

现代光学技术与进展

张增明

中国科学技术大学物理实验教学中心

光学简史

光学

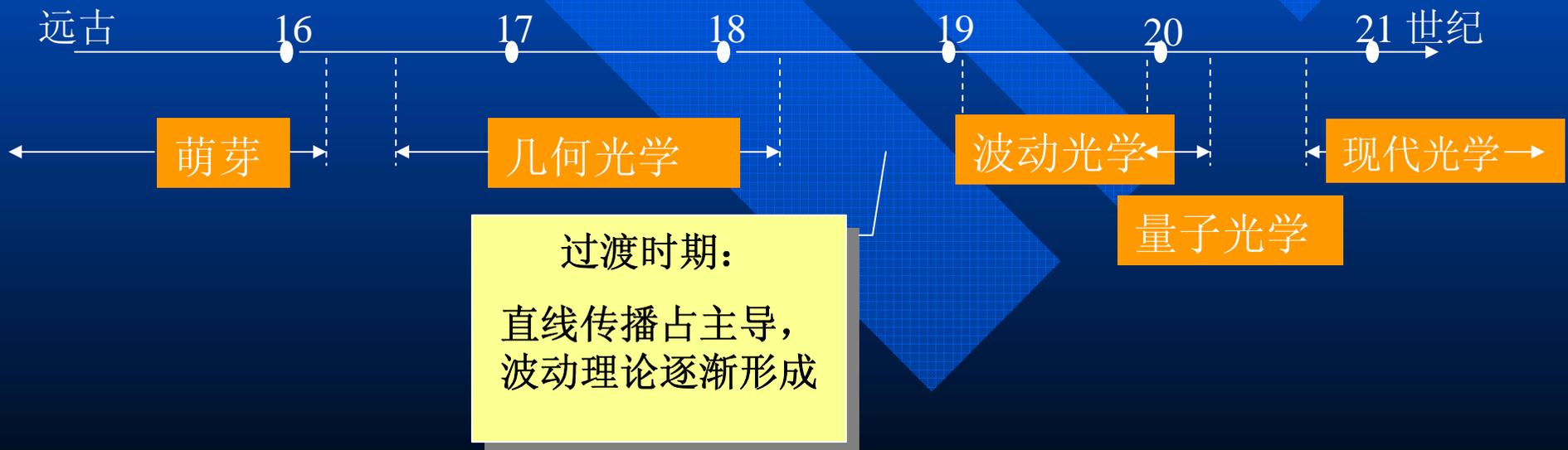
萌芽时期： 远古至十六世纪初

几何光学时期： 十六世纪中叶至十八世纪初

波动光学时期： 十九世纪初至十九世纪末

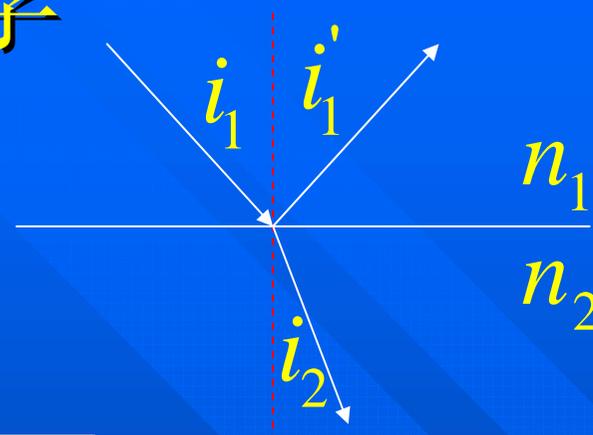
量子光学时期： 十九世纪末至二十世纪初

现代光学时期： 二十世纪六十年代至今



几何光学

- 光的粒子性
- 直线传播
- 反射定律
- 折射定律

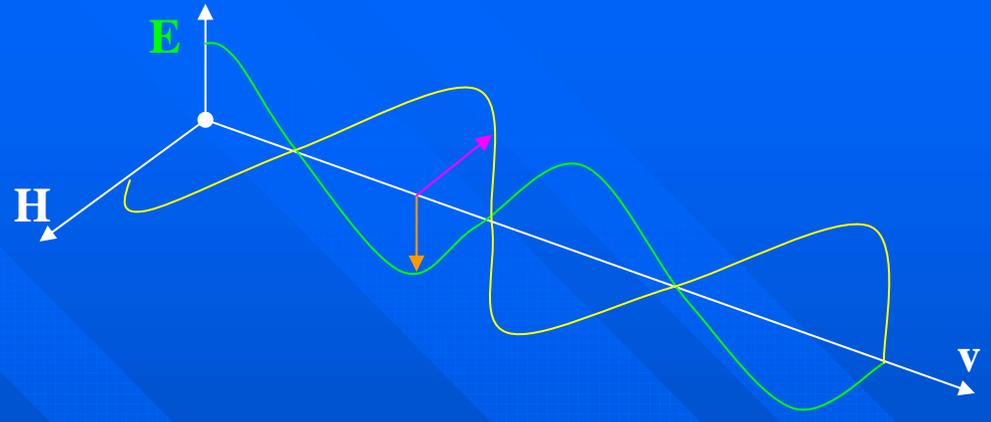


光学仪器

- 显微镜
- 望远镜
- 照相机
- 分光镜



物理光学



■ 光的波动性

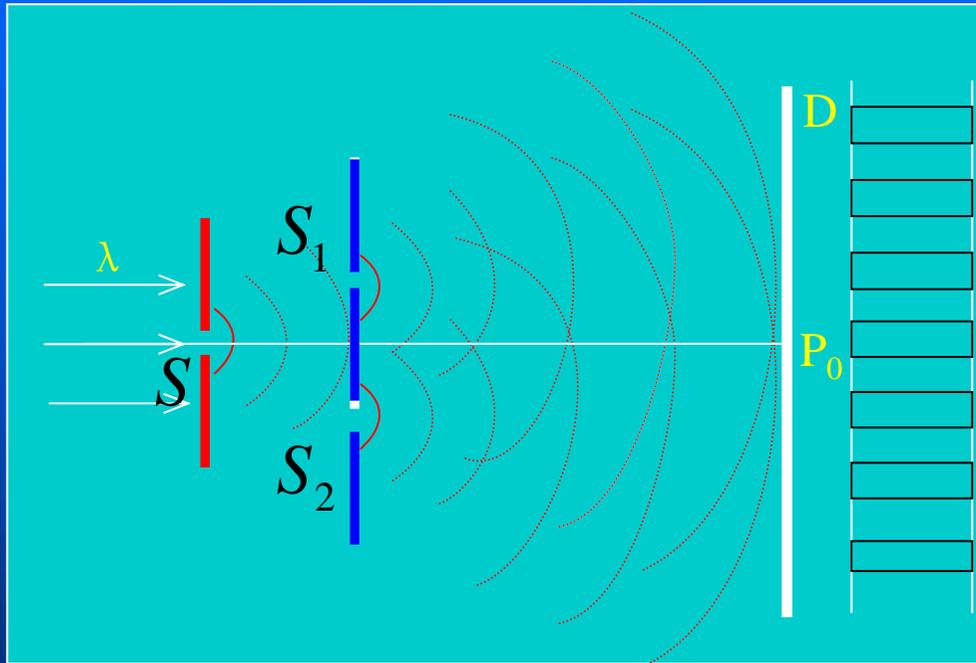
– 光的干涉

- 测量微小位移量
 - 等倾、等厚干涉

– 光的衍射

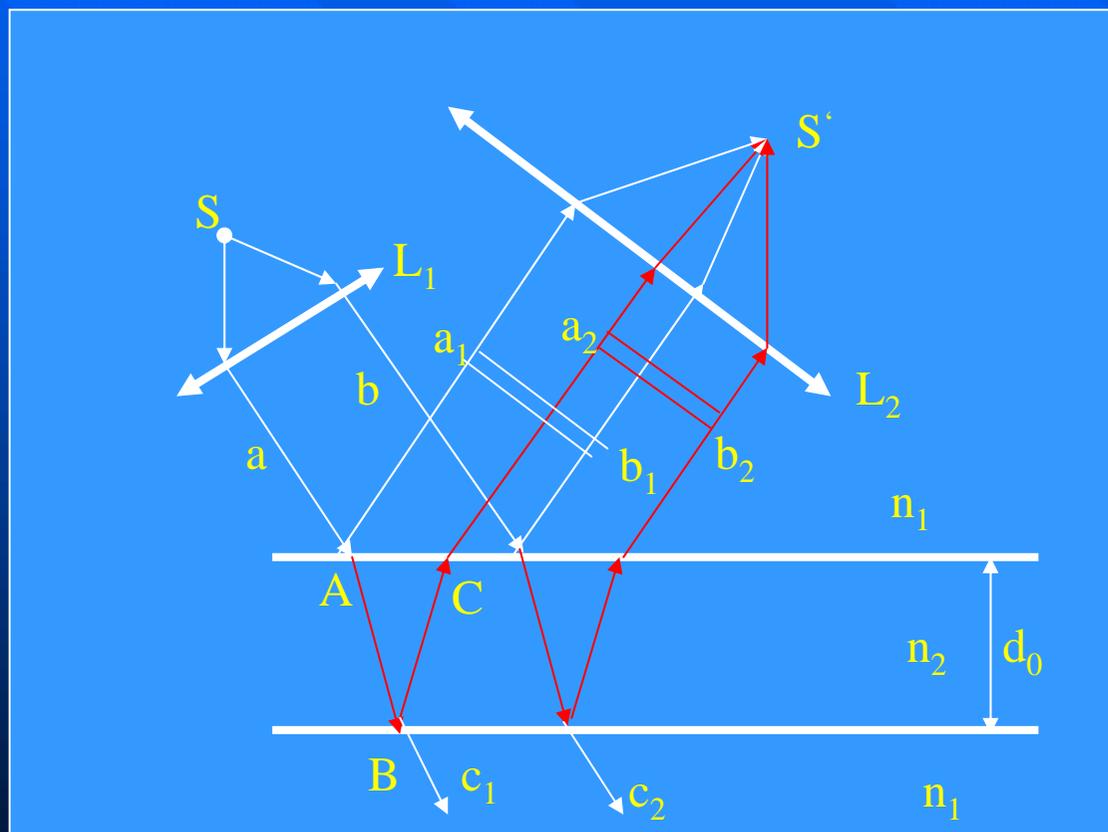
- 测量微粒直径
- 色散分光：光栅光谱仪

双缝干涉

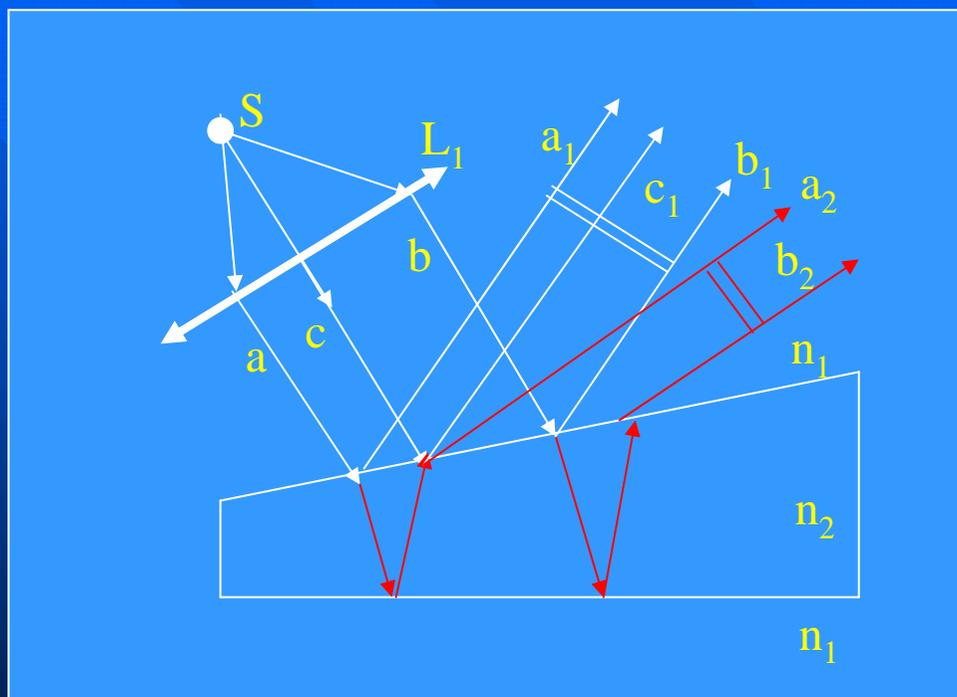


