

第八章 光的量子性和激光

第四节 激光原理简介

8.4 激光原理简介

8.4.1 激光器概述

8.4.2 粒子的热平衡分布

8.4.3 自发辐射、受激辐射和受激吸收

8.4.4 布居反转与光放大

8.4.5 增益介质和增益系数

8.4.6 谐振腔的作用

8.4.7 谐振腔对频率的选择

8.4.8 激光的特点和应用

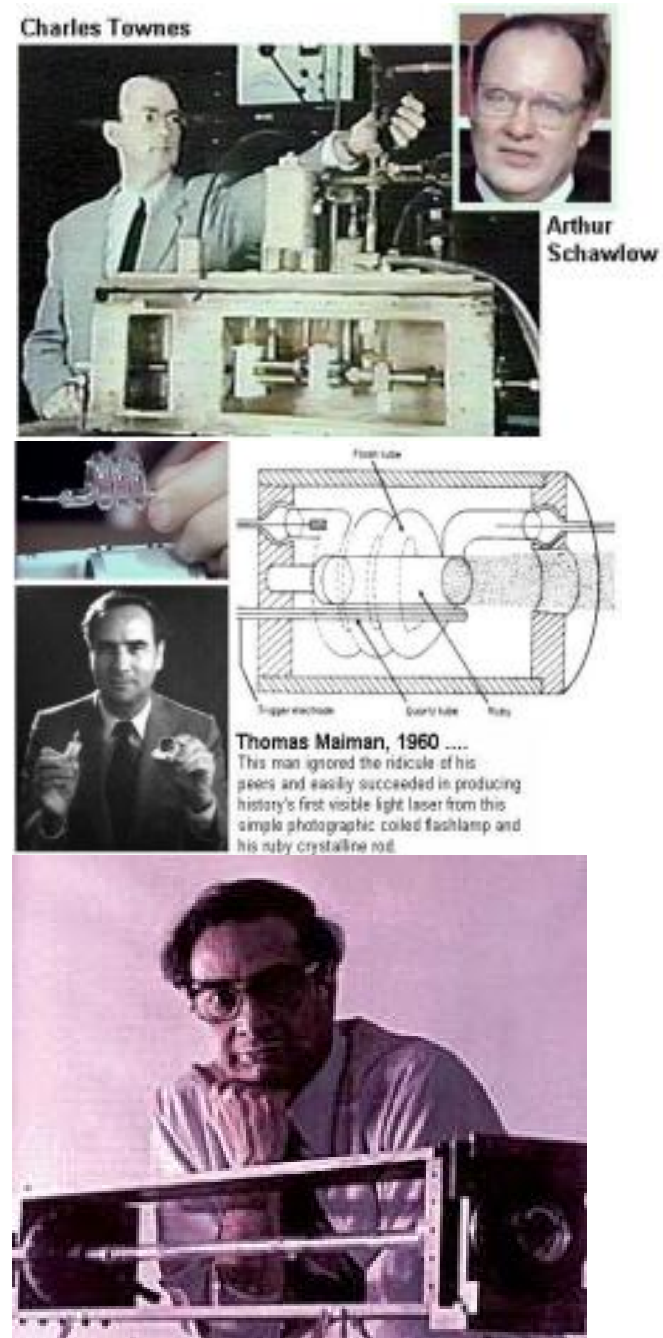
8.4.1 激光器概述

- **LASER** : **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (受激辐射的光放大)
- 是**量子理论**与**光学理论**完美结合的产物
- 量子论：分立能级、跃迁、粒子数反转，实现**光放大**
- 光学：法布里-珀罗腔实现选模（**单色性**）、细锐极大值（**方向性**）、布儒斯特窗实现**偏振性**

8.4.1 激光器概述

激光器的发展简史

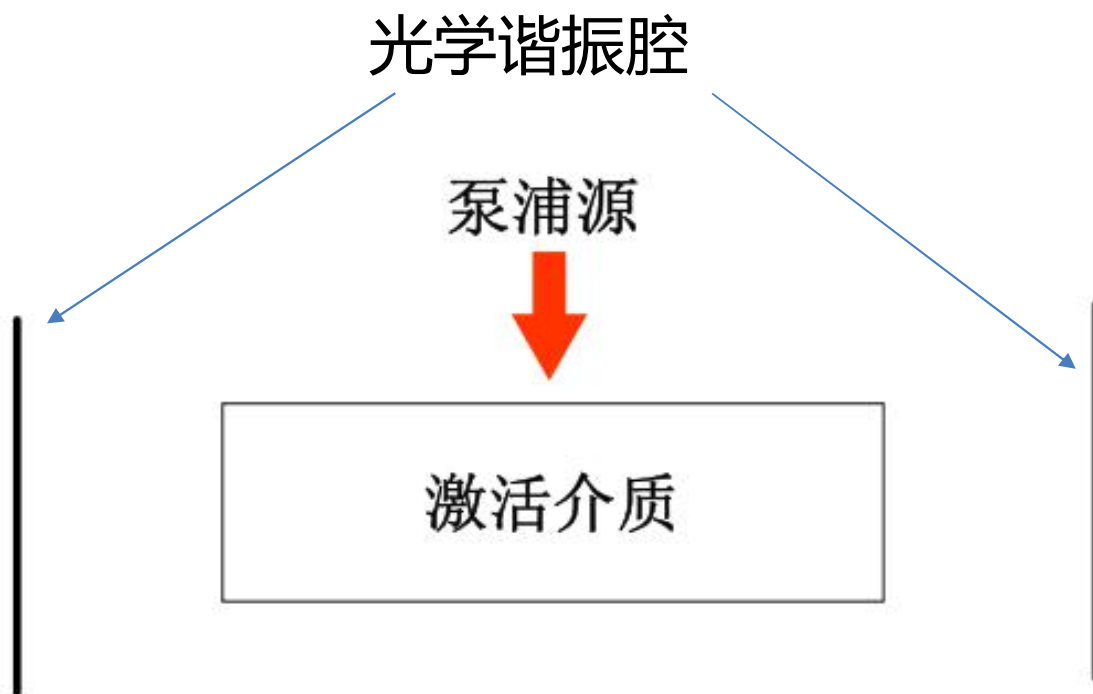
- 1954 , Charles Townes和Arthur Schawlow , 第一个MASER
- 1960 , 休斯顿航空公司 Theodore Malman , 第一台红宝石激光器(694nm)
- 1960 , Ali Javan , 第一台He-Ne连续激光器 (632.8nm)



8.4.1 激光器概述

激光器的基本构造

泵浦源、激活介质、谐振腔



8.4.2 粒子的热平衡分布

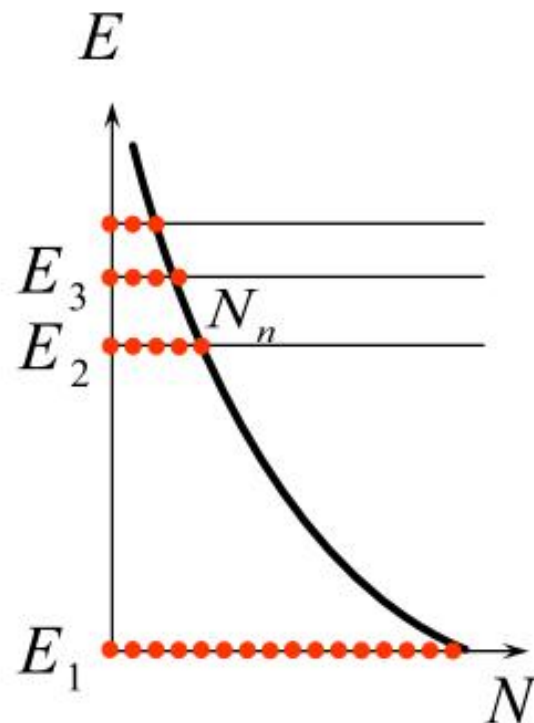
服从玻尔兹曼 (Boltzmann) 分布

$$N_n \propto e^{-E_n/kT}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}} < 1 \quad (E_2 > E_1)$$

