到较高能态；而粒子处于较高能态，也可以通过发射光子 $h\nu$ 过渡到较低能态。光子的能量为：

$$h\nu = E_2 - E_1$$

实际光子数量大需要用统计方法

1、热平衡时粒子数的分布

在热平衡时，构成物质的粒子的整体有一定的温度，并设粒子的总数目为 N 。粒子有一系列定态

$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \dots$ 相应的能量为 E_i 。位于

基态的粒子数目远大过处于较高能态的粒子数目。

需要用外能源才能把粒子从较低能态激发到较高

能态。能级越高，处于该能级的粒子数目也越小。

- 实验观测以及量子统计理论的分析，获得在热平衡温度 T 时，分布在能级 E_i 上的粒子数目 N_i 正比于该能级的统计权数（或简并度） g_i 以及因子 $e^{-E_i/kT}$ 。即

$$N_i \propto g_i e^{-E_i/kT}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2 e^{-E_2/kT}}{g_1 e^{-E_1/kT}} = \frac{g_2}{g_1} e^{-(E_2-E_1)/kT} = \frac{g_2}{g_1} e^{-h\nu/kT}$$

(1—8)

非简并时，即

$$g_2 = g_1 = 1$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2-E_1)/kT} = e^{-h\nu/kT}$$

(1—9)

(1) $N_2 < N_1$	(一般情况)	热平衡情况
(2) $N_2 = N_1$	($T \rightarrow \infty$)	热平衡情况
(3) $N_2 > N_1$	($T \rightarrow -\infty$)	非热平衡情况

人为实现粒子数
(布局数) 反转

温度是粒子热运动

能量大小的标志。

不存在负温度。

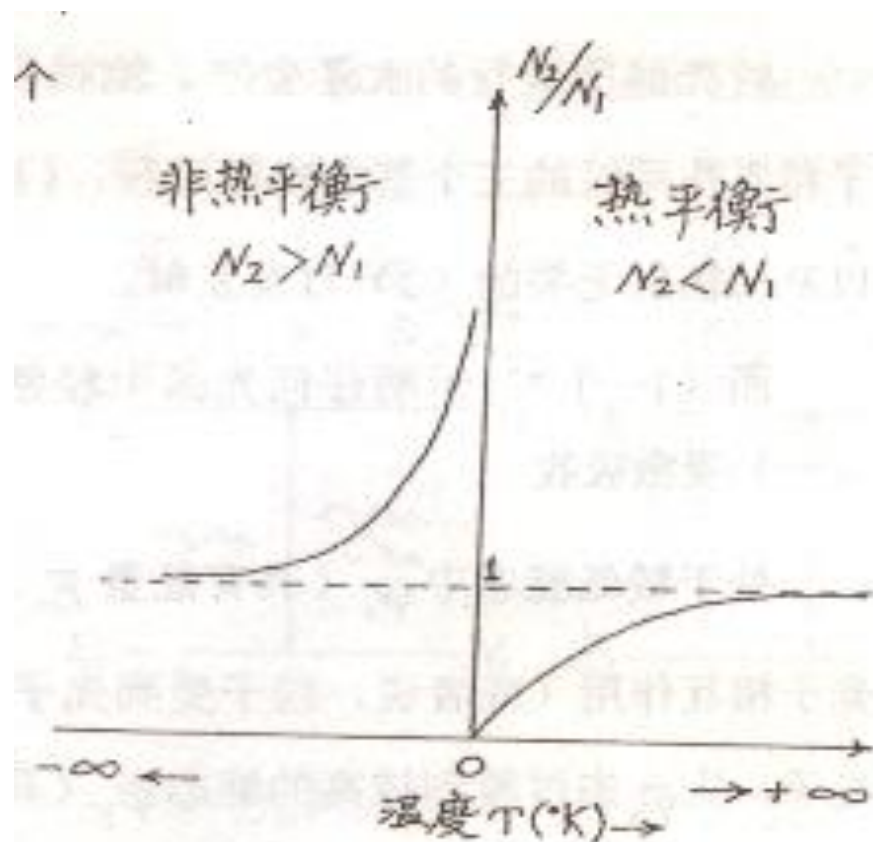
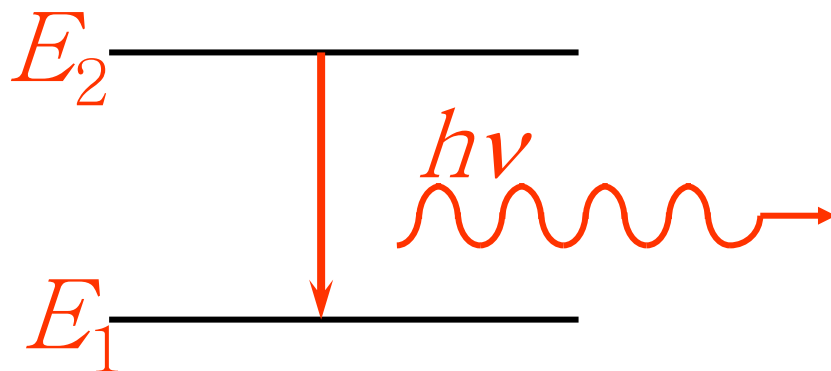


图 (1-1.1): 两个能级 ($E_1 < E_2$), 的布居数比例

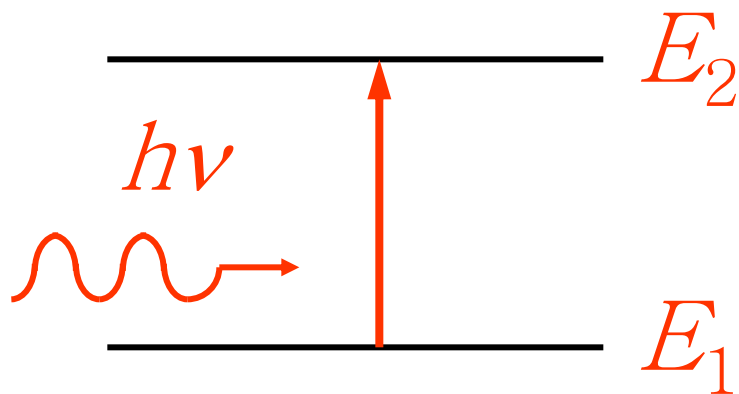
2.辐射能量交换的三个基本过程

原子与光有三种相互作用



A 自发辐射 处在高能级 (E_2) 的原子是不稳定的, 即使没有任何外界的激励, 也总会自发地跃迁到低能级 (E_1) 上, 并且发射一个频率为 ν , 能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子。这种辐射光子的过程叫自发辐射。

B 受激吸收 处在低能级 E_1 的原子受到能量等于 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子的照射时，会吸收这一光子而跃迁到高能级 E_2 的过程。