$$\Delta y = \frac{r_0}{d} \lambda$$

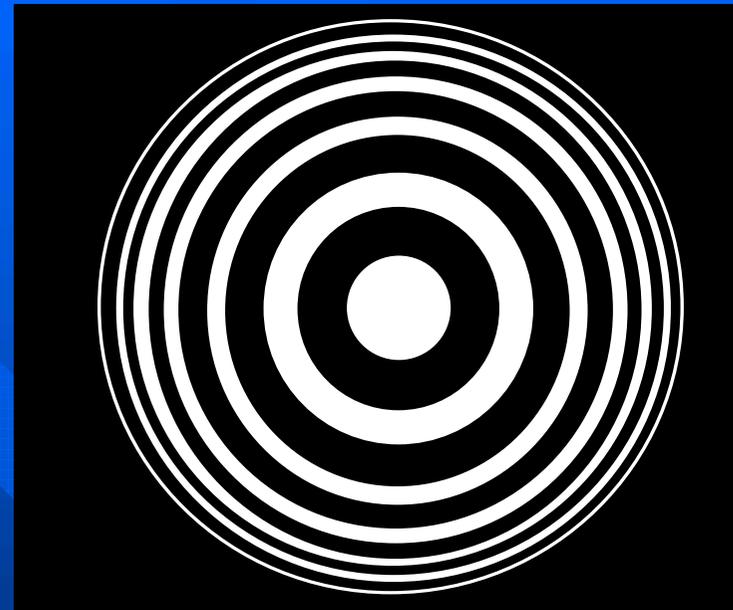
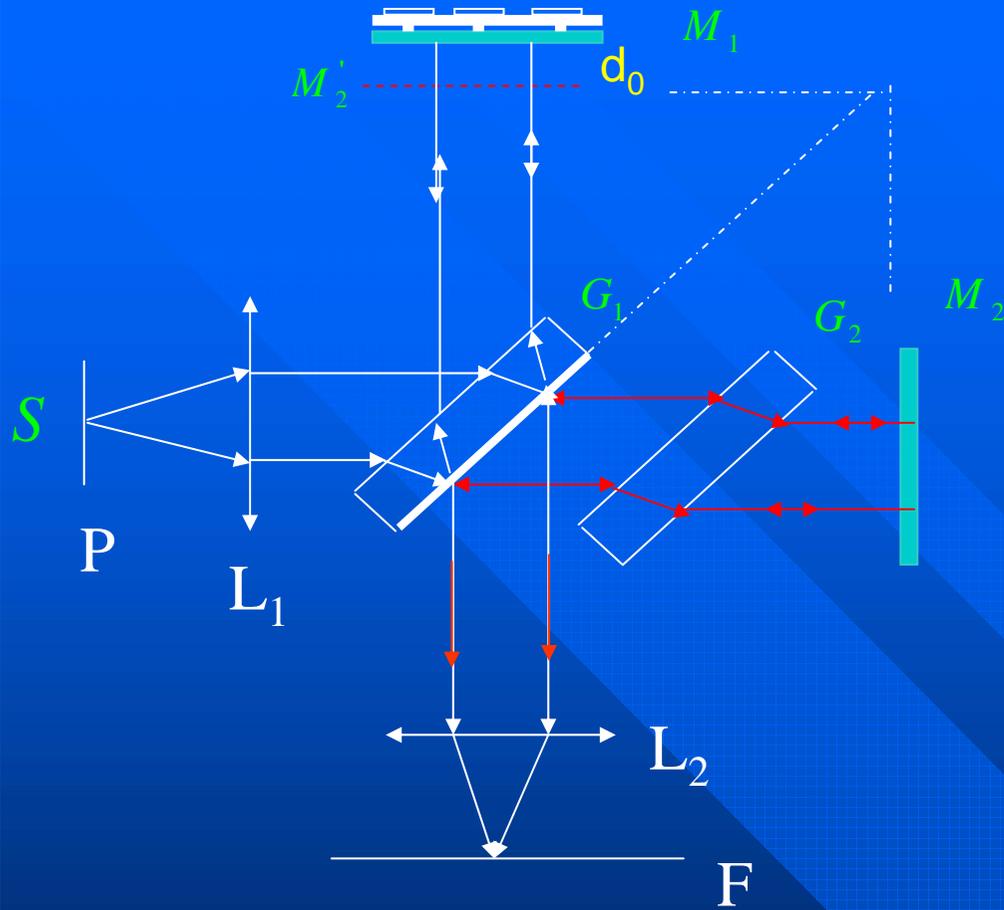
等倾干涉



等厚干涉



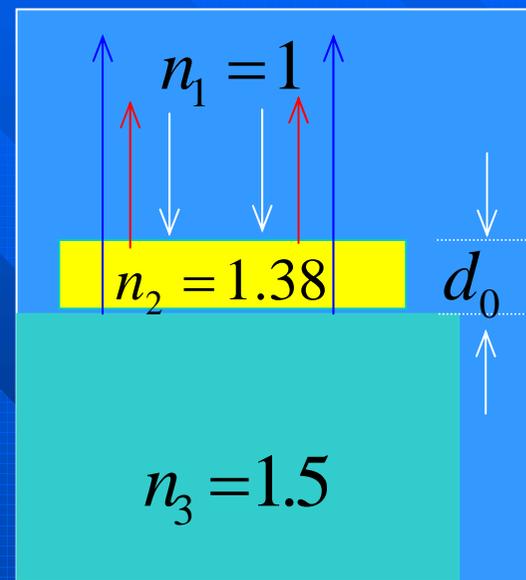
迈克尔逊干涉仪



$$2d_0 \cos i = \begin{cases} j\lambda & \text{亮条纹} \\ (2j+1)\frac{\lambda}{2} & \text{暗条纹} \end{cases}$$

$$j = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

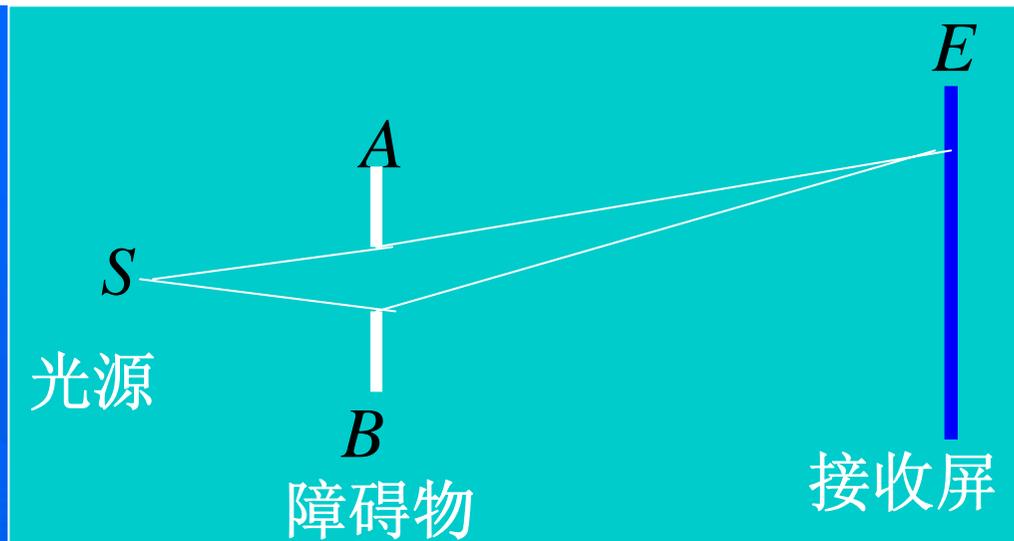
增透膜与高反膜



衍射

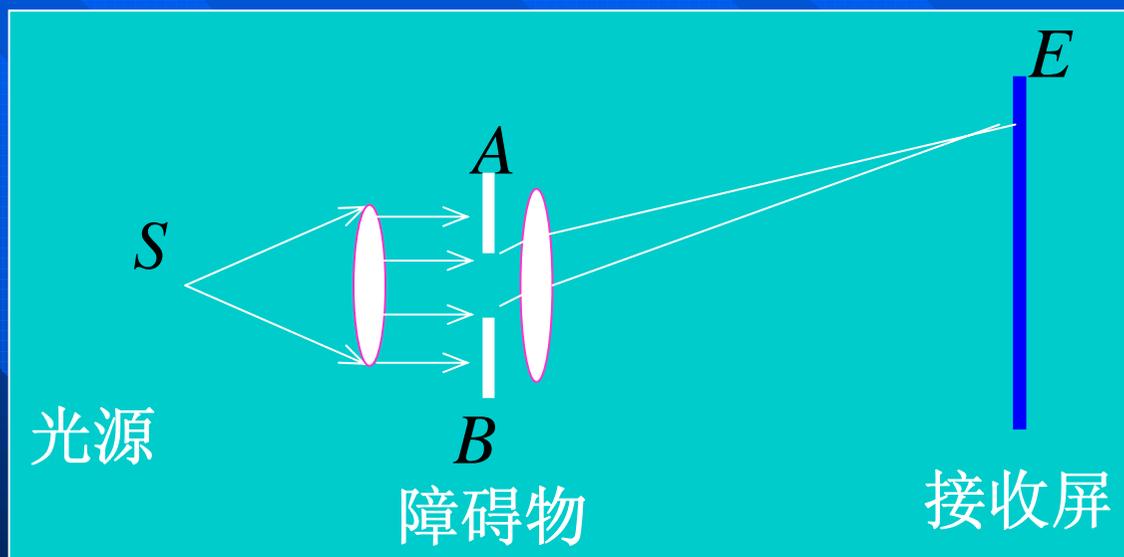
- 菲涅耳衍射

光源—障碍物—接收屏
距离均为有限远。



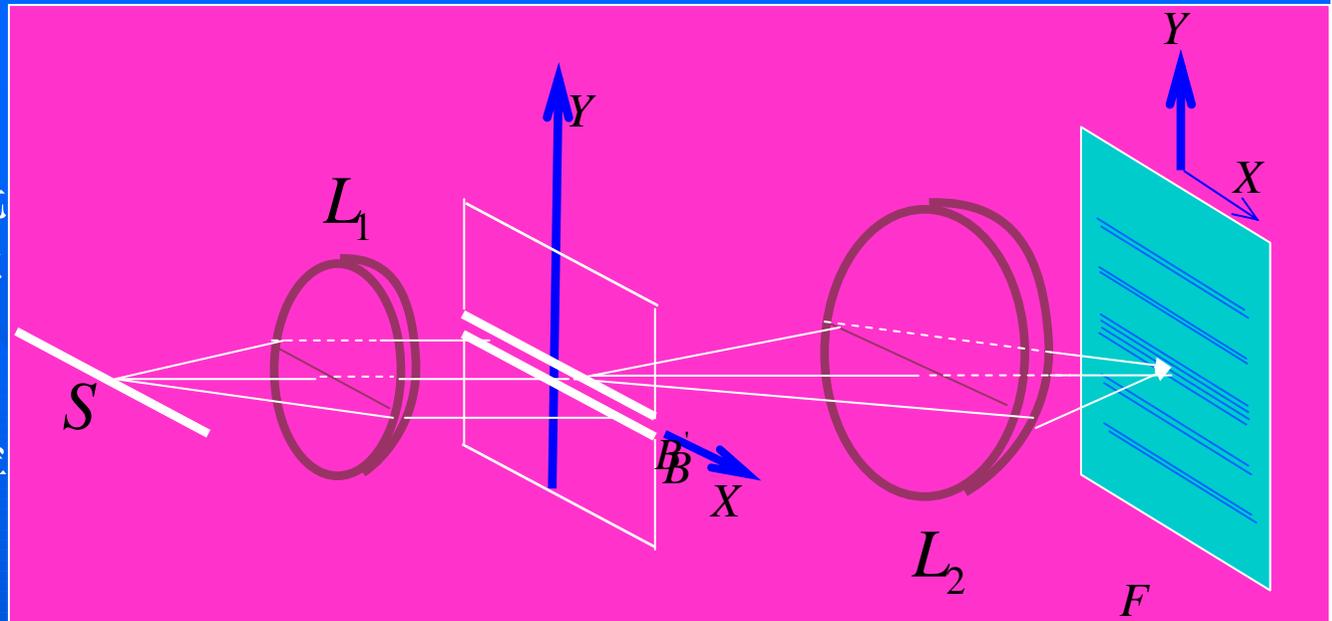
- 夫琅和费衍射

光源—障碍物—接收屏
距离有一个或均为无限远。
(物理上的无穷远: 平行光束)