室温下 $kT \sim 10\text{meV}$, 处于高能级上的粒子数 N_2 总是少于低能级上的粒子数。对可见光：

$$\frac{N_2}{N_1} : 10^{-44} \sim 10^{-100}$$



8.4.3 自发辐射、受激辐射和受激吸收

爱因斯坦辐射理论

- 高能级向低能级跃迁放出一个光子，
- 低能级向高能级跃迁吸收一个光子。

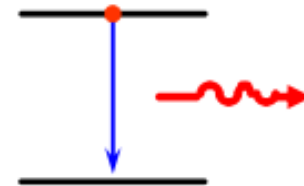
光子的频率为：

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

辐射、吸收过程和爱因斯坦系数

(1) 自发辐射，高能态的粒子自发向低能态跃迁：

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{自发}} = A_{21} N_2$$



8.4.3 自发辐射、受激辐射和受激吸收

辐射、吸收过程和爱因斯坦系数

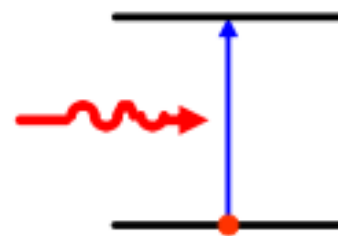
(2) 受激辐射，高能态的粒子在频率为 ν 的辐射场 $u(\nu)$ 的作用下向低能态跃迁：

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} = B_{21} u(\nu) N_2$$



(3) 受激吸收，低能态的粒子在频率为 ν 的辐射场 $u(\nu)$ 的作用下向高能态跃迁：

$$\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}} = B_{12} u(\nu) N_1$$



A_{21} , B_{21} 和 B_{12} 被称作爱因斯坦系数，为原子本身属性。

8.4.3 自发辐射、受激辐射和受激吸收

$E_2 \rightarrow E_1$ 辐射：

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} + \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{自发}} = B_{21}u(\nu)N_2 + A_{21}N_2$$

$E_1 \rightarrow E_2$ 吸收：

$$\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}} = B_{12}u(\nu)N_1$$

热平衡状态下： $u(\nu) = u_T(\nu)$ $u_T(\nu)$ -- 标准能谱

因此
$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{受激}} + \left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{自发}} = \left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{吸收}}$$

或
$$B_{21}u_T(\nu)N_2 + A_{21}N_2 = B_{12}u_T(\nu)N_1$$

8.4.3 自发辐射、受激辐射和受激吸收

$$B_{21}u_T(\nu)N_2 + A_{21}N_2 = B_{12}u_T(\nu)N_1$$

$$\Rightarrow u_T(\nu) = \frac{A_{21}N_2}{B_{12}N_1 - B_{21}N_2} = \frac{A_{21}}{B_{12} \frac{N_1}{N_2} - B_{21}}$$

利用普朗克公式 $u_T(\nu) = \frac{4}{c} r_0(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$

得到 $\frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{A_{21}}{B_{12} \frac{N_1}{N_2} - B_{21}}$

8.4.3 自发辐射、受激辐射和受激吸收

利用波尔条件 $\frac{N_1}{N_2} = e^{\frac{E_2 - E_1}{kT}} = e^{\frac{h\nu}{kT}}$ 得到

$$\frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{A_{21}}{B_{12}e^{h\nu/kT} - B_{21}}$$

该式需要对任何的 $h\nu/kT$ 都成立，需要系数分别相等

因此 $\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$ 或 $\begin{cases} B_{12} = B_{21} \\ A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21} \end{cases}$

自发辐射与受激辐射之比：

$$R = \frac{A_{21}}{B_{21}u(\nu)} = e^{h\nu/kT} - 1 \sim 10^{35}$$

8.4.4 布居反转与光放大

在时间 dt 内受激辐射与受激吸收的光子数之差为

$$dN_{21} - dN_{12} = B_{21}u(\nu)(N_2 - N_1)dt \propto N_2 - N_1$$

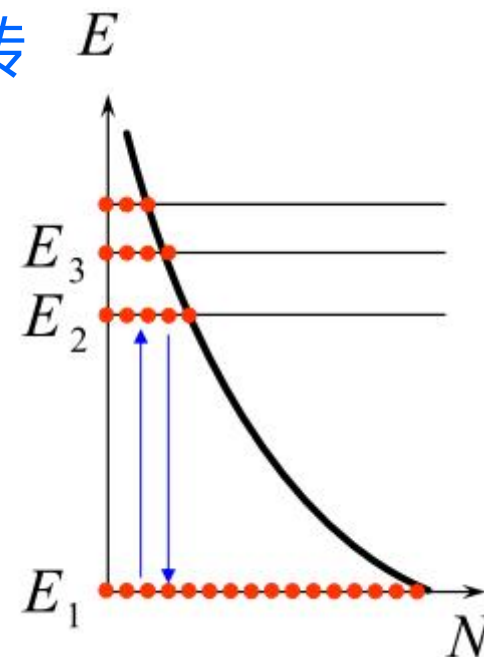
要实现受激光放大，需要 $N_2 > N_1$ ，即粒子数反转（布居反转）

仅增加光强（提高温度），无法实现布居反转

$$u_T(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12}} \frac{N_2}{N_1 - N_2}$$

即使 $u_T(\nu) \rightarrow \infty$ 也只能使 $N_2 = N_1$

光场在向高能级输送电子的同时，也将高能级的电子向低能级输送！



8.4.4 布居反转与光放大

能级的寿命

由于自发辐射，使能级上的粒子数减少

$$N_2 \rightarrow N_2 + dN_2 \quad dN_2 = -dN_{21} = -A_{21}N_2 dt$$

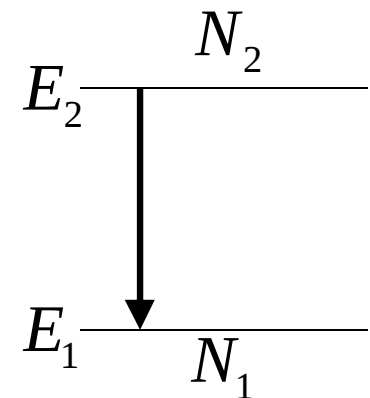
$$\frac{dN_2}{N_2} = -A_{21}dt \quad \underline{\text{积分}} \quad N_2 = N_{20}e^{-A_{21}t} = N_{20}e^{-t/\tau} \quad \tau = \frac{1}{A_{21}}$$

经过时间 τ 后，该能级上的粒子数为 $N_2 = \frac{N_{20}}{e}$

τ ：能级的寿命

激发态寿命 $\tau \ll 10^{-8} \text{ s}$

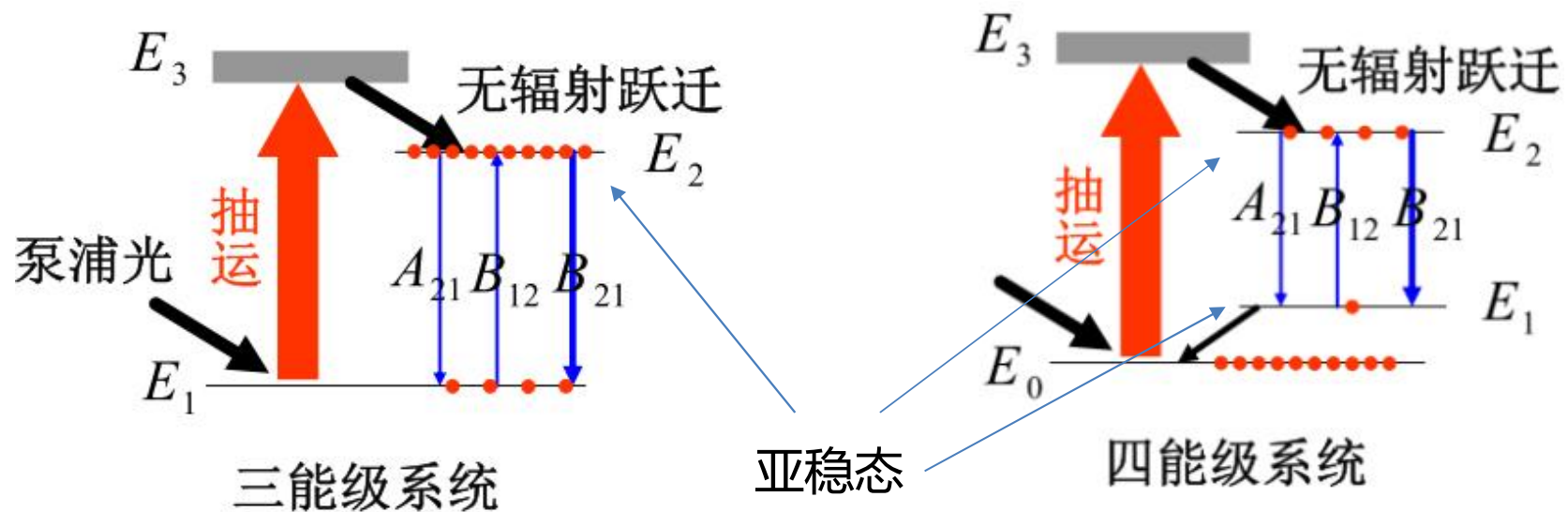
亚稳态寿命 $\tau = 10^{-3} \sim 10^0 \text{ s}$