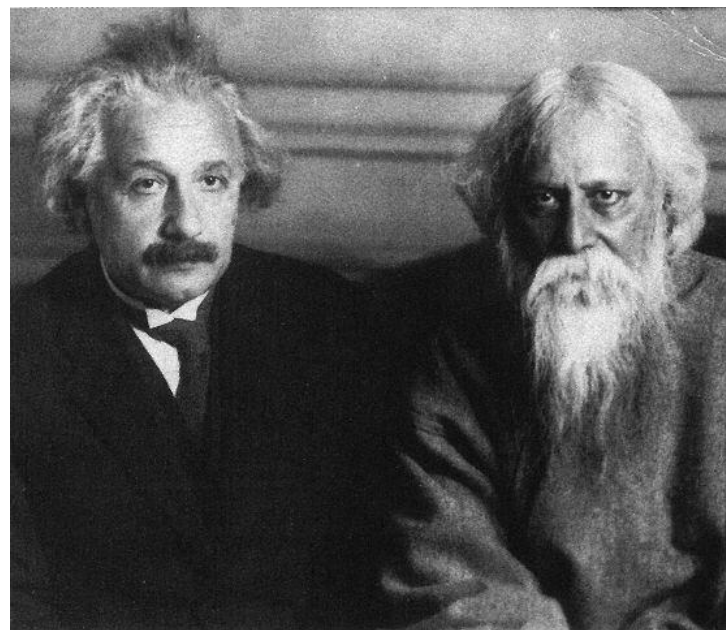
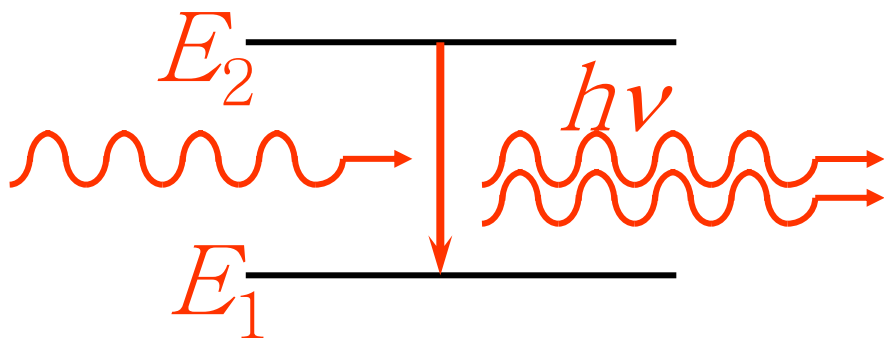


1916年，爱因斯坦在研究黑体辐射时，发现辐射场和原子交换能量时只有自发辐射和吸收是不能达到热平衡的。要达到热平衡，还必须存在另一种辐射方式——受激辐射。

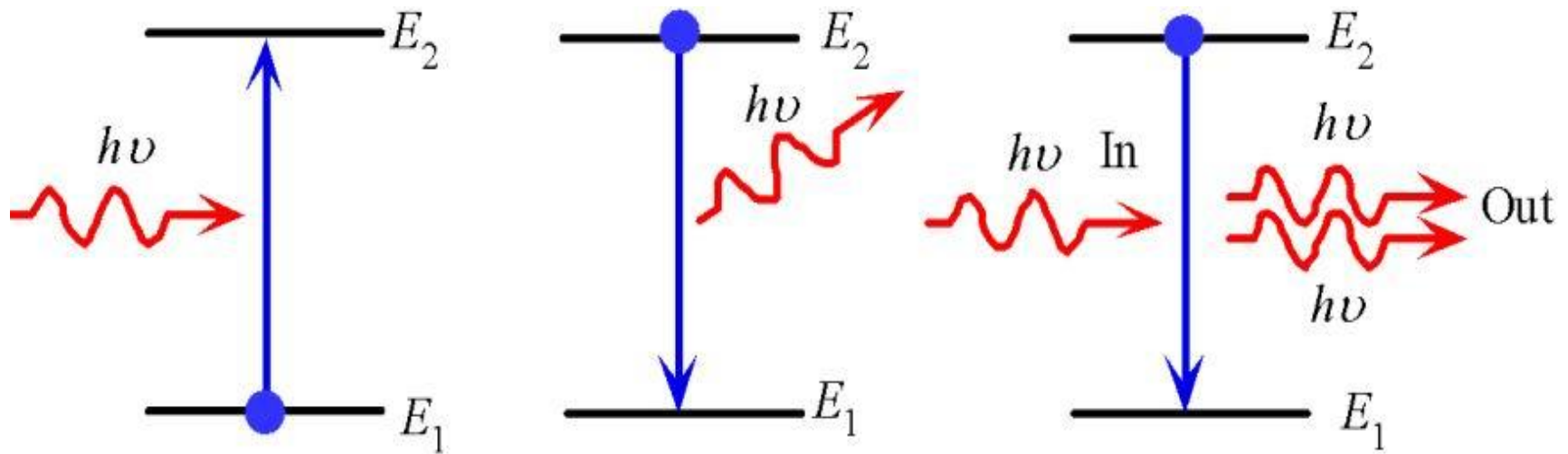
C 受激辐射 当原子中的电子处于高能级时，若外来光子的频率恰好满足

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

则电子就会在外来光子的诱发下向低能级跃，并发出一个与外来光子一模一样的光子。这种过程被称为受激辐射。



在受激辐射中，一个光子可以产生两个频率、相位、偏振方向和传播方向完全相同的光子，如果这两个光子再引起其它原子产生受激辐射，就会得到更多特征完全相同的光子，即形成“光放大”。



(a) Absorption (b) Spontaneous emission (c) Stimulated emission

Absorption, spontaneous (random photon) emission and stimulated emission.

(1) 受激吸收 (系数) B_{12} , 过渡几率 $B_{12}\rho(\nu)$

$\rho(\nu)$ 下降, 单位时间过渡数目 $B_{12}\rho(\nu)N_1$

(2) 受激发射 (系数) B_{21} , 过渡几率 $B_{21}\rho(\nu)$

$\rho(\nu)$ 上升, 发射与入射光子频率、相位、偏振相同的相干光, 单位时间过渡数目 $B_{21}\rho(\nu)N_2$

(3) 自发发射 (系数) A_{21} , 过渡几率 A_{21} ,

与 $\rho(\nu)$ 无关, 发射非相干光,

单位时间过渡数目 $A_{21}N_2$

3、在热平衡状态下，三个基本过程所占的比率

$$B_{12}\rho(\nu)N_1 = B_{21}\rho(\nu)N_2 + A_{21}N_2 \quad (1-10)$$

把 (1—8) 式代入 (1—10) 式得：

$$B_{12}\rho(\nu) = [B_{21}\rho(\nu) + A_{21}]\frac{g_2}{g_1}e^{-h\nu/kT} \quad (1-11)$$

$$\rho(\nu) = \frac{g_2 A_{21}}{g_1 B_{12} e^{h\nu/kT} - g_2 B_{21}} \quad (1-12)$$