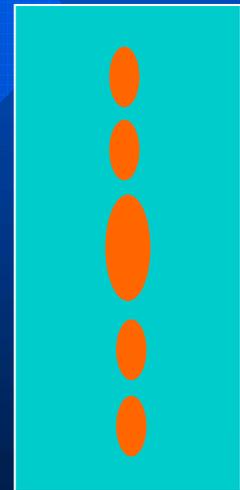


夫琅和费单缝衍射

置于透镜 L_1 焦平面上的缝（或灯丝）光源 S （光均匀照射）所发光束通过 L_1 后成为平行光束，照射到狭缝 BB' （宽为 b ，很窄）上，透过狭缝的光束经透镜 L_2 后会聚在置于 L_2 焦平面上的光屏 F 上，形成衍射花样。



当 S 为激光时



衍射花样特征

- ① 花样为一组平行于狭缝的明暗相间的直线状条纹；
- ② 中央条纹特别明亮，两侧对称地排列着强度较小的亮条纹；
- ③ 两相邻亮条纹间有一条暗条纹；
- ④ 中央条纹的宽度是其它亮条纹宽度的两倍，强度较小的亮条纹是等宽的。

夫琅和费园孔衍射

衍射花样

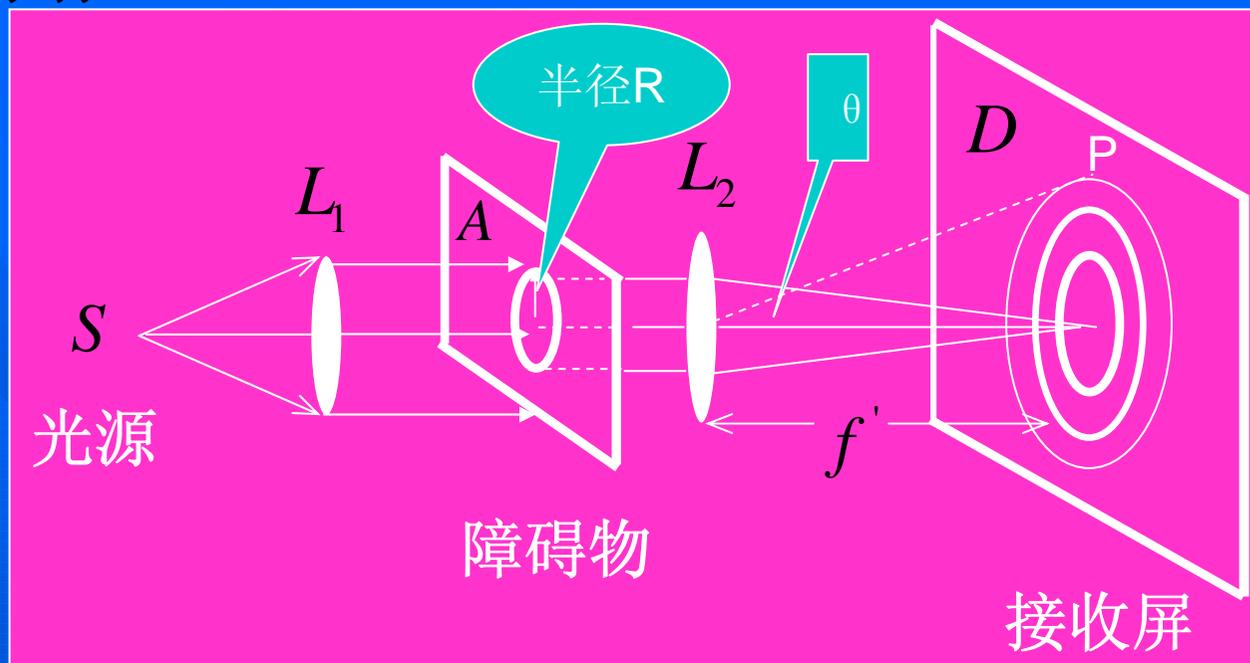
明暗相间的同心圆环且中心为很亮的亮斑。

光强公式:

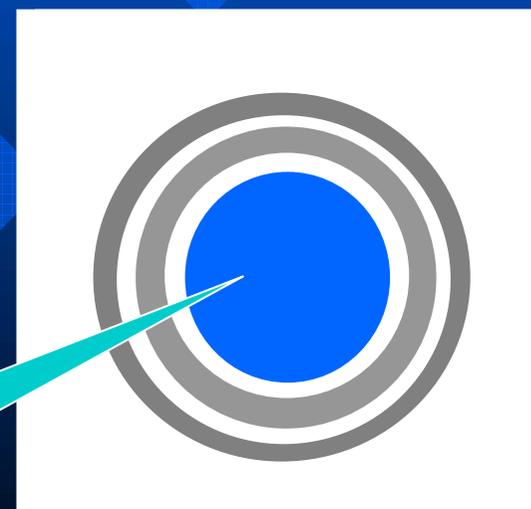
$$I_P = I_0 \frac{J_1^2(2m)}{m^2}$$

式中: I_0 为条纹中心的光强

$m = \frac{\pi R \sin \theta}{\lambda}$ 是园孔边缘与园心的次波在 P 点相差的一半, $J_1(2m)$ 为 $2m$ 的一阶贝塞尔函数.