8.4.3 布居反转与光放大

光泵浦：

- 二能级系统无法实现布居反转。
- 要实现布居反转，需要利用无辐射跃迁，设法使粒子在亚稳态上积累。
- 由三能级系统，最好是四能级系统实现。
- 以三能级为例：粒子被激发到能级3，迅速弛豫到能级2，并在能级2上积累能级2、1间实现粒子数反转



8.4.5 增益介质和增益系数

一束光通过布居反转区域：

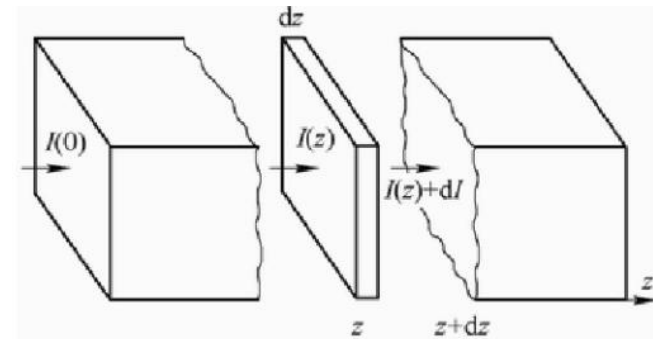
$$G = \frac{dI(z)/I(z)}{dz}$$

当光强很弱时，增益系数近似为一常数，称为线性增益或小信号增益

吸收 $dI = -aI dz$

放大 $dI = G I dz$

$$I = I_0 e^{Gz} \quad I_0 \text{是入射光强}$$



增益饱和

G 与频率 ν 和光强 I_0 有关，不会一直增长，当入射光强增大到一定程度后， G 会随 I_0 的增加而下降。其机理是 I 随着传输距离增加时，高能粒子也不断被消耗，因此 $G(z)$ 随之减小。

8.4.5 增益介质和增益系数

增益介质：

(1) **气体激光器**：增益介质为气体原子、气体分子或气体离子（又称为原子激光器、分子激光器和离子激光器）

原子激光器：产生增益作用的是未电离的气体原子，跃迁发生在气体原子的不同激发态之间。气体包括：氦、氖、氩、氪、氙等惰性气体和镉、铜、锰、锌、铅等金属原子蒸汽。典型代表是He-Ne激光器。

分子激光器：产生增益作用的未电离的气体分子。跃迁在振转能级之间。气体包括： CO_2 、CO、 N_2 、 O_2 、 H_2 等分子气体。典型代表是 CO_2 激光器。

准分子激光器：在基态解离为原子而在激发态短暂结合成分子的不稳定缔合物，跃迁产生在其束缚态和自由态之间，包括XeF、KrF、ArF等，典型代表为XeF。

离子激光器：作用介质是已电离的气体离子，跃迁发生在离子的不同激发态之间。主要有惰性气体离子、分子气体离子和金属蒸汽离子。典型的是 Ar^+ 激光器。

8.4.5 增益介质和增益系数

增益介质：

(1) 气体激光器

激励方式：气体放电激励、电子束激励、热激励、化学反应激励等。

波长范围：真空紫外—远红外

特点：谱线上万条，输出光束质量高（方向性和单色性好）、连续输出功率大（CO₂激光器），结构简单，造价一般较低。

应用：在材料加工、医疗、通信和能源等方面应用广泛。

历史：1961年，第一台He-Ne激光器。

8.4.5 增益介质和增益系数

增益介质：

(2) 固体激光器：以固体作为激光增益介质。

通常在固体的基质材料（晶体、玻璃等）中，掺入少量金属离子（激活离子），跃迁发生在激活离子的不同工作能级之间。

三价稀土金属离子、二价稀土金属离子、过渡金属离子和铜系金属离子。

典型代表：红宝石（ $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ）激光器、掺钕钇铝石榴石（ $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ）激光器等。

泵浦：光泵浦为主（闪光灯和半导体激光二极管）

特点：可见光—近红外，谱线数千条，输出能量大（多级钕玻璃脉冲激光器，单脉冲输出能量可达数万焦）。

应用：激光测距、材料加工、医疗、光谱学、激光核聚变等。

8.4.5 增益介质和增益系数

增益介质：

(3) 液体激光器：以液体作为激光增益介质。

增益介质：有机化合物液体（染料）和无机化合物液体两类。

典型代表：染料激光器（吐吨类、香豆素类、恶嗪类和花青类）

泵浦：光泵浦为主（闪光灯和激光泵浦）

特点：紫外—近红外（ $300\text{nm} \sim 1.3\mu\text{m}$ ），可通过混频将波段扩展到真空紫外和中红外。波长连续可调谐是最重要的输出特性。溶液稳定性比较差是其缺点。

应用：激光光谱学、光化学、同位素分离、光生物学等

历史：1966年，第一台由红宝石激光器泵浦的氯铝钛花青染料激光器问世。

8.4.5 增益介质和增益系数

增益介质：

(4) 半导体激光器：也称激光二极管 (Laser Diode, LD) ,以半导体为工作介质。

增益介质：(a) IIIA-VA族化合物半导体，如砷化镓 (GaAs)、磷化铟 (InP) 等；(b) IIB-VIA族化合物半导体，如硫化镉 (CdS) 等；(c) IVA-VIA族化合物半导体，如碲锡铅 (PbSnTe) 等。根据生成的PN结所用材料和结构不同，有同质结、异质结和量子阱等多种类型。

泵浦：注入电流方式。

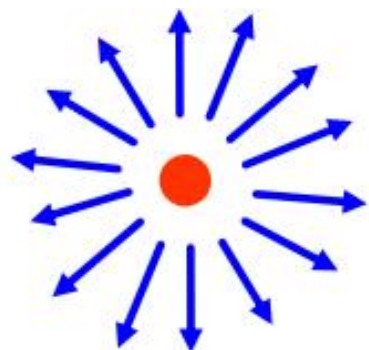
特点：波长在近红外 (920nm~1.65 μ m)，其中1.3 μ m和1.55 μ m是光纤通信的窗口。具有能量转换效率高、易于高速调制、小型化、寿命长 (可达百万小时以上) 等突出特点。