根据实验 $T \rightarrow \infty$, 有 $\rho(\nu) \rightarrow \infty$ $e^{h\nu/kT} \rightarrow 1$

由 (1—12) 式求得 $g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$ (1—13)

当 φ_1 与 φ_2 都是非简并时

(1—14)

$$B_{12} = B_{21}$$

$$\rho(\nu) d\nu = \frac{A_{21}}{B_{21}} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

(1—15)

$$\rho(\nu) d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \cdot h\nu d\nu$$

(1—16)

普朗克公式

普朗克公式（1—16）式

- 第一个因子 $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$ 是每单位体积、每单位频率间隔的模数目；
- 第二个因子 $\frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$ 是每模的光子数目；
- 第三个因子 $h\nu$ 是光子的能量。

比较 (1—15) 和 (1—16) 两式 , 得

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot h\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} = \frac{8\pi h}{\lambda^3}$$

- **频率越低 , A_{21} / B_{21} 的值越小。即热平衡体受激发射几率相对于自发发射的几率较大些。**
- **处于高频率区 , 波长愈短时 , 受激发射的几率较之于自发发射的几率更加变小。**

这正是长期以来 , 在光频区域未能实现足够强的受激辐射的原因。即使在目前 , 紫外区乃至X光区段的激光发射条件 , 也是较诸在可见、红外区实现受激发射要困难得多。

● 三个过渡的相对大小

$$\frac{\text{受激吸收过渡数目}}{\text{受激发射过渡数目}} = \frac{B_{12}\rho(\nu)N_1}{B_{21}\rho(\nu)N_2} = e^{h\nu/kT}$$

$$\frac{\text{受激发射过渡数目}}{\text{自发发射过渡数目}} = \frac{B_{21}\rho(\nu)N_2}{A_{21}N_2} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$\frac{\text{受激吸收过渡数目}}{\text{自发发射过渡数目}} = \frac{B_{12}\rho(\nu)N_1}{A_{21}N_2} = \frac{e^{h\nu/kT}}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

过渡的比值 $\lambda = 600\text{nm}$	$T = 10000$ K	$T = 300\text{K}$
$\frac{\text{受激吸收}}{\text{受激发射}} = e^{h\nu/kT}$	11	60
$\frac{\text{受激发射}}{\text{自发发射}} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$	0.1	0.017
$\frac{\text{受激吸收}}{\text{自发发射}} = \frac{e^{h\nu/kT}}{e^{h\nu/kT} - 1}$	1.1	1.017

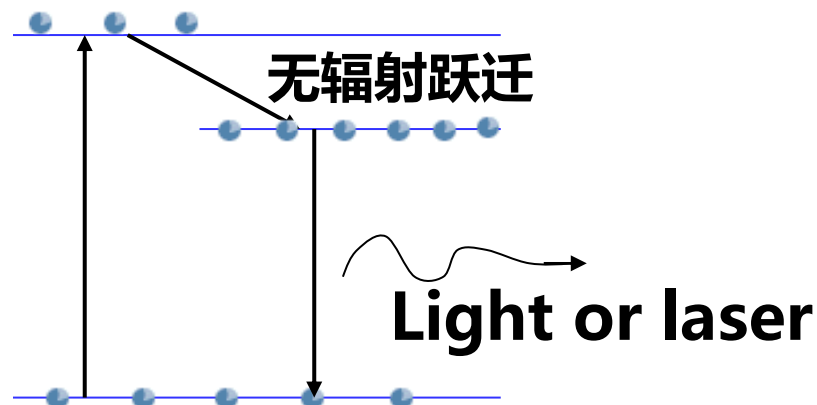
- 受激吸收 $>$ 受激发射, $>$ 自发发射

受激发射 $<$ 自发发射

-----激光未出现之前光通过物质总是减弱而不能放大的原因

- 如果不采取特殊措施, 沿用经典方法, 无论温度有多高, 不可能获得可应用的受激辐射强度 (相干光)
- 只有抽运速度足够大, 使粒子数分布达到反转 $N_2 > N_1$, 才产生激光。

产生激光的必要条件



(1) 选择具有适当能级结构的**工作物质**，在工作物质中能形成粒子数反转，为受激辐射的发生创造条件；

(2) 选择一个适当结构的**光学谐振腔**。对所产生的受激辐射光束的方向、频率等加以选择，从而产生单向性、单色性、强度等极高的激光束；

(3) **外部的工作环境**必须满足一定的阈值条件，以促成激光的产生。这些阈值条件大体包括：减少损耗，加快抽运速度，**促进（粒子数）反转**等。像工作物质的混合比、气压、激发条件、激发电压等等。

激光器分类

目前激光器的种类很多。

1. 按工作物质的性质分类，大体可以分为**气体激光器**、**固体激光器**、**液体激光器**；
2. 按工作方式区分，又可分为**连续型**和**脉冲型**等。其中每一类激光器又包含了许多不同类型的激光器。
3. 按激光器的能量输出又可以分为**大功率激光器**和**小功率激光器**。大功率激光器的输出功率可达到兆瓦量级，而小功率激光器的输出功率仅有几个毫瓦。