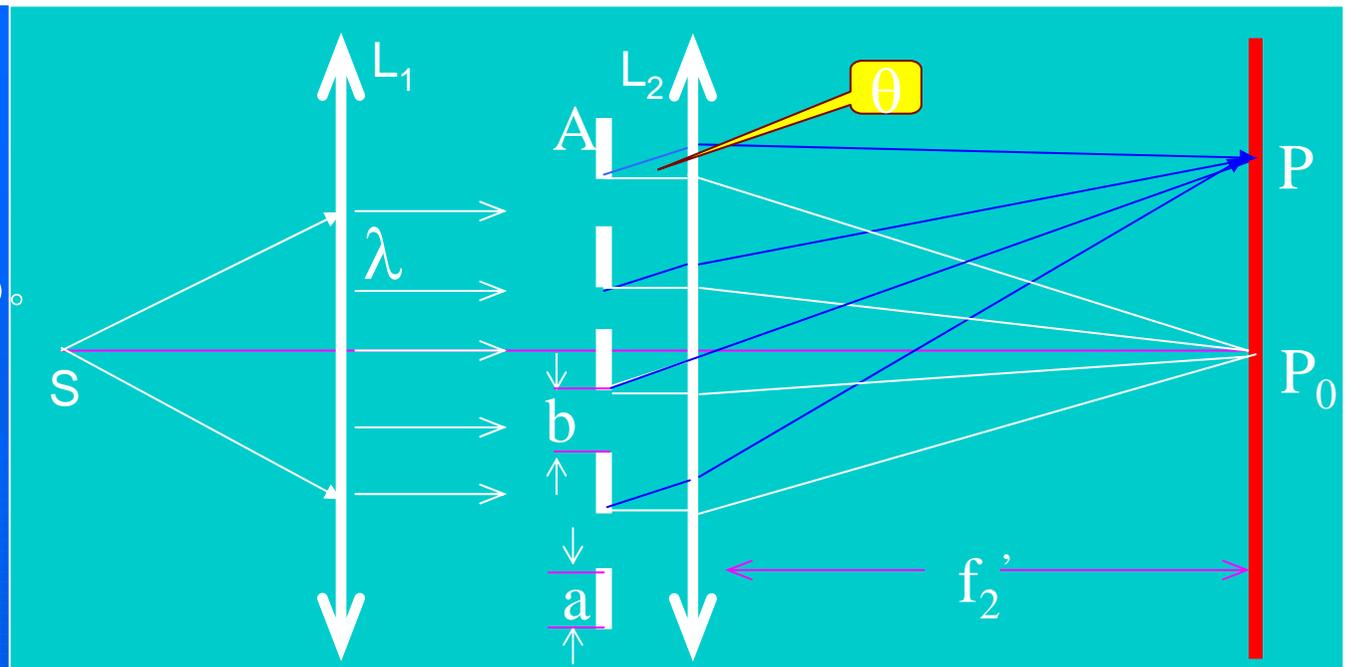


爱里斑



S为垂直纸面的缝光源，A为平面衍射光栅。透光部分宽为a，不透光部分宽为b。总缝数为N。

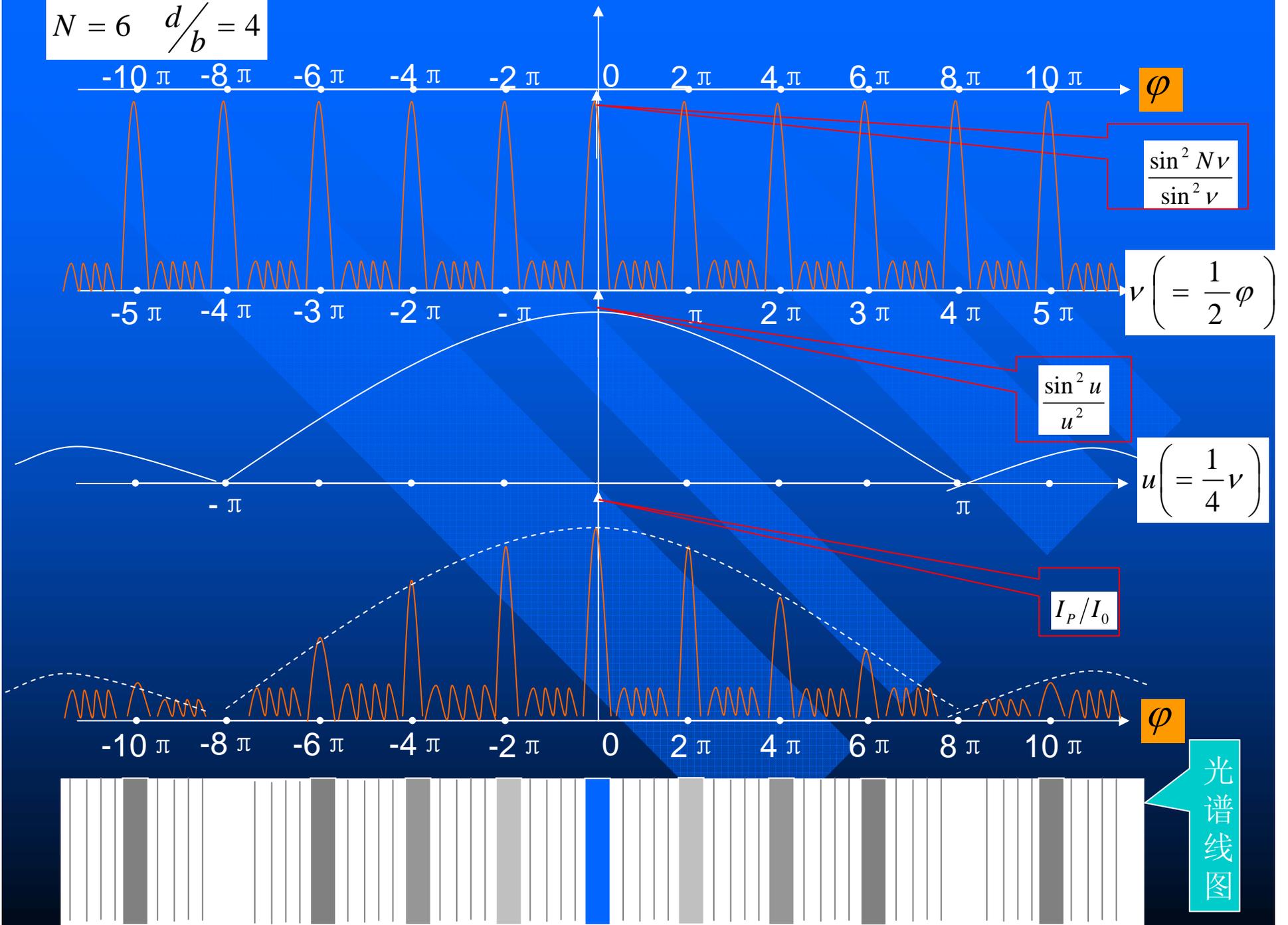
$d=a+b$ 称为光栅常数，其数量级约 10^{-6} 米



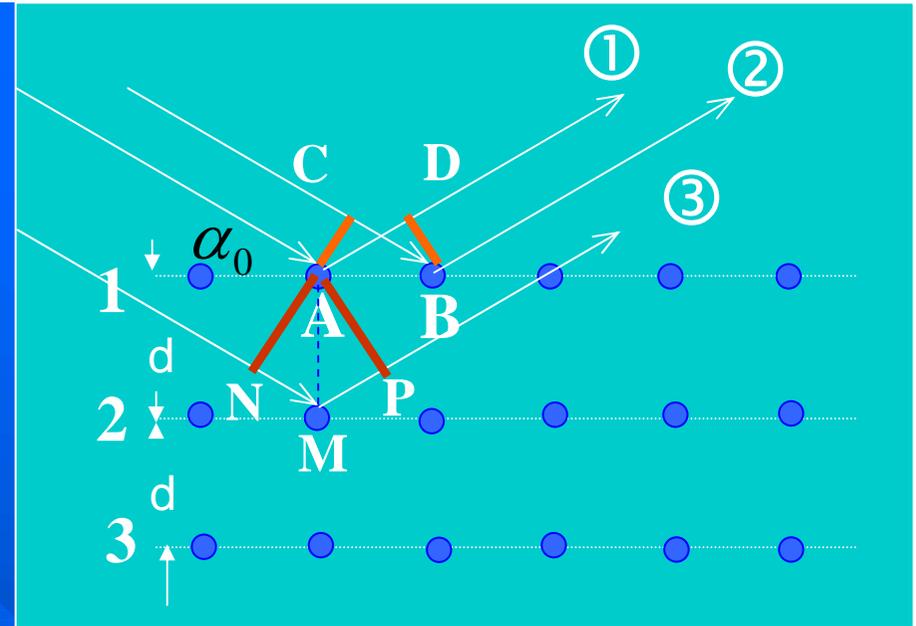
1、现象

- A、与单缝衍射相比，出现了一系列新的最大值和最小值；其中，强度较大的亮线称为主最大，较小的称为次最大。
- B、主最大位置与N无关，但宽度随N的增大而变窄，强度正比于 N^2 ；
- C、相邻主最大间有 $(N-1)$ 个最小值、 $(N-2)$ 个次最大；

$$N = 6 \quad d/b = 4$$



布喇格方程



$$\delta = NM + MP = j\lambda \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

$$2d \cdot \sin \alpha_0 = j\lambda \quad (j = 0, 1, 2, 3, \dots) \dots \dots \text{布喇格方程}$$

即当满足上式时，各层面上的众多粒子的无穷次波（即反射光）相干加强，形成细锐的亮点，称为 j 级衍射主极大。

因为晶体中粒子排列的空间性，所以，**劳厄斑是由空间分布的亮斑组成。**

近代光学

- 光电效应
- 黑体辐射



普朗克辐射量子化

爱因斯坦光量子假说

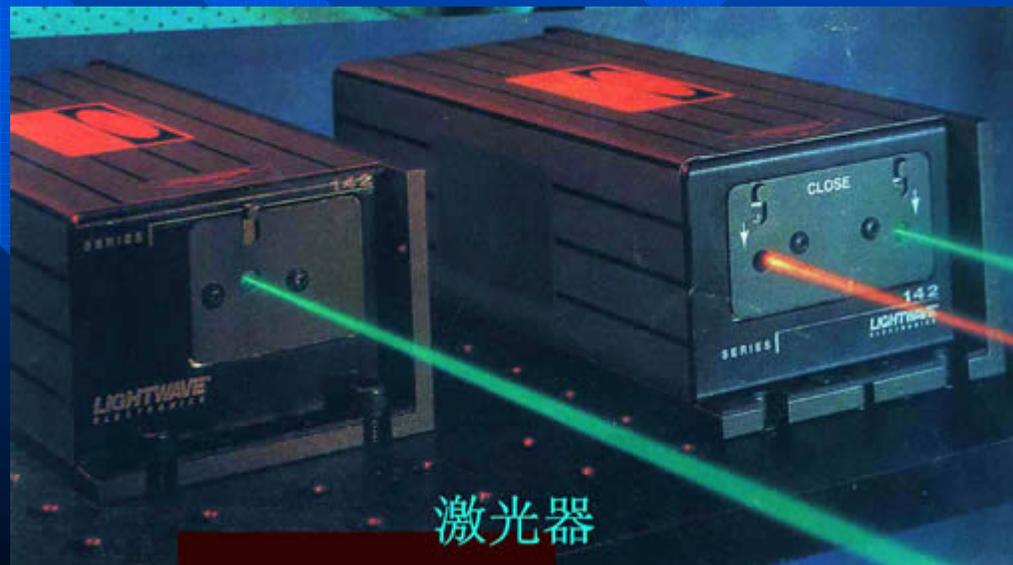


量子光学

现代光学

- 激光出现：1960年 梅曼 红宝石激光器
- 激光特性：
 - 高相干性
 - 方向性
 - 高亮度

激光是现代光学的基础



激光器

激光的工作原理

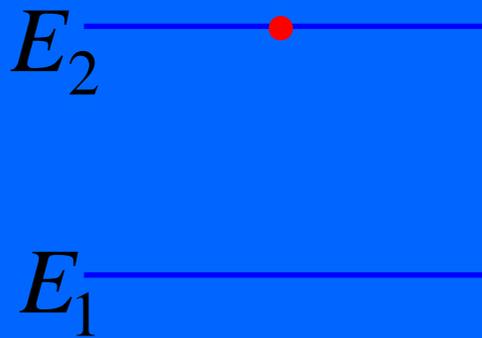
- 工作物质
 - 三能级系统
 - 四能级系统
- 正反馈系统：谐振腔
- 泵浦：灯、电场

自发辐射

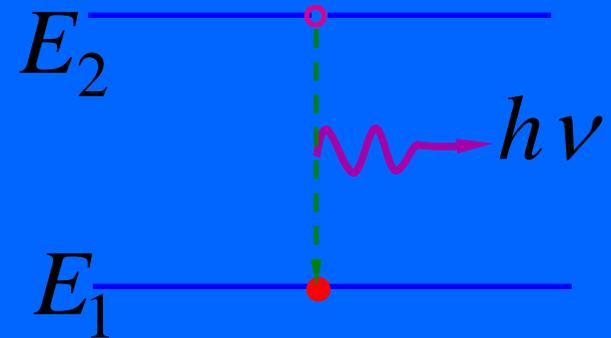
原子在没有外界干预的情况下,电子会由处于激发态的高能级 E_2 自动跃迁到低能级 E_1 , 这种跃迁称为自发跃迁. 由自发跃迁而引起的光辐射称为自发辐射.

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

自发辐射



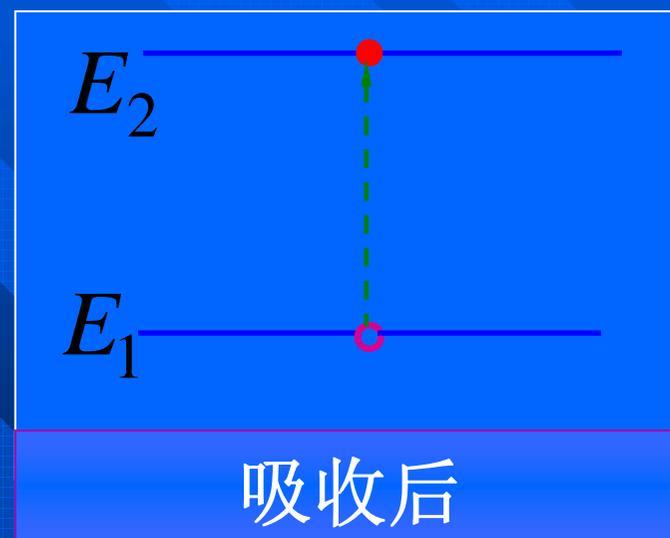
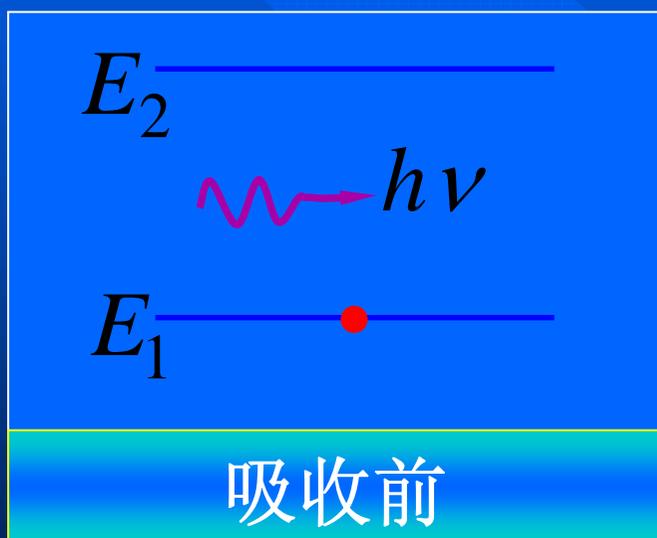
发光前



发光后

光吸收

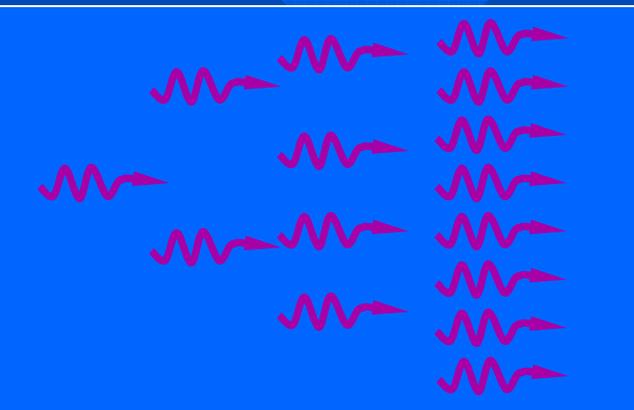
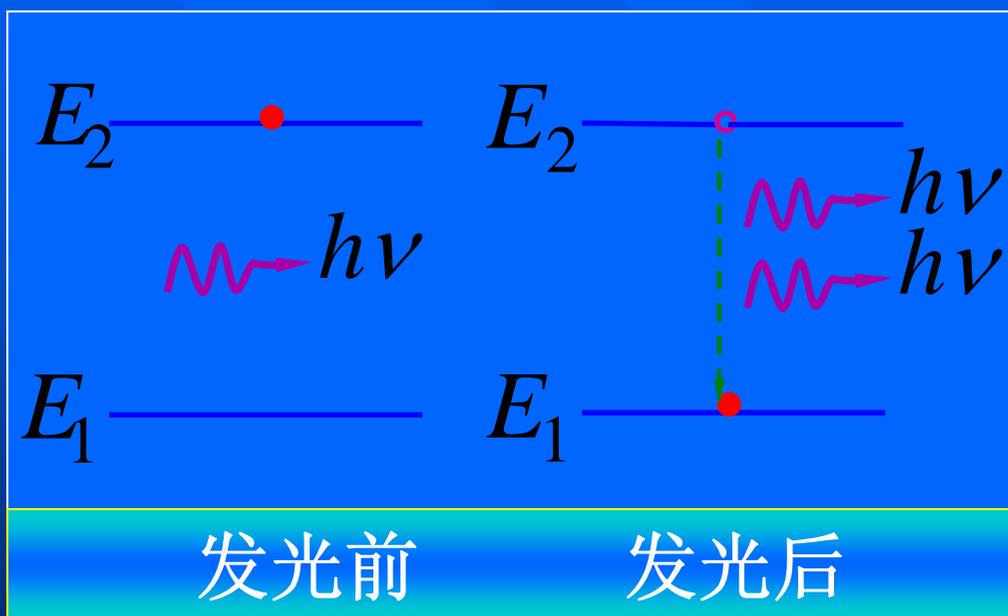
原子吸收外来光子能量 $h\nu$, 并从低能级 E_1 跃迁到高能级 E_2 , 且 $E_2 - E_1 = h\nu$, 这个过程称为光吸收.