应用：激光存储 (光盘)、高速印刷、全息、光通信等。

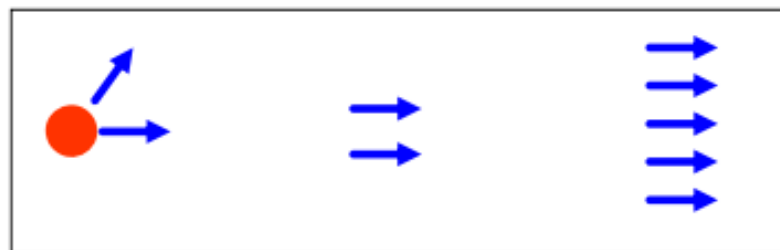
历史：1962年，第一台半导体激光器 (GaAs) 问世。

8.4.6 谐振腔的作用

介质发光本身各向异性→光能无法集中，充其量做到自发辐射放大



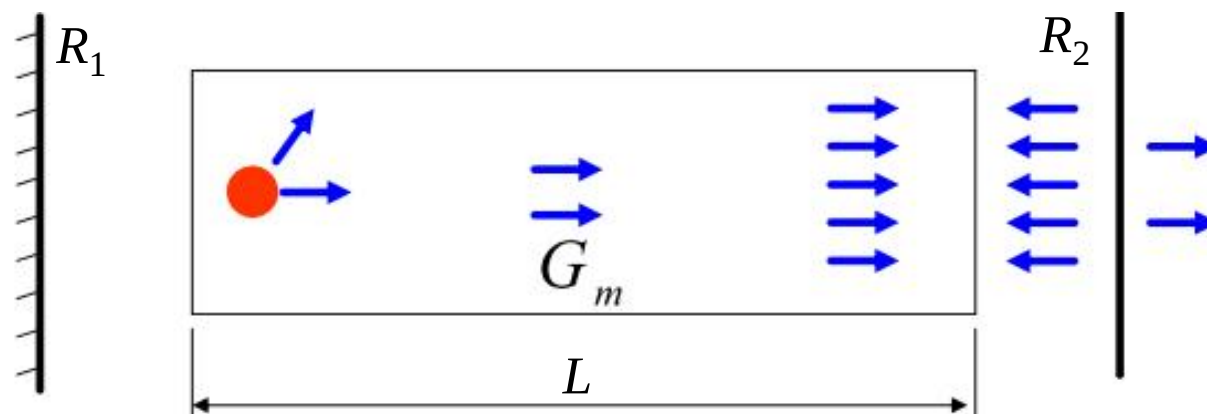
自发辐射



自发辐射放大

8.4.6 谐振腔的作用

只有与反射镜轴向平行的光束能反复通过增益介质，连锁放大，最终形成稳定的光束。（方向选择性）



提高 $Q \rightarrow$ 提高 R_1 、 R_2

但 R_1 、 R_2 之一不能为 100% $\rightarrow$ 耦合输出

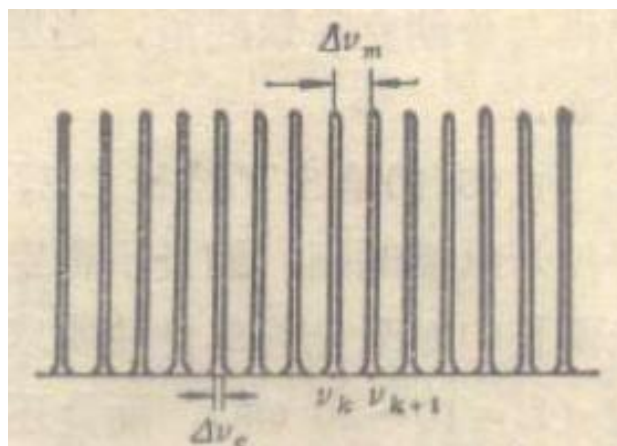
阈值增益： $R_1 R_2 \cdot e^{G_m L} = 1$

$$G_m = -\frac{1}{2L} \ln(R_1 R_2)$$

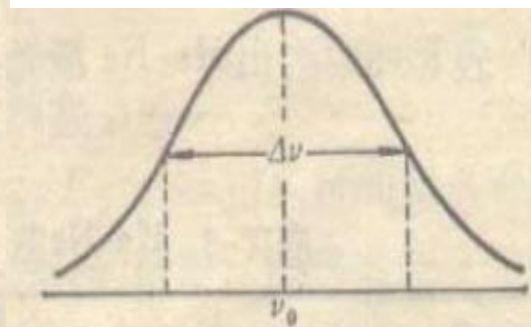
8.4.7 谐振腔对频率的选择

(1) 由谐振腔决定的纵模间隔和单模线宽

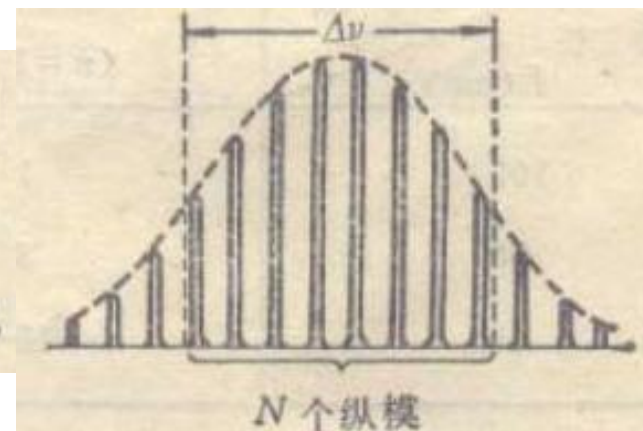
$$\text{间隔: } \Delta\nu_m = \frac{c}{2nL} \qquad \text{线宽: } \Delta\nu = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda = \frac{c(1-R)}{2\pi RL\sqrt{R}}$$



谐振腔



激活介质



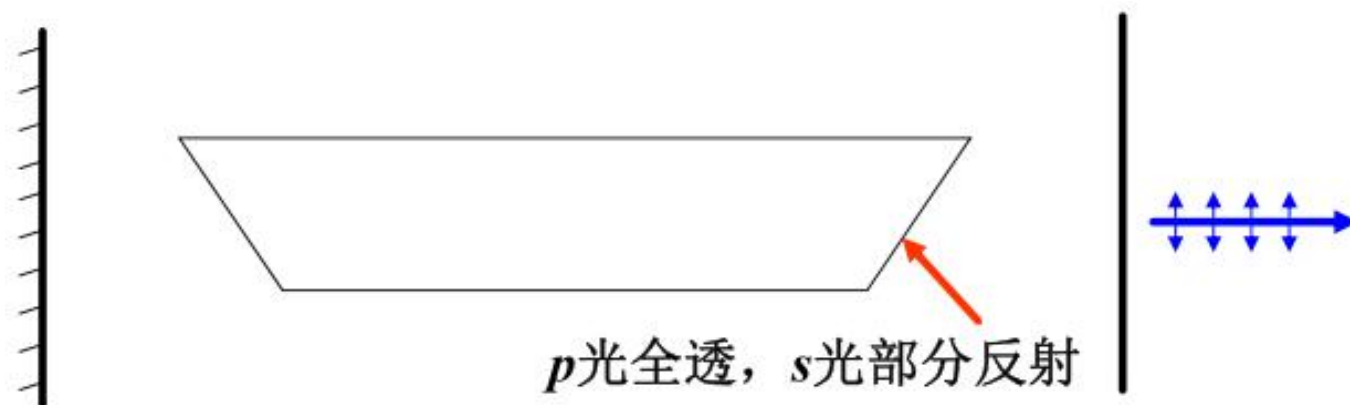
总效果

(2) 激活介质的发射线宽

自然线宽、碰撞展宽、多普勒展宽

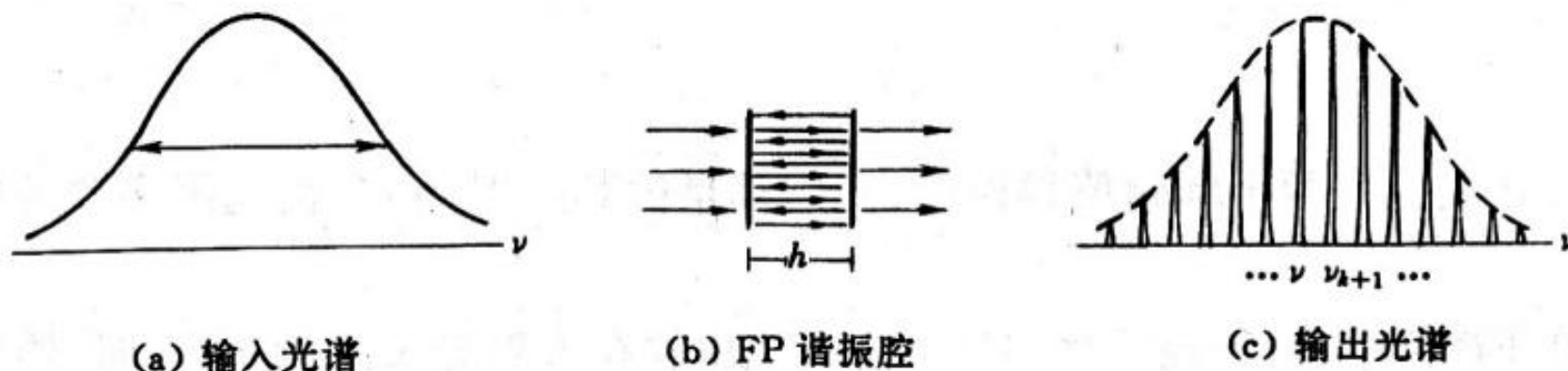
8.4.7 谐振腔对频率的选择

(3) 布儒斯特片的作用



s 光被抑制，不能成长为激光； p 光透过 → 偏振选择性

8.4.7 谐振腔对频率的选择



一束平行光正入射于一FP腔，则透射场也是一束平行光，显然，这种场合并不会出现干涉图样。然而，光在FP腔内的多次反射和透射而相干叠加，其结果使透射光的光谱结构明显地区别于入射光谱，FP腔将入射光的连续宽光谱改变为透射光的准分立谱。

8.4.7 谐振腔对频率的选择

例：FP谐振腔，腔长10cm，腔面反射率0.95，入射光谱中心波长为600nm，谱宽为1nm。试估算该FP腔输出的透射光谱中含有多少个纵模频率及其单模线宽。

纵模间隔：
$$\Delta\nu = \frac{c}{2nh} \approx 1.5 \times 10^3 \text{ MHz}$$

光谱波长宽为1nm对应的频率宽度：

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{所以：} \Delta\nu_0 \approx \frac{c\Delta\lambda_0}{\lambda_0^2} \approx 8.3 \times 10^5 \text{ MHz}$$