如前所述的He-Ne激光器属于小功率、连续型、原子气体激光器。红宝石激光器属于大功率脉冲型固体材料激光器。

§1—3、激光束的基本特性

激光束区别于普通光束的**三个方面**特点是：

- 1) 亮度高、
- 2) 单色性好、
- 3) 相干性（方向性）强。

1、激光束的亮度

辐射亮度的单位为： $[\text{瓦}/(\text{厘米}^2 \cdot \text{立体角})]$

(1) 日光管与激光比较

A) 日光灯管上每一点在180度内发光；

B) 激光器在很窄的一个立体角内发光

C) 立体角的计算：

$$\Omega = \frac{\pi}{4} \cdot \theta^2$$

激光相对光管立体角减小

$$180^2 / 0.18^2 = 10^6 \text{ 倍}$$

发射面积减小导致亮度增加

$$10^7 - 10^8 \text{ 倍}$$

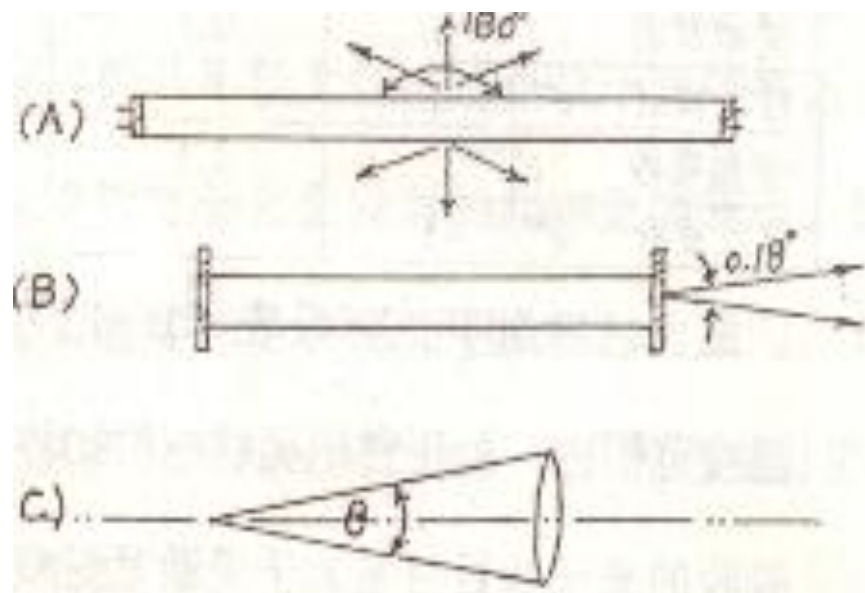


图 1—1.3、辐射亮度与辐射立体角
的关系

(2) 激光器与太阳亮度比较

(A) 实验室中一支 Ar^+ 激光器：

- 1) 在输出镜上光斑半径 $w \approx 0.5$ 毫米。
- 2) 光束发散角 $\theta \approx 0.5$ 毫弧度。
- 3) 连续输出功率 $P = 1$ 瓦。

算出，在输出镜面上的光束截面积为：

$$S = \pi w^2 = 75 \times 10^{-4} (\text{厘米})^2$$

激光束所占的立体角为：

$$\Omega = \frac{\pi}{4} \times \theta^2 = 2 \times 10^{-7} [\text{立体角}]$$

激光器的辐射亮度为：

$$B_{Ar^+} = \frac{P}{S \cdot \Omega} = \frac{1}{75 \times 10^{-4} \times 2 \times 10^{-7}} = 6.6 \times 10^8 \text{ 瓦/厘米}^2 \cdot \text{立体角}$$

(B) 太阳辐射光谱的测量表明，其连续辐射谱的峰值波长为 $\lambda_M \approx 4830 \text{ \AA}$

- 维恩位移定律可算出**太阳表面温度**为：

$$T = \frac{2.898 \times 10^7}{\lambda_M} K \approx 6000 K$$

- 斯替藩—玻尔兹曼定律积分辐射通量密度为：

$$W = \int_0^\infty W(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 = 5.679 \times 10^{-12} [\text{瓦/厘米}^2 \cdot \text{度}^4] \times (6000)^4 [\text{度}^4] \approx 7384 [\text{瓦/厘米}^2]$$

- 按朗伯定律辐射的表面，每点都向球的外面发射能量，占有 2π 立体角。故此，得到**太阳表面的亮度**为：

$$B_{Sun} = \frac{W}{2\pi} \approx 1172 [\text{瓦/厘米}^2 \cdot \text{立体角}]$$

$$\frac{B_{Ar^+}}{B_{Sun}} = \frac{6.6 \times 10^8}{1172} = 6 \times 10^5$$

(C)调Q的红宝石激光器:

其脉冲功率很易达到 10^6 瓦的水平，那么，它将比太阳亮度大 10^{11} 倍

激光的总能量是不大，但激光能够把能量在空间和时间上高度地集中起来。在应用上有很大的威力。

2、激光束的单色性

- (1) **单色光**-----是指波长范围局限在很小一段的**辐射**。这个范围就叫做单色光的**谱线宽度**。谱线宽度是衡量光源单色性好坏的标志。
- (2) **单色光源**-----发射一种或几种分立的单色光的**光源**。这样的光源所发出来的光束经色散系统分解后，**不是色带**，而是一条条**分立的明亮谱线**。

(3) 单色性比较

同位素氪灯 (Kr^{86})

它辐射的单色性被认为是普通光源中最好的了。
其谱线宽度在低温条件下也只有；

$$\Delta\lambda = 0.0047 \text{ \AA}$$

氦氖激光器所产生的激光谱线宽度量级约为：

$$\Delta\lambda = 10^{-7} \text{ \AA}$$

$$\Delta\nu = 7.49 \times 10^3 \text{ Hz}$$

氦氖激光器单色性较之于上述氪灯提高数万倍。

应用：精密测量等科学实验，作长度计量标准等

3、激光束的相干性

经典的干涉实验证明了光波是存在相位。

绝对理想的相干（单色）辐射是不存在的！！

干涉现象物理的本质：相位相关性

（1）空间相干性：在同一时刻，空间任一点的波幅为另一点的波幅的确定函数，并且密切相关。

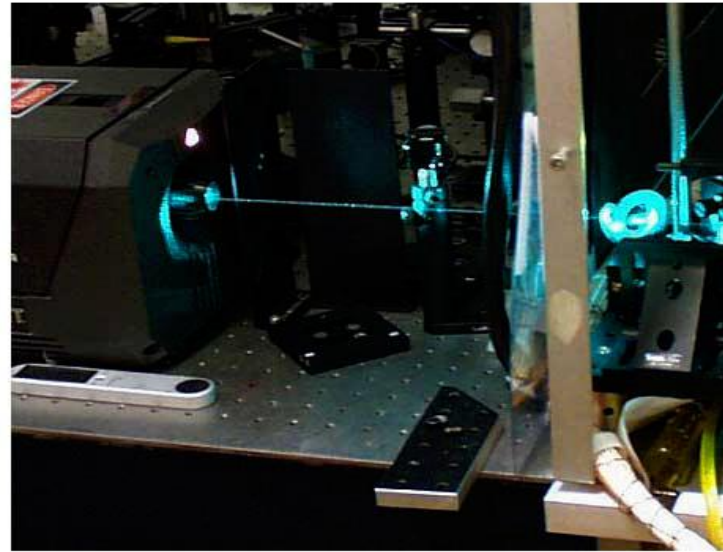
（2）时间相干性：空间上的同一点，在不同的时刻，其波幅之间存在着确定的关联。

Ordinary light



divergent
incoherent
many small waves
many modes

Laser light



diffraction limited (directional)
coherent
one big wave
single mode (monochromatic)