受激吸收

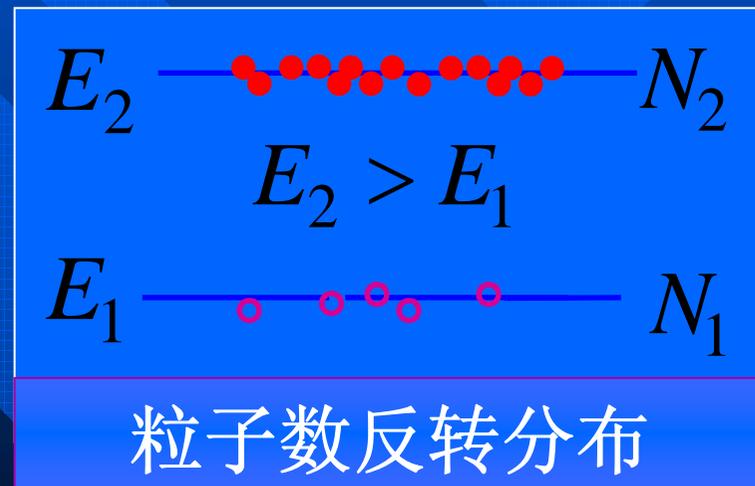
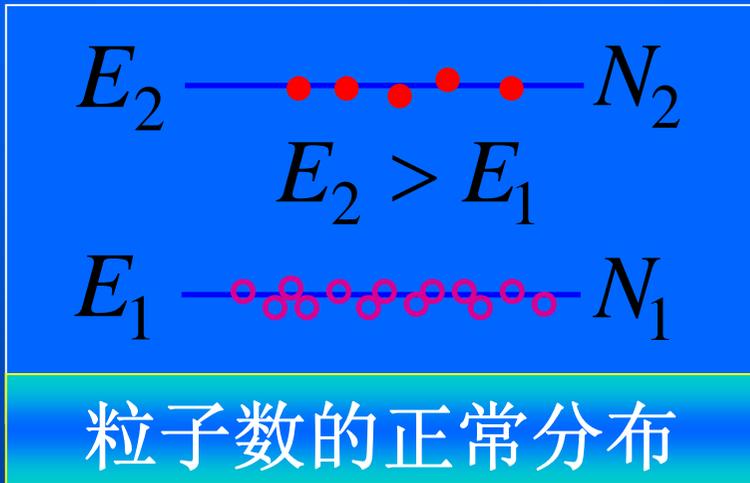
受激辐射

由受激辐射得到的放大的光是相干光,称之为激光.



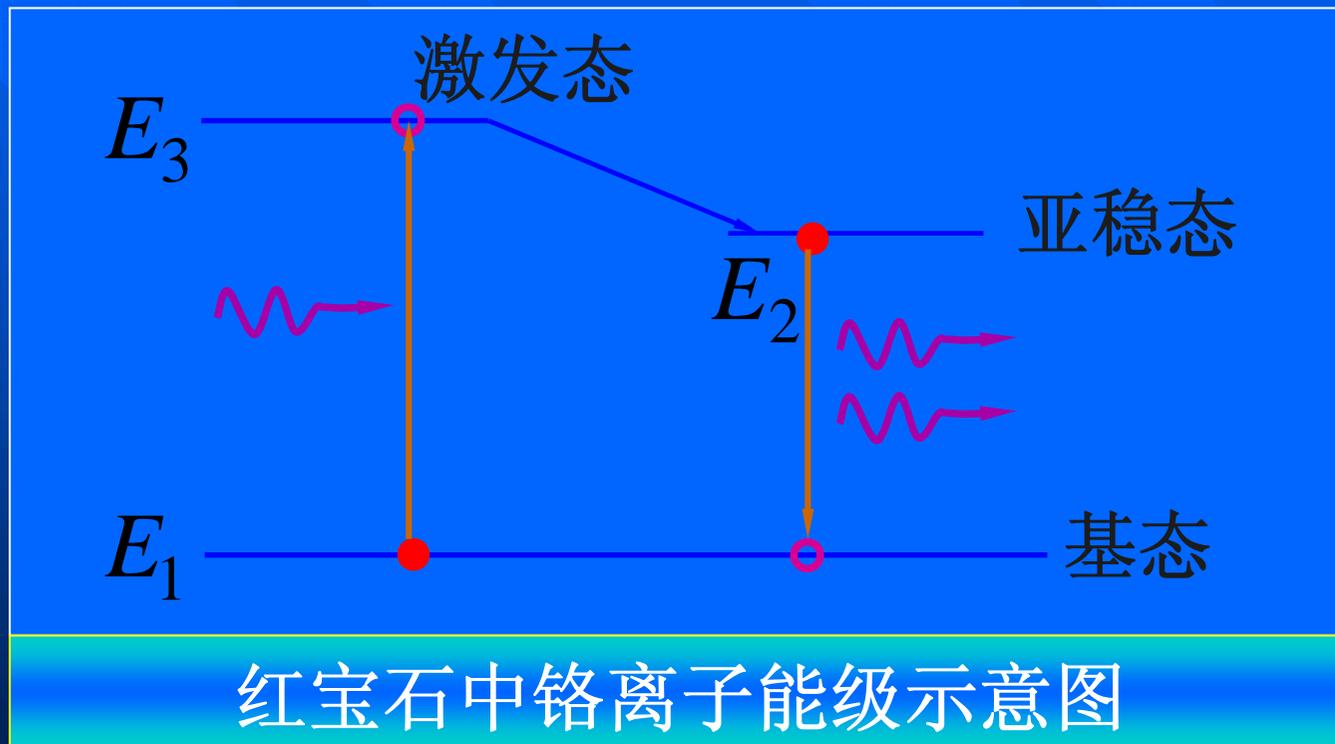
受激辐射的光
放大示意图

粒子数反转



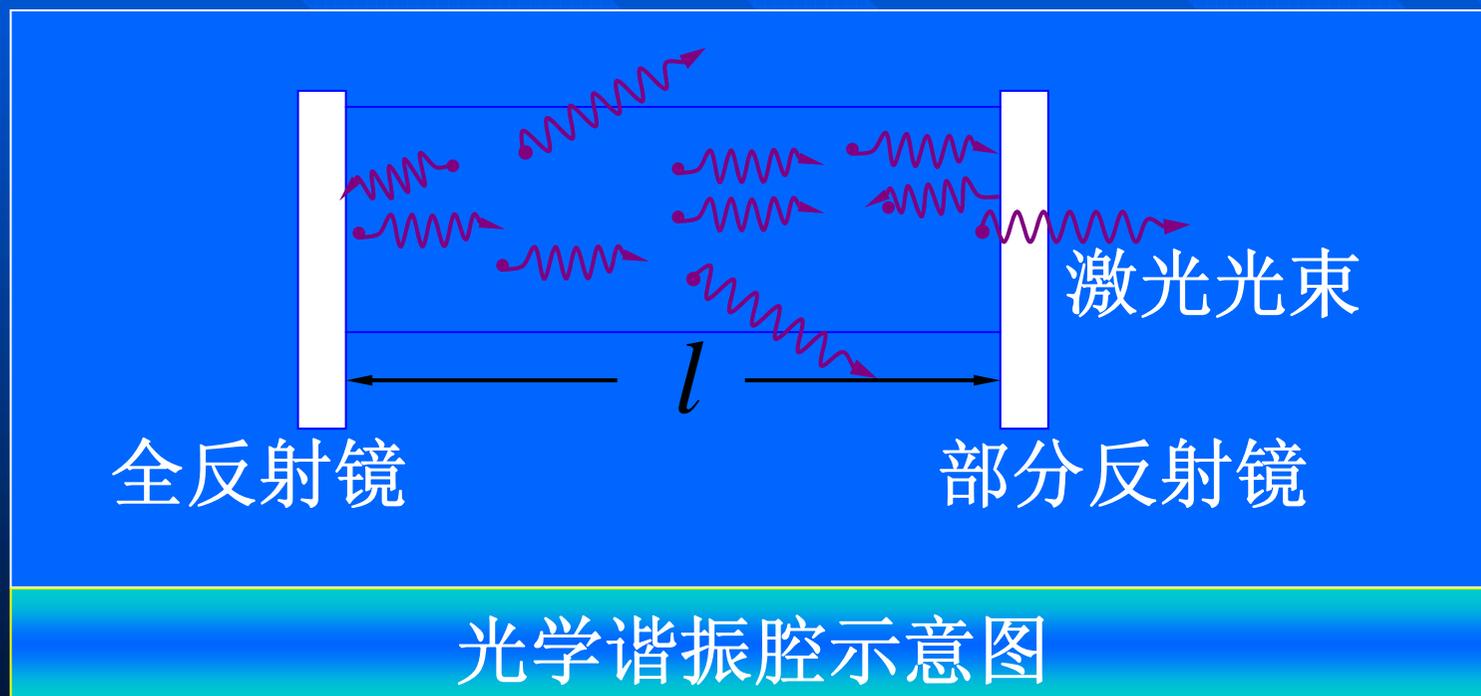
从外界输入能量（如光照,放电等），把低能级上的原子激发到高能级上去,这个过程叫做**激励**（也叫泵浦）。

三能级系统



谐振腔

光在粒子数反转的工作物质中往返传播,使谐振腔内的光子数不断增加,从而获得很强的光,这种现象叫做光振荡.



激光器的种类

- 固体激光器: Nd:YAG, Cd:YAG, 半导体
- 液体激光器: 染料激光器
- 气体激光器: He-Ne, Ar⁺, CO₂
- 脉冲激光器: 超短光脉冲 (飞秒)
- 连续激光器