输出纵模数
$$N = \frac{\Delta\nu_0}{\Delta\nu} \approx 5 \times 10^2$$

单模线宽
$$\Delta\nu_k \approx \frac{c}{2\pi nh} \frac{1-R}{\sqrt{R}} \approx 24 \text{ MHz} \quad \Delta\lambda_k \approx \frac{\lambda_k^2}{2\pi nh} \frac{1-R}{\sqrt{R}} \approx 3 \times 10^{-5} \text{ nm}$$

8.4.8 激光的特点和应用

特点：

- 方向性强 → 极高的亮度
- 极高的时空相干性

飞秒 (10^{-15}s) —— 万亿分之一秒 (超短脉冲)

超快 (3.9fs) —— 超快测量手段

超强 (100TW) 自然界存在

聚焦强度	$10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$	$3.5 \times 10^{16}\text{W}/\text{cm}^2$
------	-------------------------------	--

光 压	10^{12}bar	1bar
-----	---------------------	---------------

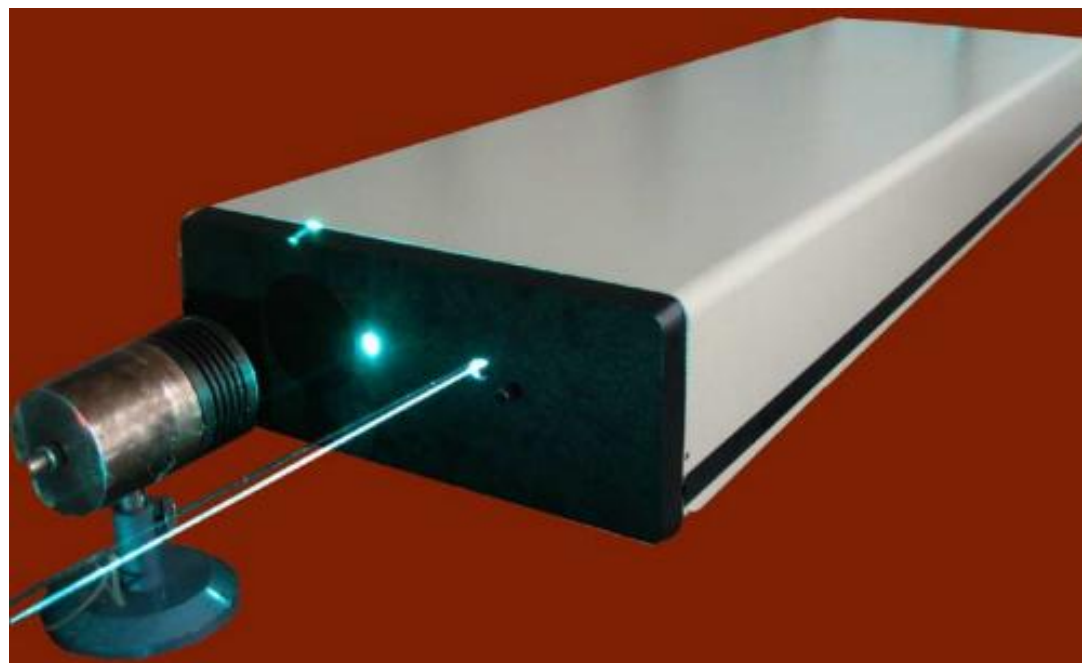
加 速 度	10^{21}g	g
-------	-------------------	------------

磁 场	10^9Gauss	0.5Gauss
-----	--------------------	-------------------

8.4.8 激光的特点和应用

应用：信息：光驱、复印机（打印机）、光通信

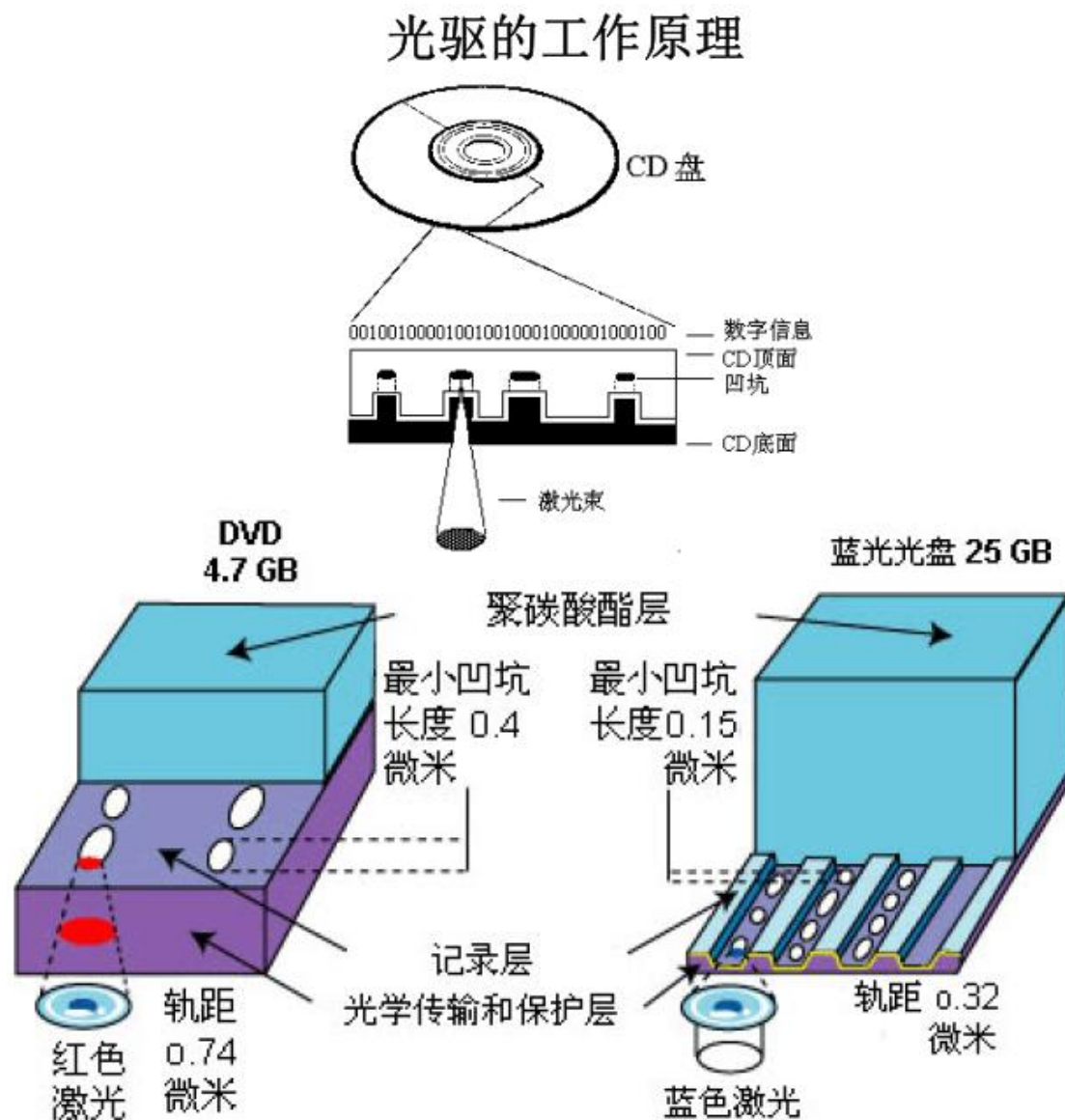
- 医学：眼科手术、乳腺癌早期诊断
- 加工：汽车焊接、玻璃内雕
- 军事：测距、激光雷达、反导、致盲、光电对抗
- 能源：激光核聚变
- 科研：.....