电灯的光：光子排列不整齐，步调也不一致。

激光：像队伍一样整齐划一地前进。

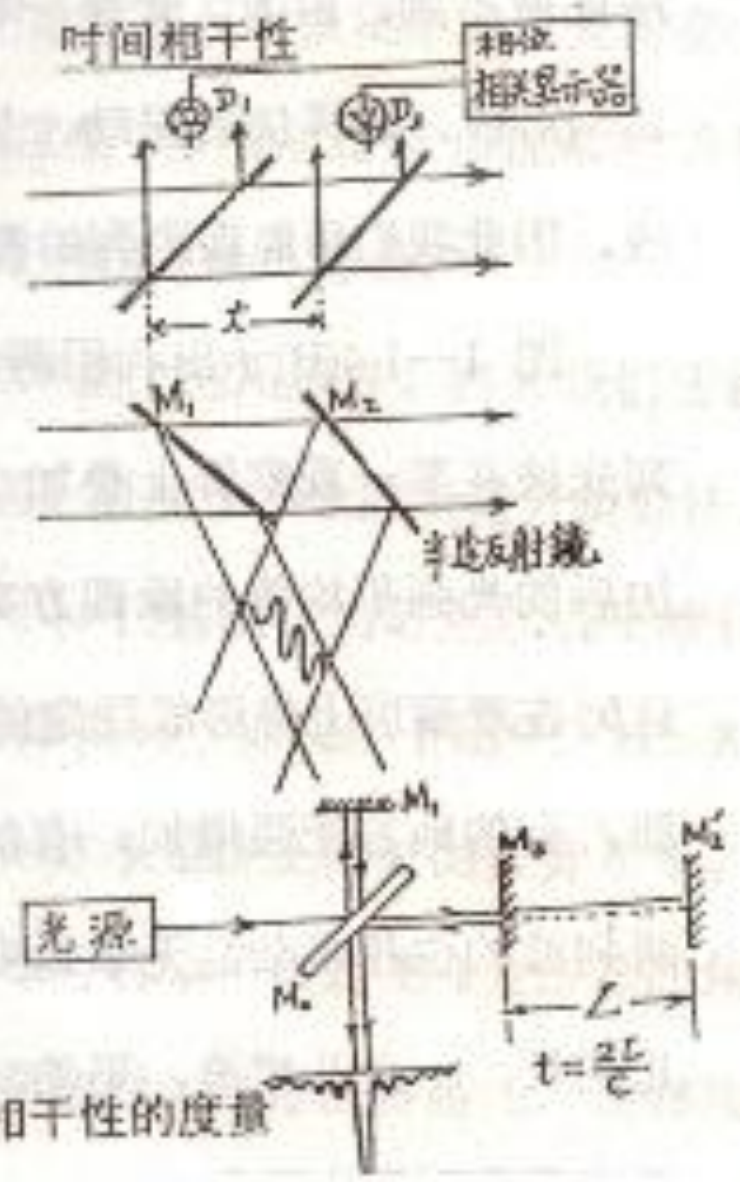
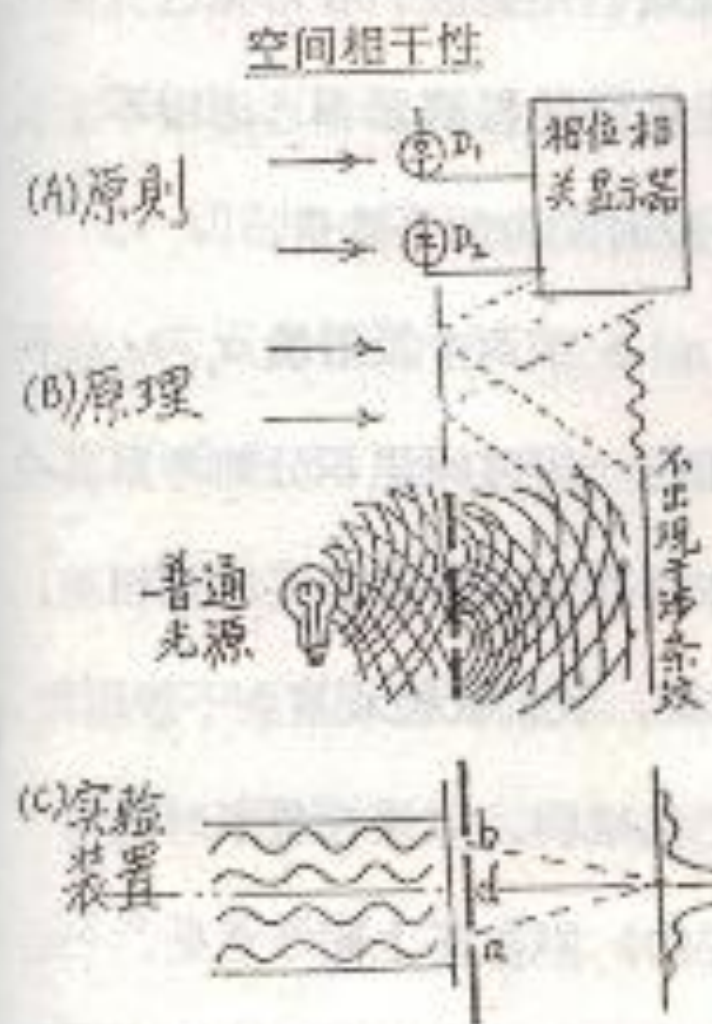


图 1—1.4 关于相干性的度量

(3) 衡量光束相干性的好坏

- **空间相干性**：(横向) 相干面积来度量；

相位相关的极限距离越大，就表明光束的空间相关性 (相干性) 越好。

打孔、切割、核聚变

- **时间相干性**：(纵向) 相干长度来度量。

相位相关的极限距离 (或者时间)越大，就表明光束的时间相关性 (相干性) 越好。

精密测量等

(4) 横向相干长度 $D_{\text{相干}}$

激光器输出平面发射角等于光束的衍射角

$$\theta = \theta_{\text{衍射}} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

D是光束直径，一般 $\theta > \theta_{\text{衍射}}$ 传播L后，
光束直径增加为

$$W_L = L\theta \cong 1.22 \frac{L\lambda}{D}$$

横向相干长度:

$$D_{\text{相干}} = \frac{\lambda}{\theta} \cong \frac{D}{1.22}$$

(5)(纵向)相干长度（ 时隔 ）：时间相干性

迈克尔逊干涉仪中的 M_1 和 M_2 位置几乎与分束镜 M_0 等距离时，这时两支光束到达观察屏上的时间差异很小，并产生干涉条纹。

假如令反射镜 M_2 平行移动一段距离 $L/2$ ，这时镜的位置为 M_2' 。那么两支光束在屏上叠加时，光程差将是 L ，而时间上的间隔为 $t=L/C$ 。在这个过程中，我们将会观察到：随着 M_2 向 M_2' 方向移动，光程差 L 增加，干涉条纹将逐渐变得模糊，最后光程差增大到某一极限数值 $L_{\text{最大}}$ 时，干涉条纹将无法辨认（即消失）。这是由于光束并不是理想的单色光而是具有一定的谱线宽度的缘故。

- 设波长为 λ 的两束相干光产生干涉，当其程差为 $L=N\lambda$ 时，出现干涉极大值；当其程差为 $L=N\lambda+\lambda/2$ 时，出现干涉极小值。

- 假定单色光的波长 λ 有一定的谱线宽度 $\delta\lambda$ ，那么存在着这样一个极限程差：

谱线的长波一侧（波长为 $\lambda + \delta\lambda/2$ ）出现干涉极大值，即：

$$L_{\text{最大}} = N(\lambda + \delta\lambda/2) \dots\dots\dots(1--22)$$

谱线的短波一侧（波长为 $\lambda - \delta\lambda/2$ ）却恰好出现干涉极小值，即

$$L_{\text{最大}} = N(\lambda - \delta\lambda/2) + 1/2(\lambda - \delta\lambda/2) \dots\dots (1--23)$$