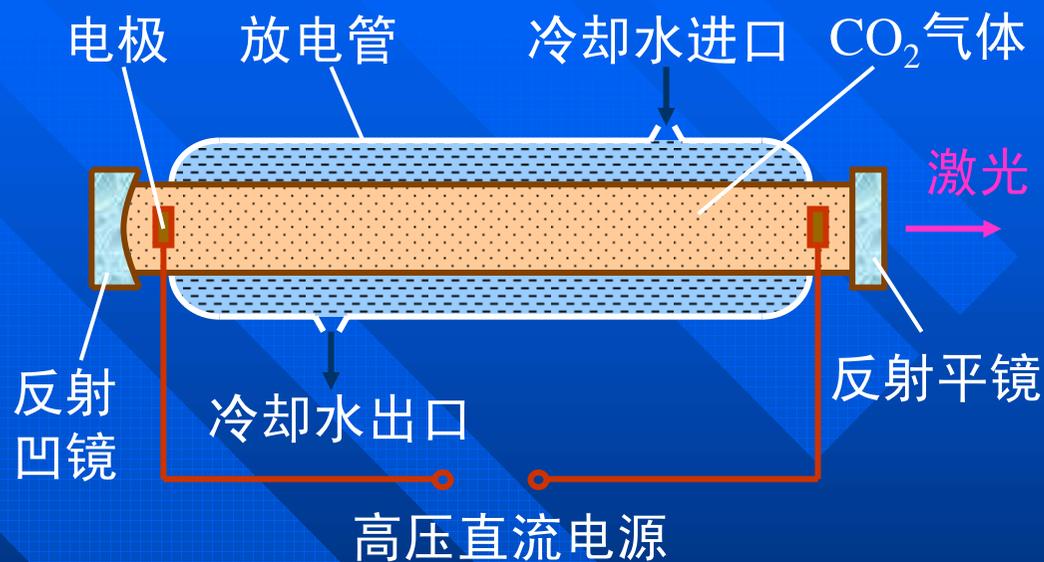
➤ 气体激光器——CO₂激光器

◎ 混合气体：氦约80%，氮约15%，CO₂约5%

◎ 通过高压直流放电进行激励

◎ 波长10.6 μm，为不可见光

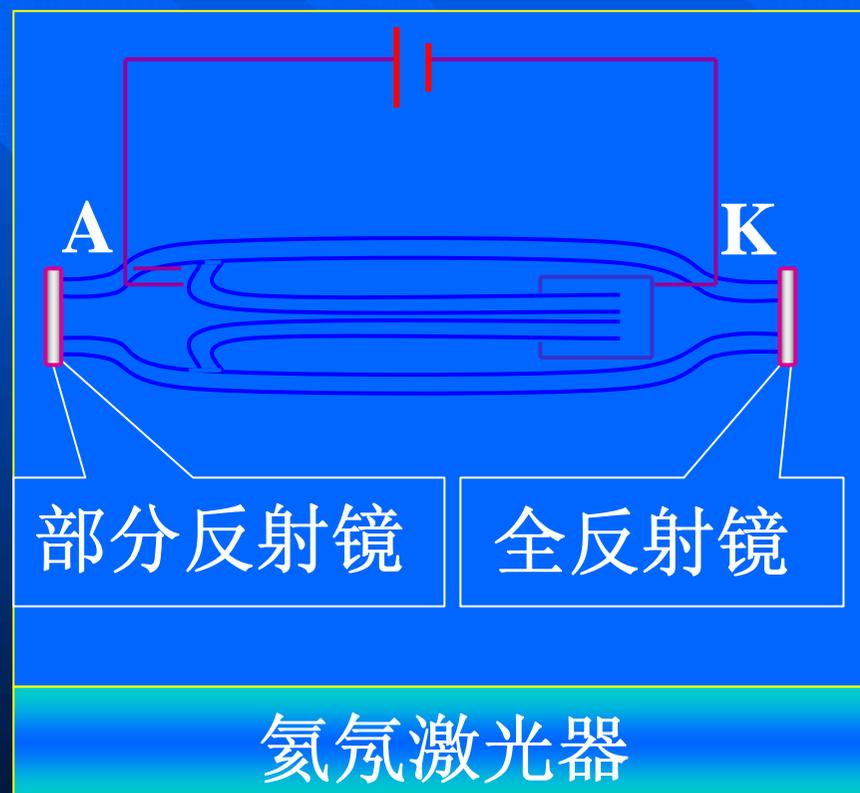
◎ 能量效率5% ~ 15%



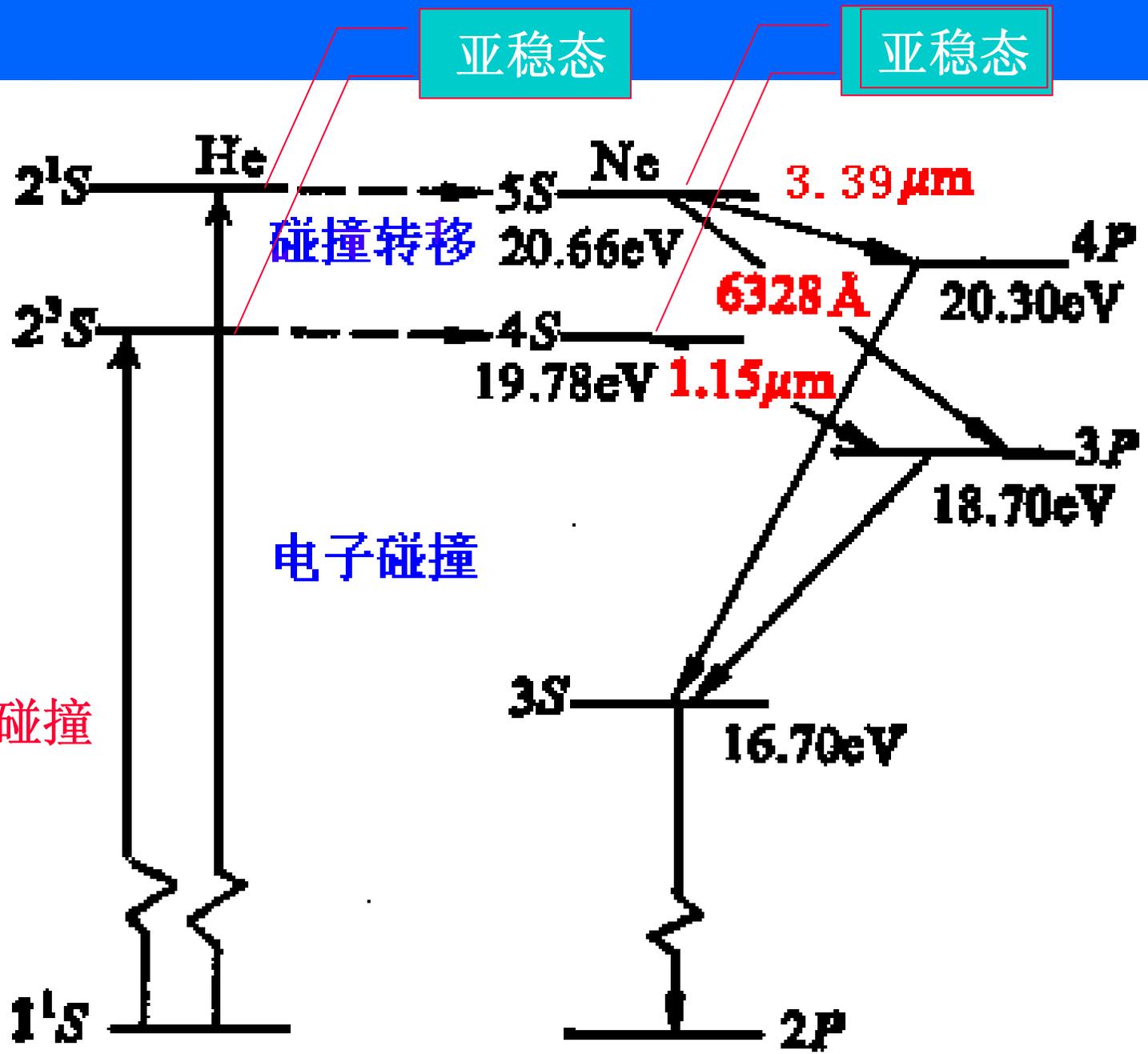
CO₂激光器示意图

He-Ne激光器

输出的激光单色性好、结构简单、使用方便、成本低等优点。



电子碰撞



亚稳态

亚稳态

2^1S

He

$5S$

Ne

$3.39 \mu m$

碰撞转移

20.66 eV

2^3S

$4S$

6328 \AA

20.30 eV

19.78 eV

$1.15 \mu m$

电子碰撞

$3S$

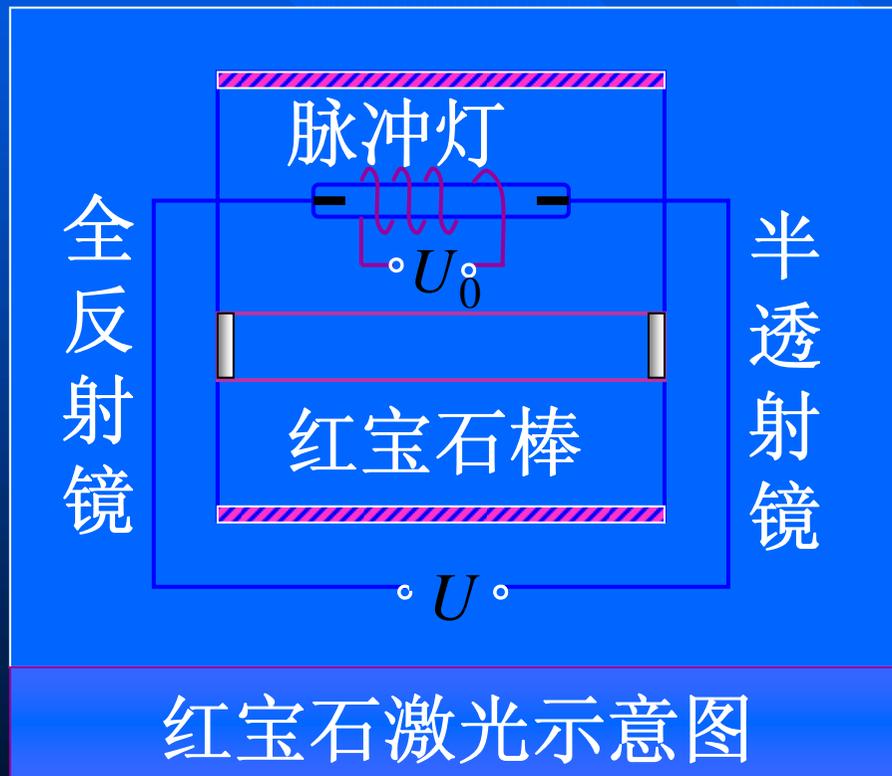
16.70 eV

1^1S

$2P$

红宝石激光器

红宝石激光器的工作物质是棒状红宝石晶体，它发出的激光是脉冲激光，波长为694.3nm.



激光器发展的主要方面

- (1) 扩展了激光的波长范围.
- (2) 激光的功率大大提高.
- (3) 激光器已能实现小型化.

激光器的特性和应用

1 方向性好

利用激光准直仪可使长为2.5km的隧道掘进偏差不超过16nm.

2 单色性好

激光的单色性比普通光高 10^{10} 倍.

3 能量集中

4 相干性好

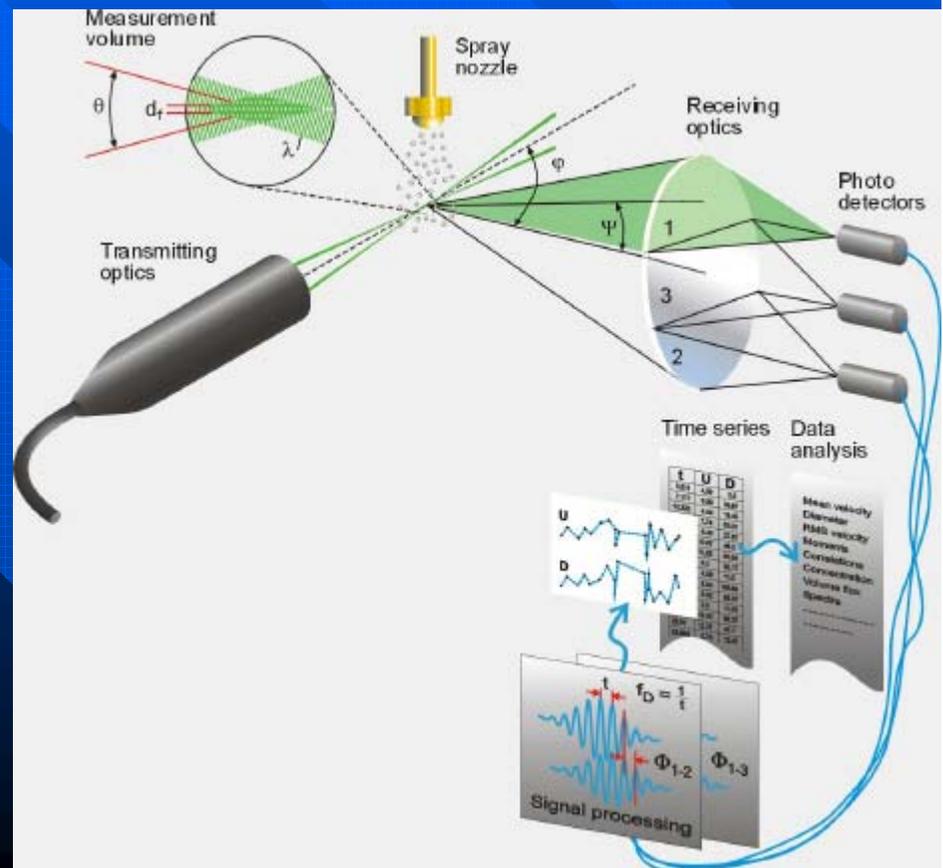
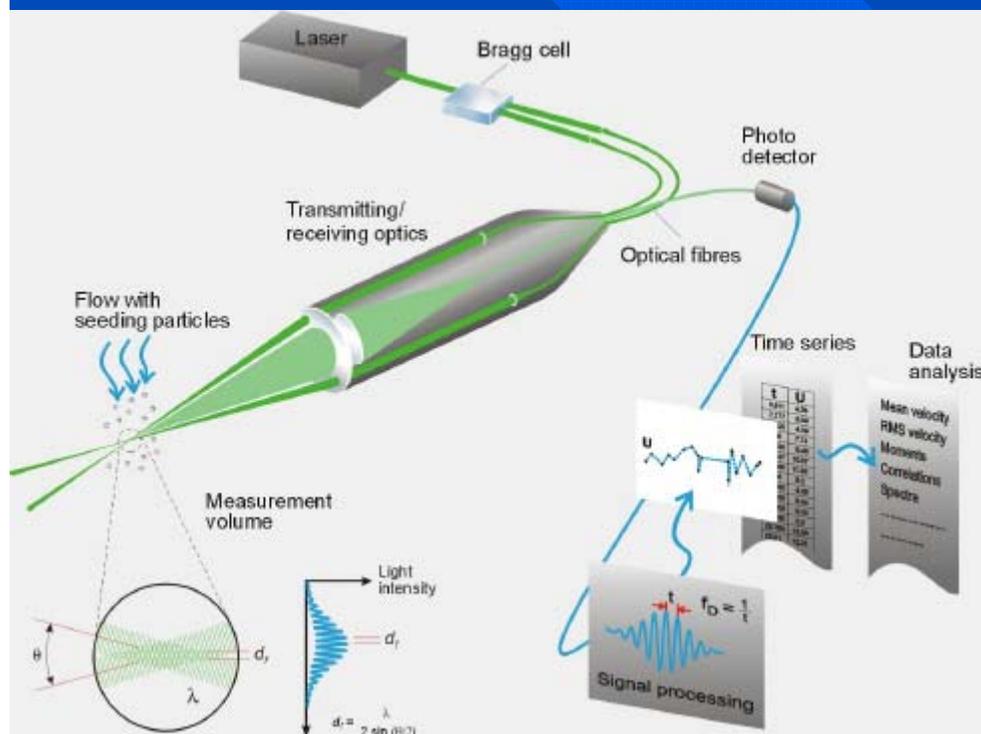
普通光源的发光过程是自发辐射,发出的不是相干光,激光的发光过程是受激辐射,它发出的光是相干光.