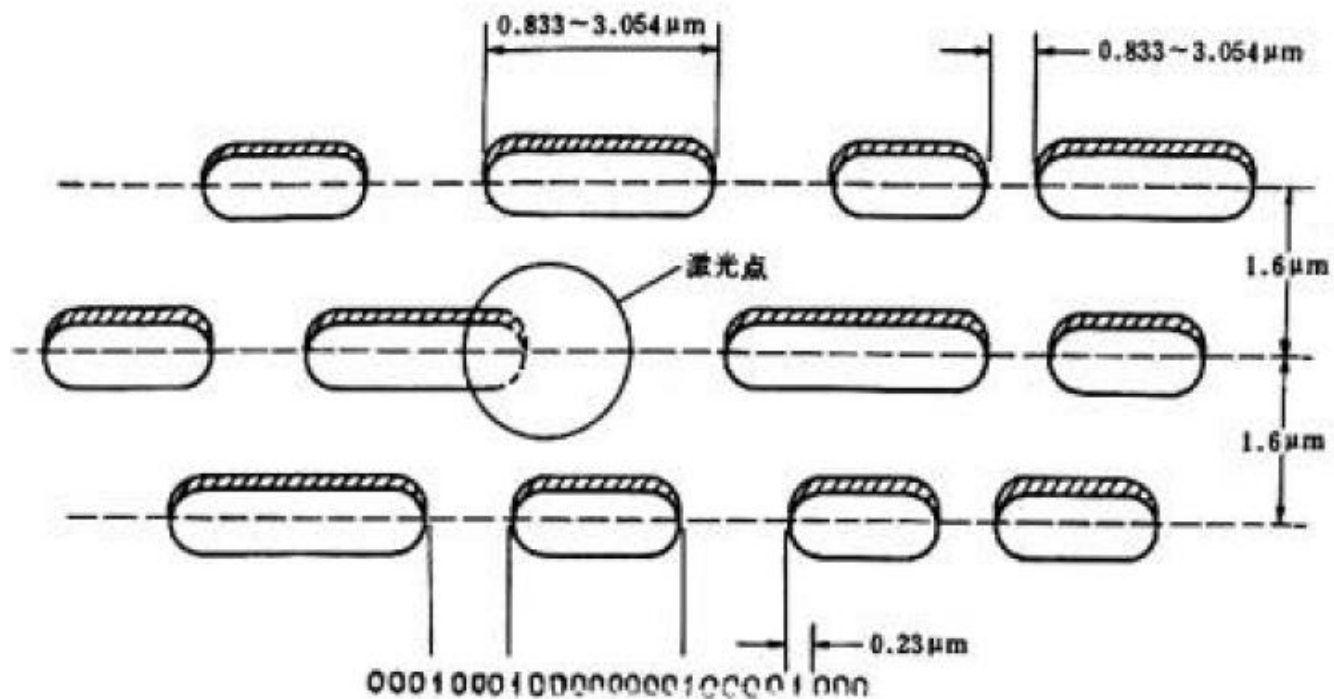
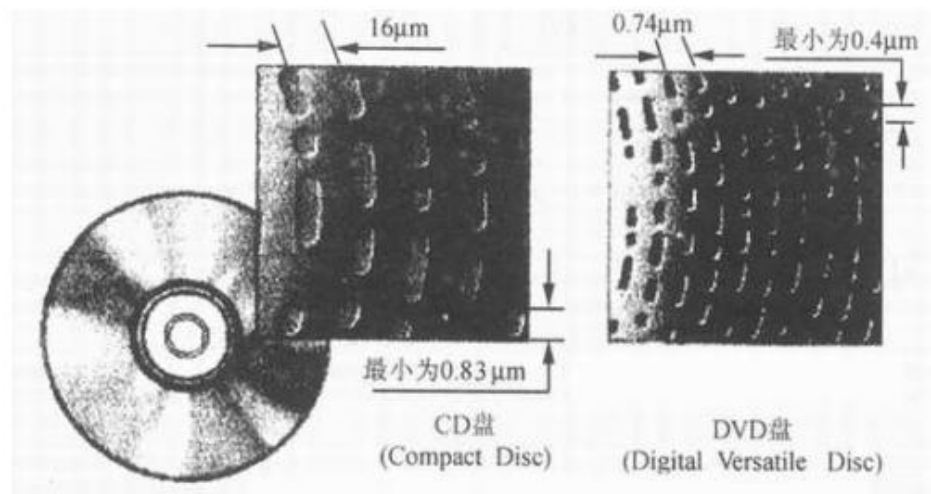
8.4.8 激光的特点和应用