- 显然，（1—22）与（1—23）是相等的，即有

$$N(\lambda_0 + \frac{\delta\lambda}{2}) = N(\lambda_0 - \frac{\delta\lambda}{2}) + \frac{1}{2}(\lambda_0 - \frac{\delta\lambda}{2}) \dots\dots\dots (1-24)$$

$$L_{\text{最大}} = N\lambda_0 \approx \frac{\lambda_0^2}{2\delta\lambda} \dots\dots\dots (1-27)$$

$$L_{\text{相干}} = \frac{\lambda^2}{\delta\lambda} \dots\dots\dots t_{\text{相干间隔}} = \frac{L_{\text{相干}}}{c} = \frac{1}{\delta\nu}$$

结论：δν越小，单色性越好，相干性越好

● 例子：

(A) 钠灯 $\lambda = 5896 \text{ \AA}$ $\nu = 5.09 \times 10^{14} \text{ Hz}$

自然谱宽 $\Delta \nu_N = 1.0 \times 10^7 \text{ Hz}$

考虑到在室温中实际测量，那么 $\delta\nu$ 应计及热增宽

$$\Delta \nu_N = 1.6 \times 10^9 \text{ Hz}$$

$$\therefore L_{\text{相干长度}} = \frac{\lambda^2}{\delta \lambda} = \frac{c}{\delta \nu} = \frac{3 \times 10^{10}}{1.6 \times 10^9} \approx 20(\text{cm})$$

(B) 一个小功率的单模氦氖激光器:

$\lambda = 6328 \text{ \AA}$ $\nu = 4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 按理论计算, 其输出的
激光谱线宽度可达量级 (见第三章) 10^{-3} Hz

- 由于谐振腔的质量, 输出线宽大大增加, 根据文献报道的个别实验工作, 曾获得 6328 \AA 谱线宽度约为 $\delta\nu \approx 1 \text{ Hz}$

(相干长度相当于30万公里, 1秒光真空传播的距离)

- 现在我们采用一般稳频He-Ne激光器实际输出的谱线频宽为例来算: $\delta\nu \approx 10^4 \text{ Hz}$

$$L_{\text{相干长度}} = \frac{c}{\delta\nu} = \frac{3 \times 10^{10}}{10^4} = 3 \times 10^6 \text{ cm} = 3 \times 10^4 \text{ m} = 30 \text{ Km}$$

结论：两种光源相干性差异的原因

● 普通光源：

**发光物质的各个发光中心（被激发的粒子）
的辐射跃迁是彼此自立的、杂乱无章的。**

**所得到的光是各个发光中心所发出的光辐射
波的一个随机组合，它们彼此无规律地增强或减
弱，而组合成的波前逐点地随时间连续变化。因
而这种光是空间非相干的。**

两种光源相干性差异的原因

- **激光器**：处于高能态粒子的跃迁不是自发的，而是在特定的光场作用下的感应跃迁。

所以各粒子的辐射过渡是密切相关的，因此各辐射中心所发生的光不再是杂乱无章的组合，而是在空间中各点的强度有规律地变化。亦即在同一时刻，空间任一点的波幅为另一点波幅确定的函数并密切相关。故此，激光器的输出光束有着良好的空间相干性。

激光技术应用简介

激光技术的应用涉及到光、机、电、材料及检测等多门学科，主要分为以下几类：

1.激光加工系统。包括激光器、导光系统、加工机床、控制系统及检测系统。

2.激光加工工艺。包括切割、焊接、表面处理、打孔、打标、划线、微调等各种加工工艺。

2.1 激光焊接：

汽车车身厚薄板、汽车零件、锂电池、心脏起搏器、密封继电器等密封器件，不允许焊接污染和变形的器件。

YAG、CO₂和半导体泵浦激光器等。

2.2 激光切割：汽车行业、计算机、电气机壳、木刀模业、各种金属零件和特殊材料的切割、圆形锯片、压克力、弹簧垫片、2mm以下的电子机件用铜板、一些金属网板、钢管、镀锡铁板、镀亚铅钢板、磷青铜、电木板、薄铝合金、石英玻璃、硅橡胶、1mm以下氧化铝陶瓷片、航天工业使用的钛合金等等。

YAG和CO₂激光器等。

2.3 激光打标：在各种材料和几乎所有行业均得到广泛应用。

YAG、CO₂和半导体泵浦激光器等。

2.4 激光打孔：激光打孔主要应用在航空航天、汽车制造、电子仪表、化工等行业。国内目前比较成熟的激光打孔的应用是在人造金刚石和天然金刚石拉丝模的生产及钟表和仪表的宝石轴承、飞机叶片、多层印刷线路板等行业的生产中。

YAG、CO₂激光器为主，准分子激光器、同位素激光器和半导体泵浦激光器。

3.激光热处理：在汽车工业中应用广泛，如缸套、曲轴、活塞环、换向器、齿轮等零部件的热处理，同时在航空航天、机床行业和其它机械行业也应用广泛。

YAG激光器，CO₂激光器为主。

4.激光快速成型：将激光加工技术和计算机数控技术及柔性制造技术相结合而形成。多用于模具和模型行业。**YAG激光器、CO₂激光器为主。**

5.激光涂敷：在航空航天、模具及机电行业应用广泛。**YAG激光器、CO₂激光器为主。**

6.激光化学：传统的化学过程，一般是把反应物混合在一起，然后往往需要加热（或者还要加压）。加热的缺点，在于分子因增加能量而产生不规则运动，这种运动破坏原有的化学键，结合成新的键，而这些不规则运动破坏或产生的键，有时会阻碍预期的化学反应的进行。

但是如果用激光来指挥化学反应，不仅能克服上述不规则运动，而且还能获得更大的好处：

激光携带着高度集中而均匀的能量，可精确地打在分子的键上，比如利用不同波长的紫外激光，打在硫化氢等分子上，改变两激光束的相位差，则控制了该分子的断裂过程。也可利用改变激光脉冲波形的方法，十分精确和有效地把能量打在分子身上，触发某种预期的反应。

7.激光医疗：激光诊断与激光治疗，前者是以激光作为信息载体，后者则以激光作为能量载体。

- **光动力疗法治癌；**
- **激光治疗心血管疾病；**
- **准分子激光角膜成形术；**
- **激光治疗前列腺良性增生；**
- **激光美容术；**
- **激光纤维内窥镜手术；**
- **激光腹腔镜手术；**
- **激光胸腔镜手术；**
- **激光关节镜手术；**
- **激光碎石术；**
- **激光外科手术；**
- **激光在吻合术上的应用；**
- **激光在口腔、颌面外科及牙科方面的应用；**
- **弱激光疗法等。**