激光多普勒

- 测速仪
- 流速计

多普勒测速技术 (Laser & Phase Doppler Anemometry)

- 多普勒测速原理：
多普勒频差正比于流动速度；
相位差正比于粒径；



光纤技术

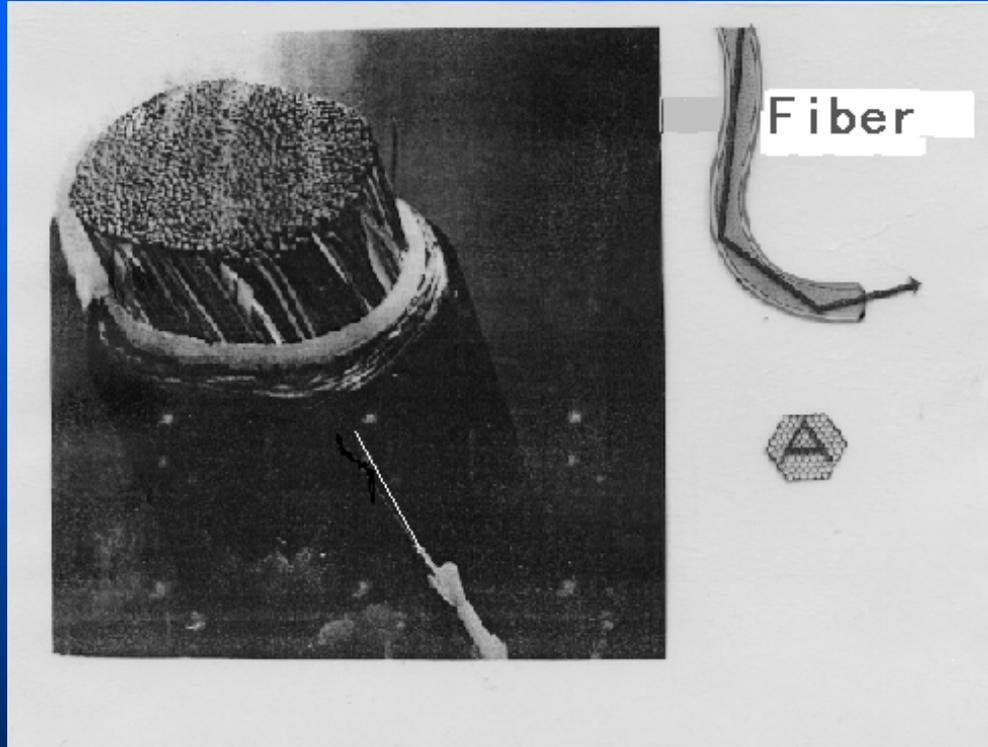
- SNOM
- 光纤传感器
- 光纤通讯：孤立子通讯，波分复用

- 孤子光纤通讯

- 色散 — — — 展宽
- 非线性 — — — 压缩

脉冲 + 展宽 + 压缩 = 脉冲

激光光纤通讯



由于光波的频率比电波的频率高好几个数量级，

一根极细的光纤能承载的信息量，相当于图片中这么粗的电缆所能承载的信息量。

激光医学

- 眼 (LASIK) :

准分子激光原位角膜磨镶术
(Laser in situ keratomileusis)

- 激光手术

准分子形成



自发辐射



猝灭过程



激光刀

- 聚焦激光作用生物体组织，在短时间内烧灼和气化。
- 移动光束，切开组织，起到手术刀的作用。
- 烧结封闭组织中的血管、淋巴管，减少出血量，在做肿瘤手术时也可防止肿瘤扩散。
- 激光刀与手术部位不接触，自身消毒的手术。

激光纤维内窥镜

借助于光纤，可以把激光引入人体内部用激光施行手术，避免一些剖腹的大手术。

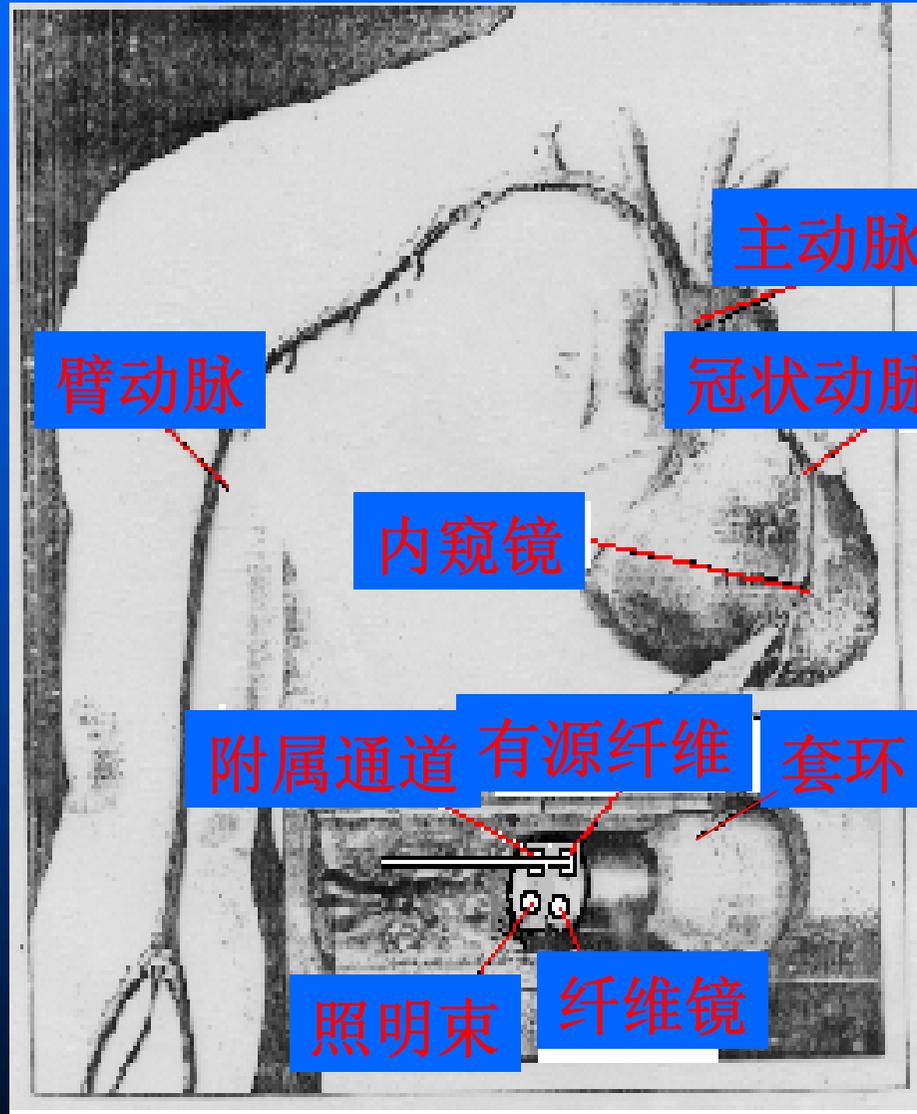
低功率激光的应用

弱激光对生物组织有刺激、镇痛、消炎、扩张血管等作用，用弱激光照射病灶，有治疗效果。

利用弱激光照射穴位，可产生类似针灸的效果。

激光手术

(不需开胸)



◆ 照明束

.....照亮视场

◆ 纤维镜激光光纤

.....成象

◆ 有源纤维强激光

.....使堵塞物融化

◆ 附属通道

(可注入气或液)

.....排除残物以明视线

◆ 套环

..... (可充、放气)

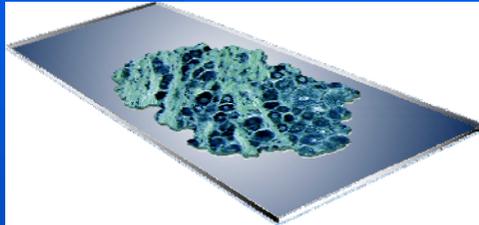
阻止血流或使血流流通

激光捕获的原理及过程

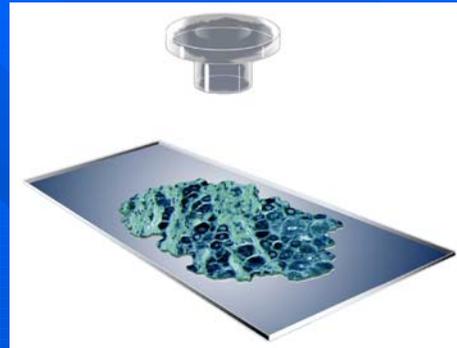
- 在显微镜下，依据细胞或组织形态学特征、免疫组织化学表型，甚至由杂交技术获得的基因型，来选择感兴趣的细胞。然后，连同膜一起放入裂解液依据不同的研究目的提取DNA、RNA、酶、或者蛋白质进行分析。