8.4.8 激光的特点和应用

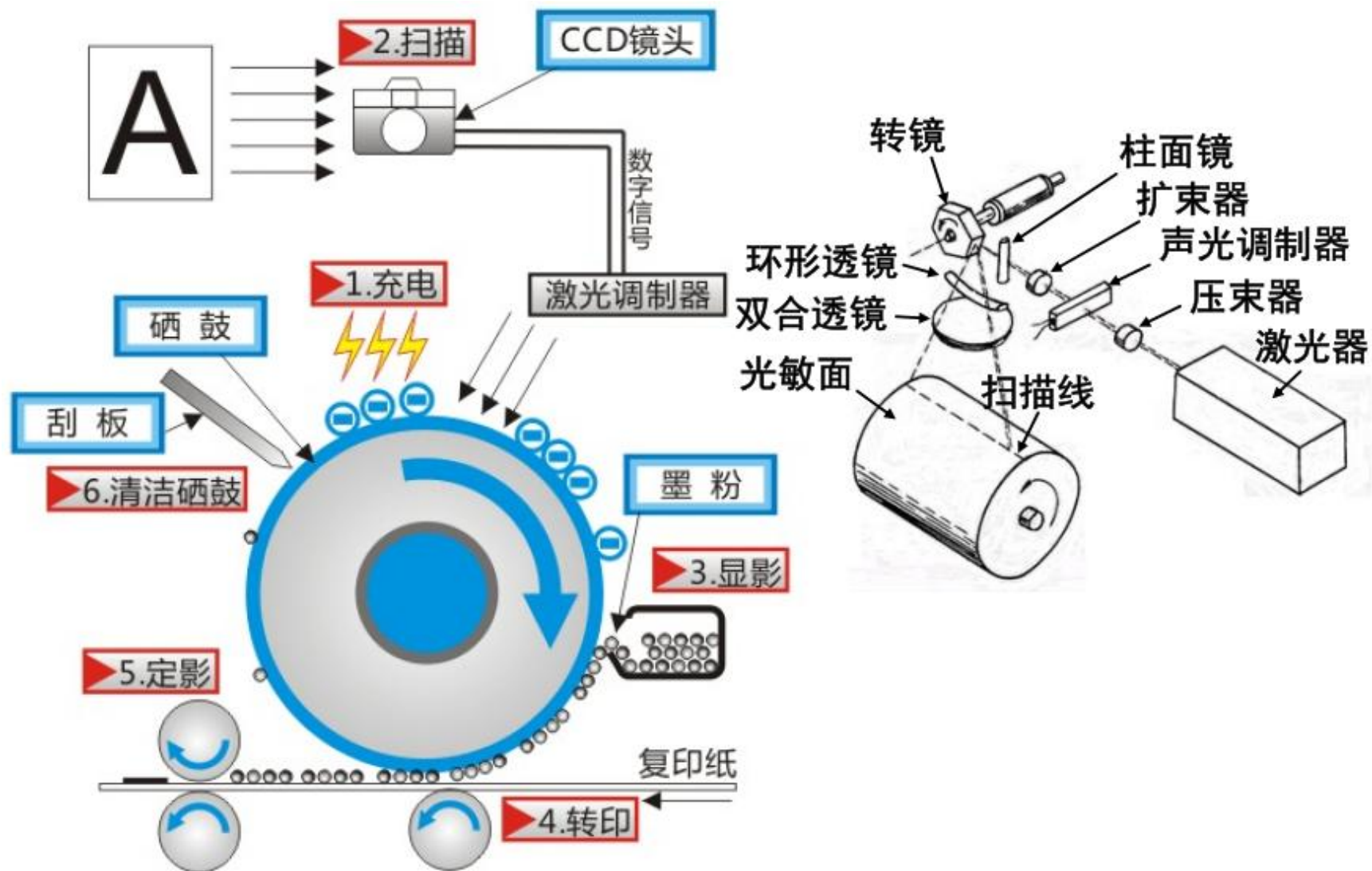


8.4.8 激光的特点和应用



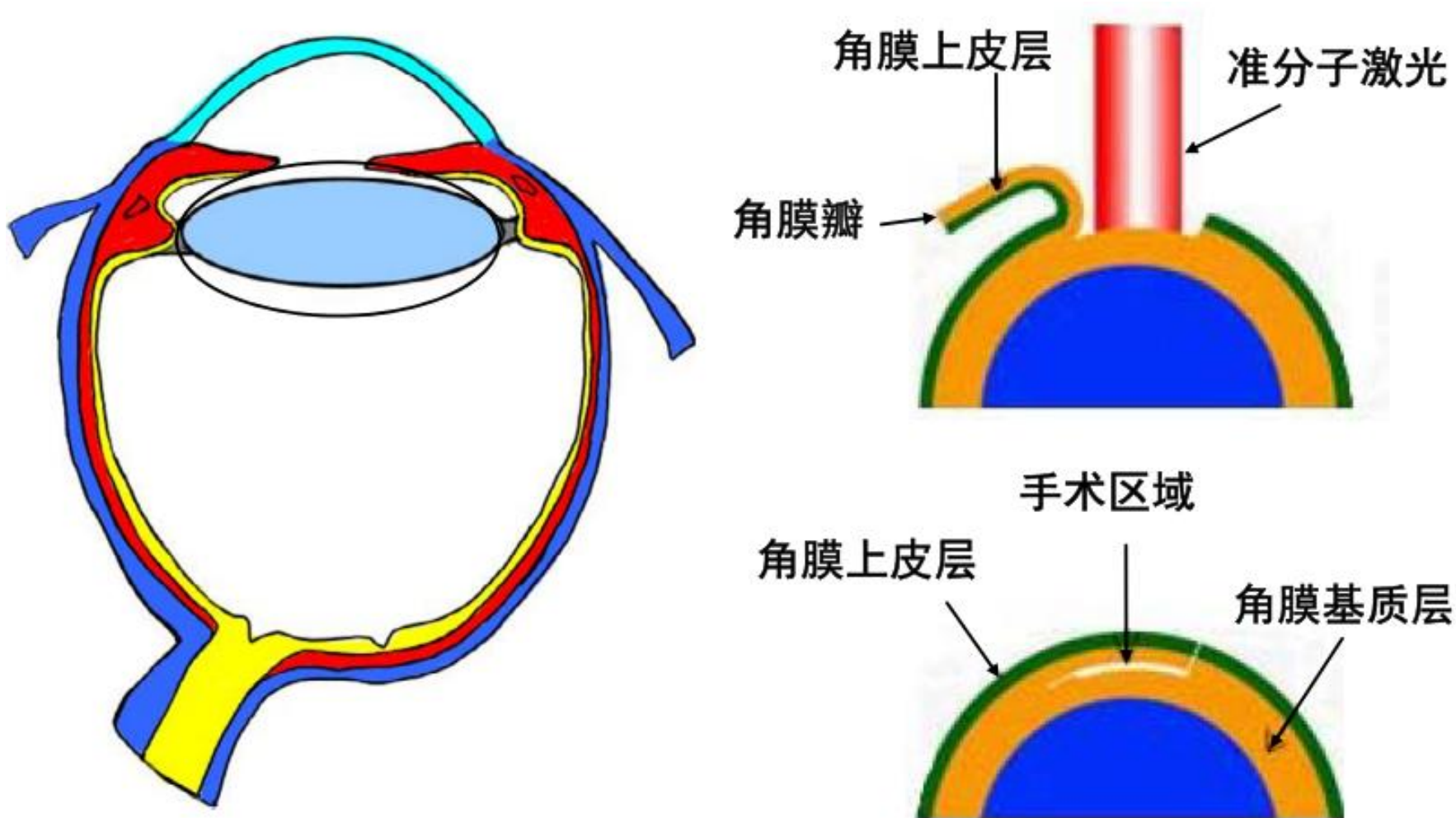
8.4.8 激光的特点和应用

激光复印件、打印机的工作原理



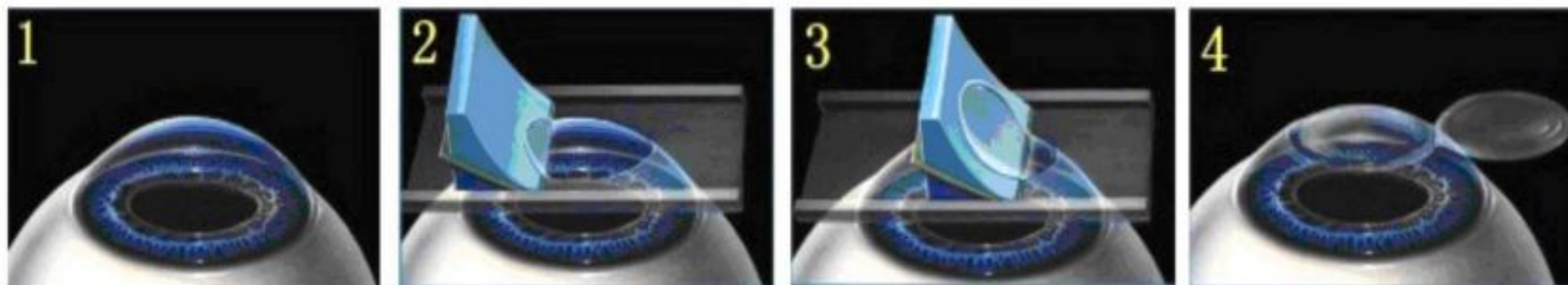
8.4.8 激光的特点和应用

激光原位角膜磨镶术（LASIK）——激光近视矫正



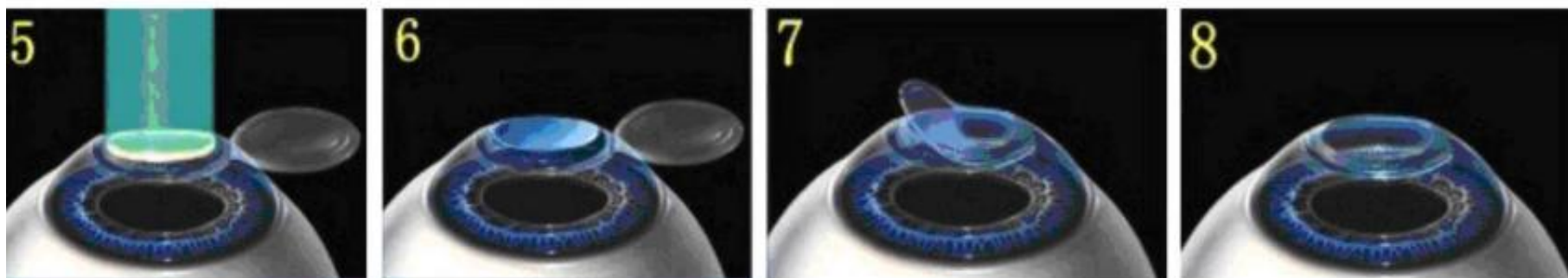
8.4.8 激光的特点和应用

激光原位角膜磨镶术（LASIK）——激光近视矫正



1~3：制作角膜瓣

4：掀开角膜瓣



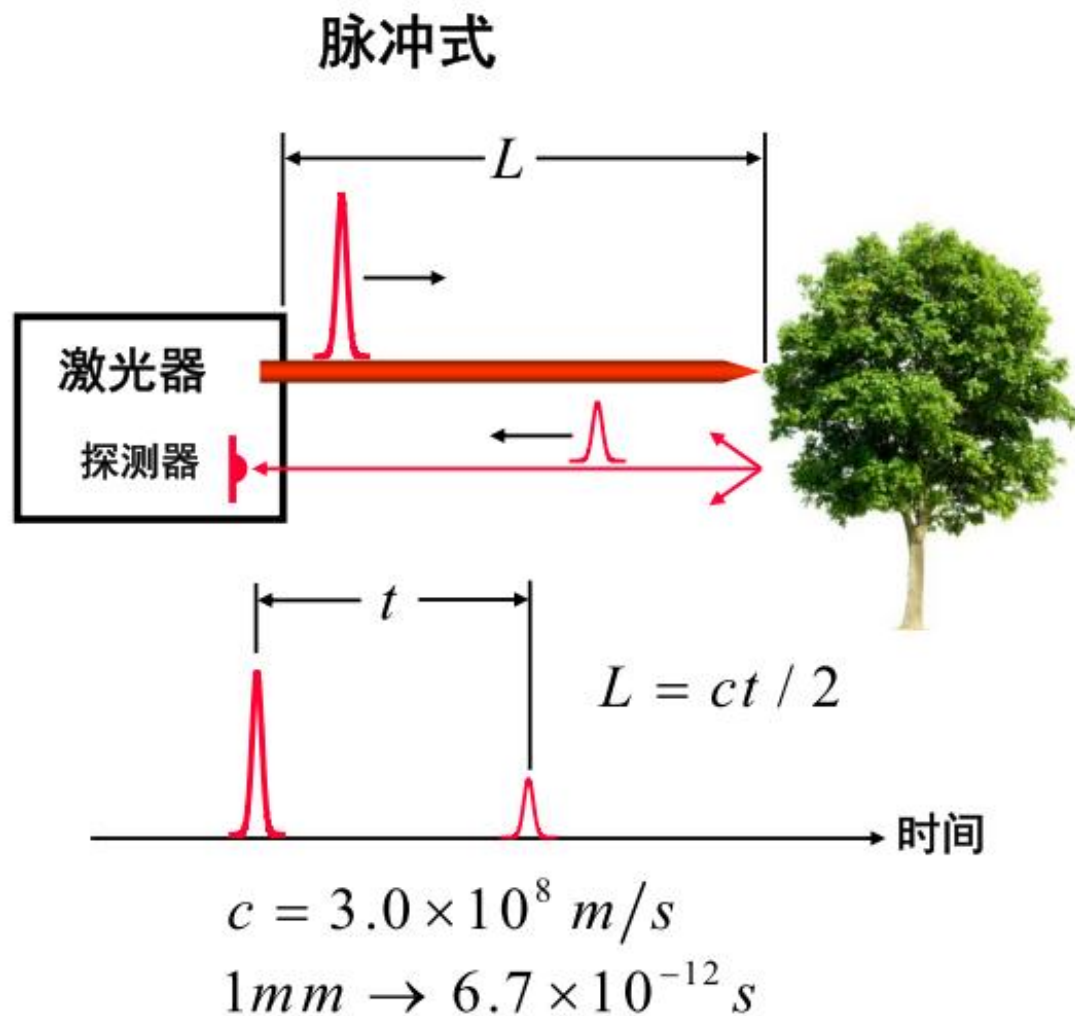
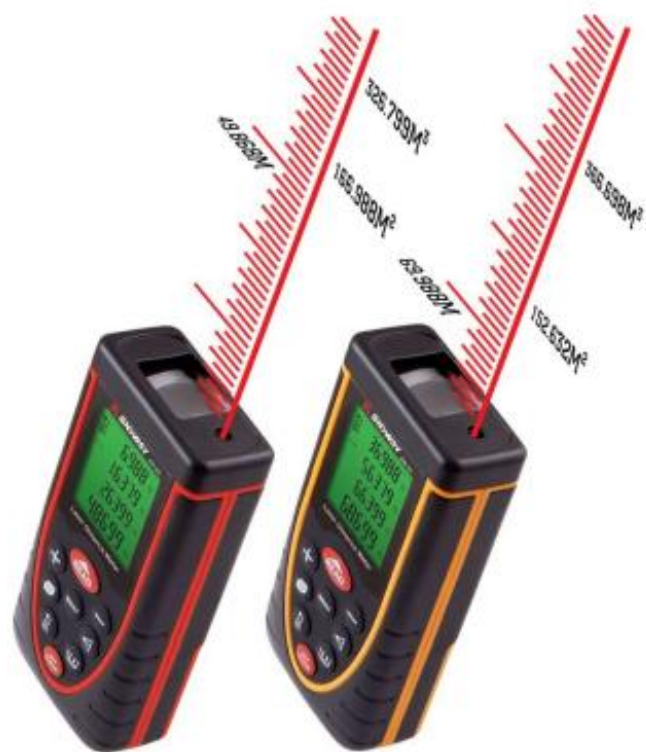