激光医疗近期研究重点包括：

(1)研究激光与生物组织间的作用关系，特别是在诸多有效疗法中已获得重要应用的激光与生物组织间的作用关系；研究不同激光参数（包括波长、功率密度、能量密度与运转方式等）对不同生物组织、人体器官组织及病变组织的作用关系，取得系统的数据；

(2)研究弱激光的细胞生物学效应及其作用机制，包括；弱激光与细胞生物学现象(基因调控和细胞凋亡) 的关系、弱激光镇痛的分子生物学机制以及弱激光与细胞免疫(抗菌、抗毒素、抗病毒等)的关系及其机制；

(3)深入开展有关光动力疗法机制、激光介入治疗、激光心血管成形术与心肌血管重建机制的研究，积极开拓其他新的激光医疗技术。

(4)对医学光子技术中重要的、新颖的光子器件和仪器设置进行开发性研究，例如：研制医用半导体激光系统、角膜成形与血管成形用准分子激光设备、激光美容(换皮去皱、植发)设备或其他新激光设备，开拓新工作波段的医用激光系统以及开发Ho：YAG及Er：YAG激光手术刀等。

8.超快超强激光：超快超强激光主要以飞秒激光的研究与应用为主，三个方面：

- 飞秒激光在超快领域内的应用
- 在超强领域内的应用
- 在超微细加工中的应用。

飞秒激光在超快现象研究领域：飞秒激光犹如一个极为精细的时钟和一架超高速的“相机”可以将自然界中特别是原子、分子水平上的一些快速过程分析、记录下来。

飞秒激光在超强(又称为强场物理)领域：

- **飞秒脉冲的峰值功率和光强所对应的电磁场会远大于原子中的库仑场，从而很容易地将原子中的电子统统剥落出去。**
- **飞秒激光是研究原子，分子体系高阶非线性、多光子过程的重要工具。**
- **飞秒激光相应的能量密度只有在核爆炸中才可能存在。飞秒强光可以用来产生相干X射线和其它极短波长的光，可以用于受控核聚变的研究。**

飞秒激光超微细加工领域：

这一应用是近几年才开始发展起来的，目前已有不少重要的进展。与飞秒超快和飞秒超强研究有所不同的是飞秒激光超微细加工与先进的制造技术紧密相关，对某些关键工业生产技术的发展可以起到更直接的推动作用。

飞秒激光超微细加工是当今世界激光、光电子行业中的一个极为引人注目的前沿研究方向。

9.激光武器：

- **激光测距仪**：将其应用到火炮系统，大大提高了火炮射击精度。
- **激光雷达**：相比于无线电雷达，由于激光发散角小，方向性好，因此其测量精度大幅度提高。但由于大气的影响，激光雷达并不适宜在大范围内搜索，还只能作为无线电雷达的有力补充。
- **精确的激光制导导弹**，以及模拟战场上使用的激光武器技术运用。

美神秘机载激光武器曝光 专门对付“飞毛腿”(图)

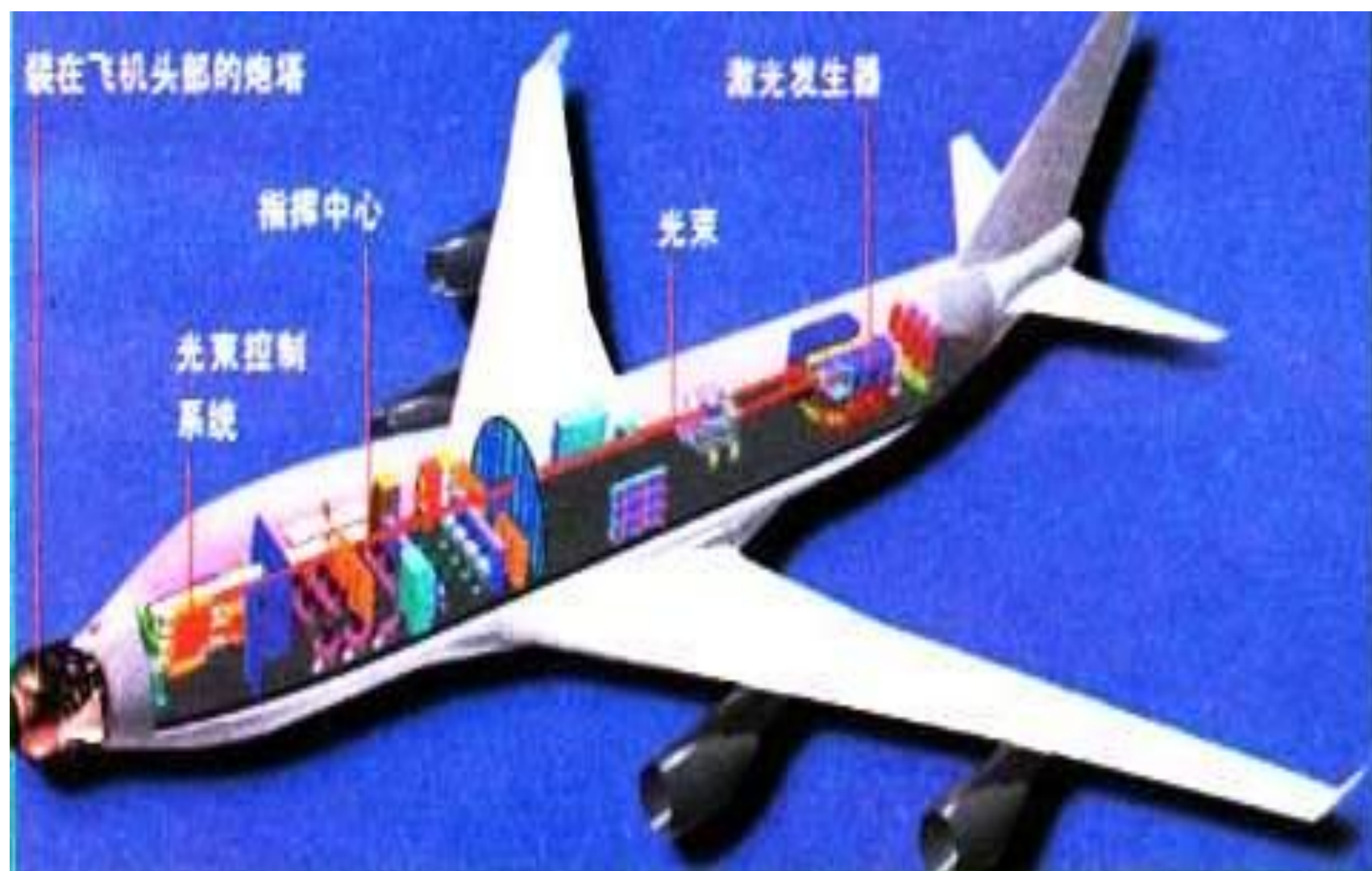
<http://news.tom.com> 2003年03月06日10时43分 来源:大洋网