5~6：激光切削

7：角膜瓣复位

8：手术完成

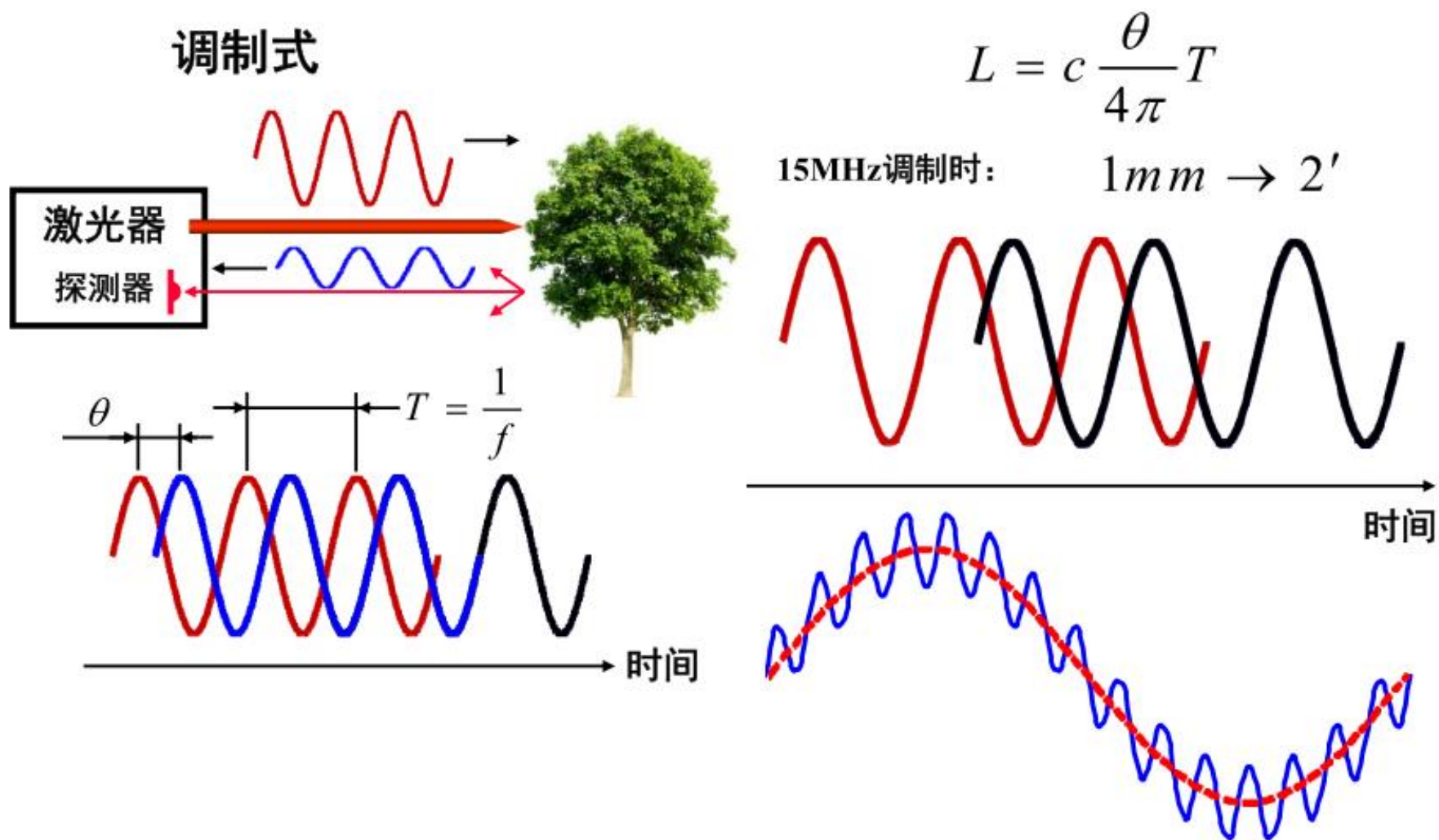
8.4.8 激光的特点和应用

激光测距



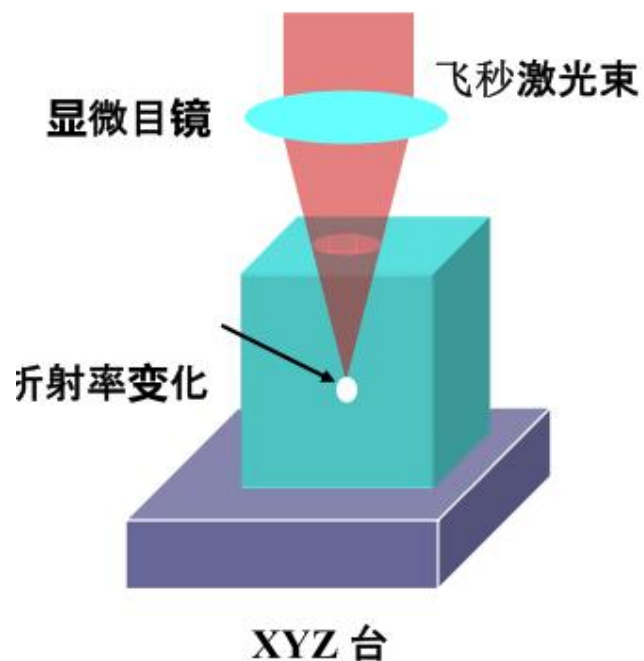
8.4.8 激光的特点和应用

激光测距



8.4.8 激光的特点和应用

激光加工



激光的大规模应用改变了人类的生产、生活方式，推动了人类社会的文明进程。



科学改变社会！知识改变命运！

高琛教授视频公开课：

<http://www.icourses.cn/viewVCourse.action?courseCode=10358V010>

本节重点

- (1) 爱因斯坦的辐射理论
- (2) 布居反转条件
- (3) 激光器的结构和各部分的作用
- (4) 增益阈值条件

作业

P304-2