激光武器安装在改造过的波音747飞机上

机载激光武器

(ABL), ABL的目标是研制装在经过改造的波音747飞机上安装激光武器, 用于从高空攻击敌方的战区弹道导弹。





**美军移动型战术高能激光系统
(THEL) 的激光发射部分**

俄罗斯新型激光武器亮相国际防务展(图)

(2005-2-18) 来自：新浪网 阅读317次



在2005年2月12日开幕的第七届阿布扎比国际防务展上，俄罗斯防务装备出口公司首次展示了一种新型的激光武器（左图）。据俄代表团负责人尼古拉·德米纠克介绍，这种新型的单兵自动光电对抗武器主要依靠其内置的激光雷达来追踪、锁定狙击手和反坦克系统的位置。展览期间，该武器还将在阿联酋境内的马卡特拉靶场进行现场演示。

尼古拉·德米纠克表示：“展览过程中，激光器将演示如何发现目标和下令发射激光束。激光束的强度能够确保迅速准确地摧毁敌方的光电仪器或导致狙击手暂时失明。”

激光武器的优点；无需进行弹道计算；无后坐力；操作简便，机动灵活，使用范围广；无放射性污染。

激光武器的分类：不同功率密度、输出波形、波长的激光，在与不同目标材料相互作用时，会产生不同的杀伤破坏效应。

按工作介质区分：固体、液体激光器和分子型、离子型、准分子型的气体激光器等。

按其发射位置可分：天基、陆基、舰载、车载和机载等类型。

按其用途还可分：战术型和战略型两类。

10.激光全息技术：

全息术的发明与发展：全息术即全息照相术，是记录波动（包括机械波、电磁波和光波）干扰的振幅和位相分布，以及使之再现的专门技术。

- 它广泛地用作三维光学的成像，也可用于声波（声全息）和射频波。
- “全息”意思是全部的信息：振幅信息，位相信息。

全息术的创立：1948年英籍匈牙利物理学家丹尼斯·盖伯为了提高电子显微镜的分辨本领提出了全息术的最初设想。采用汞灯作光源，首次拍摄了第一张全息照片（即全息图），并获得了相应的再现像（1971年得到了诺贝尔物理学奖）。

- 激光出现以前全息图的成像质量很差。
- 直到60年代出现激光这一相干强光源之后，全息术才得以迅速发展。

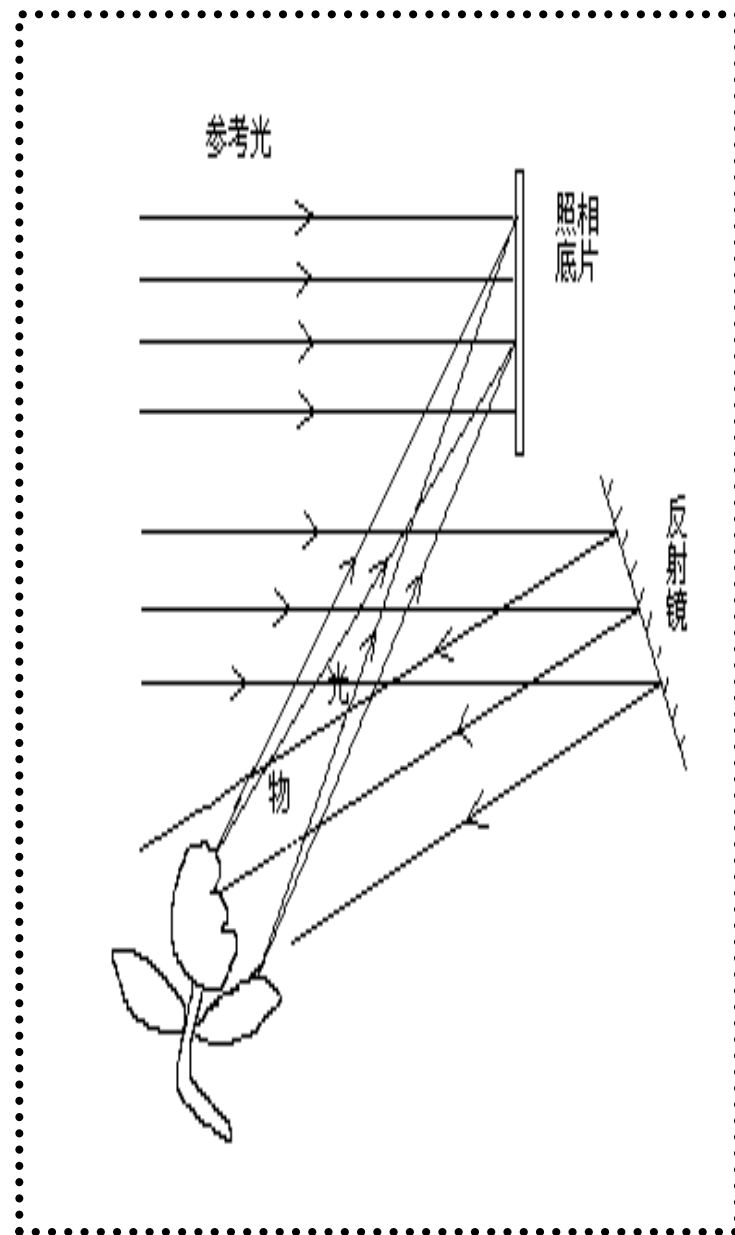
1962年随着激光器的问世，利思和乌帕特尼克斯（Leith and Upatnieks）在盖伯全息术的基础上引入载频的概念，发明了离轴全息术，有效地克服了当时全息图成像质量差的主要问题——孪生像，三维物体显示成为当时全息术研究的热点。

彩虹全息术：1969年本顿（Benton）发明，白光显示为特征的全息三维显示，与丹尼苏克（Denisyuk）的反射全息图相比，能在普通白炽灯下观察到明亮的立体像，还具有全息图处理工艺简单、易于复制等优点。

- **彩虹全息术与全息图模压复制技术结合：**

风靡世界的全息印刷产业：全息信用卡、全息商标、全息钞票、全息卡通、全息装饰材料、甚至全息服装等保安防伪及装璜装饰的全息图新应用。

- 拍摄全息照片的基本光路大致如图。
- 一激光光源（波长为 λ ）的光分成两部分：**参考光**：直接照射到底片上；**物光**：另一部分经物体表面散射的光也照射到照相底片。
- 参考光和物光在底片上各处相遇时将发生干涉，底片记录的即是各干涉条纹叠加后的图像。



全息照相的拍摄原理

11.光通信

由激光“携带”的信息(包括语言、文字、图像、符号等)通过一定的传输通道(大气、光纤等)送到接收器,再由光接收器鉴别并还原成原来的信息。这种将信息加载于激光的过程称之为调制,

完成这一过程的装置称为调制器。其中激光称为载波;起控制作用的低频信息称为调制信号。

解调：调制的反过程，即把调制信号还原成原来的信息。