Laser Capture Microdissection

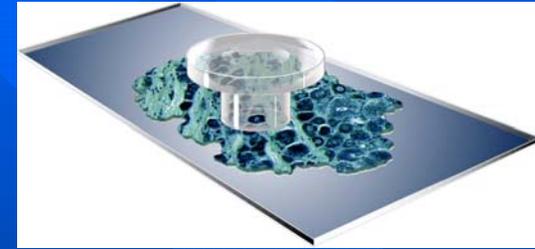
1. Prepare tissue



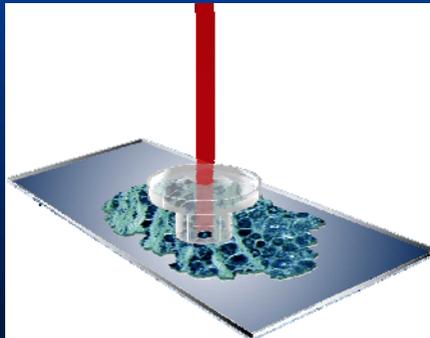
2. Locate cells



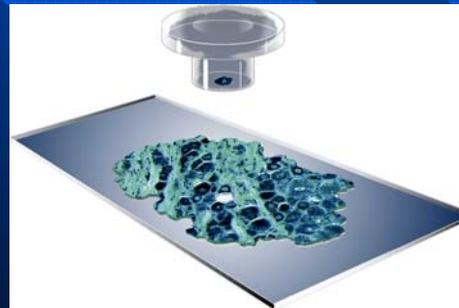
3. Place cap



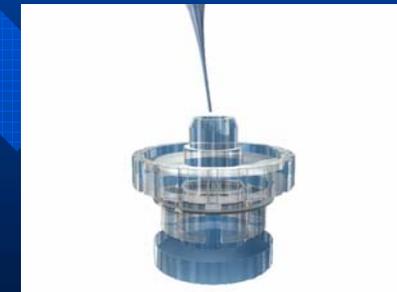
4. Pulse laser



5. Remove cap

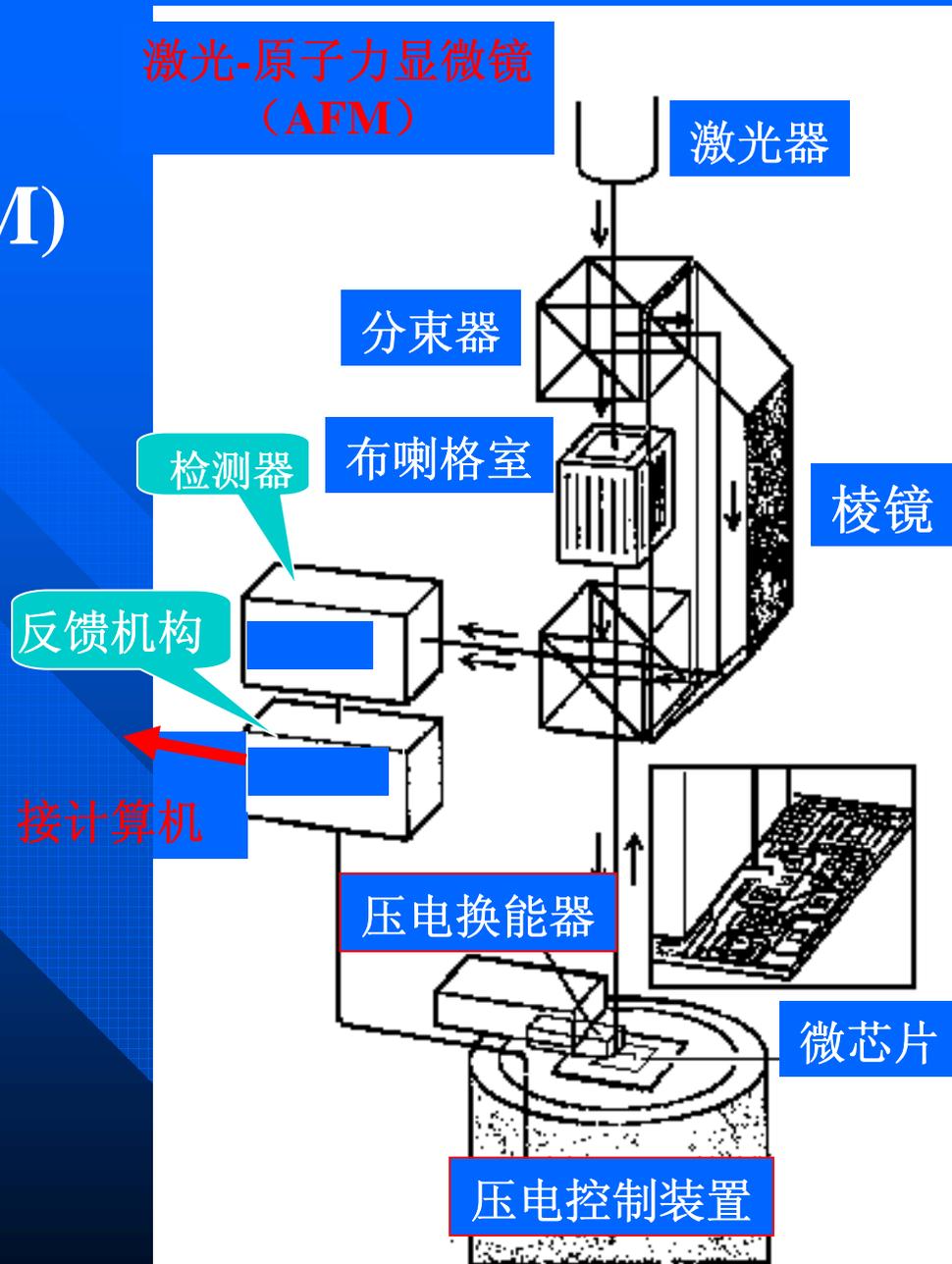


6. Extract molecules



激光—— 原子力显微镜(AFM)

用一根钨探针或
硅探针在距试样表
面几毫微米的高度
上反复移动,来探测
固体表面的情况。



探针尖端在工作时处于受迫振动状态，其频率接近于探针的共振频率。

探针尖端在受样品原子的范得瓦尔斯吸引力的作用时，其共振频率发生变化，因而振幅也随之改变。

为了跟踪尖端的振动情况，将一束激光分成两束，这两束光重新会合后发生干涉，根据干涉的情况可知探针振动的变化情况。

据此可探知试样表面的原子起伏情况。可检测出尺度小至 5 纳米的表面起伏变化。

用于检查微电路成品，检查制作微电路用的硅表面的质量。

随着微电子电路技术的进展，硅基片表面的不平坦度如果超过几个原子厚度就将被认为是不合格的。

激光推进

一、传统火箭推进技术及其局限性

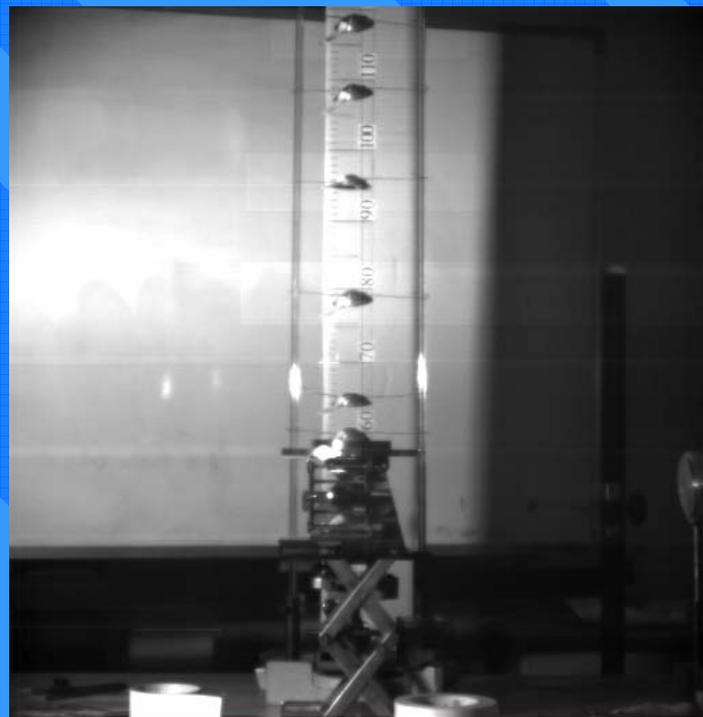
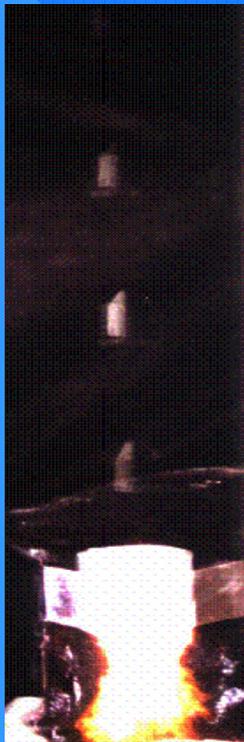
- 化学火箭推进技术
- 电火箭推进技术
- 激光推进技术

二、激光推进的历史及其现状

- 1972年,Kantrowitz首先提出利用地基激光器将空间飞行器(称之为光船)送入近地轨道的设想,从而开创了激光推进研究的新领域。
- 1989年,美国的J. Black等人开始设计并研制火箭激光发动机,进行了激光功率10kW的测试,所设计的用氢做推进剂的推进器比冲范围300~700s、预计效率约50%。
- 1996年,美国空军研究实验室(US Air Force Research Laboratory, AFRL)与NASA的Marshall空间飞行中心(Space Flight Center)合作,于1997年进行了两次以激光为动力的轻型航天器样机试验。在10kW二氧化碳脉冲激光的推动下,碟状光船上升了0.305m。第二次试验,采用脉冲平均功率10kW的CO₂激光器,将直径为12cm,重50g的光船发射到了71m的高空,光船飞行时间为13s。

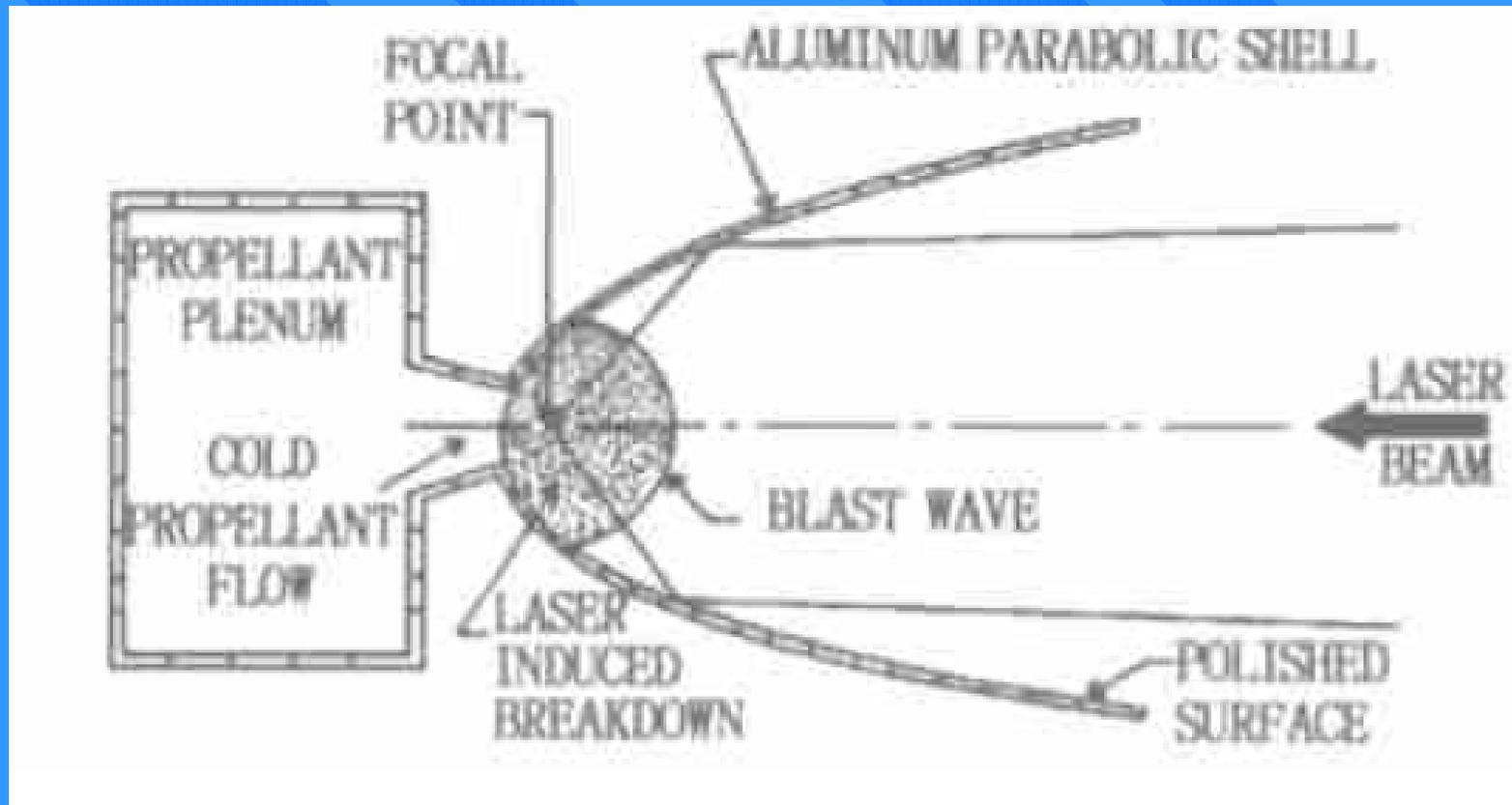
- 俄罗斯对激光推进技术的研究基本上与美国同步，其圣彼得堡光电仪器综合试验研究所成功研制出用于发射航天器的激光推进器实验装置。
- 日本也较早进行了激光推进的研究，目前已有三所大学在研究激光推进器。2002年日本研究人员报道了用连续CO₂激光实现推进的实验结果，在真空中测得的能量转换效率达到37%。同时，还报道了近期用于推进的激光等离子加速机理的研究。

- 我国从九十年代开始激光推进研究，进行了高能激光与红外能激光与固体靶之间的作用关系的研究。2001年中国科大已经用单次脉冲激光把一个重5.87g的模拟子弹（铝块）发射到1.48m的高度。
- 2002年龚平等利用脉冲平均功率3kW的CO₂激光器，采用大气模式将4.6克抛物面铝合金飞行器垂直发射高度超过了1m。

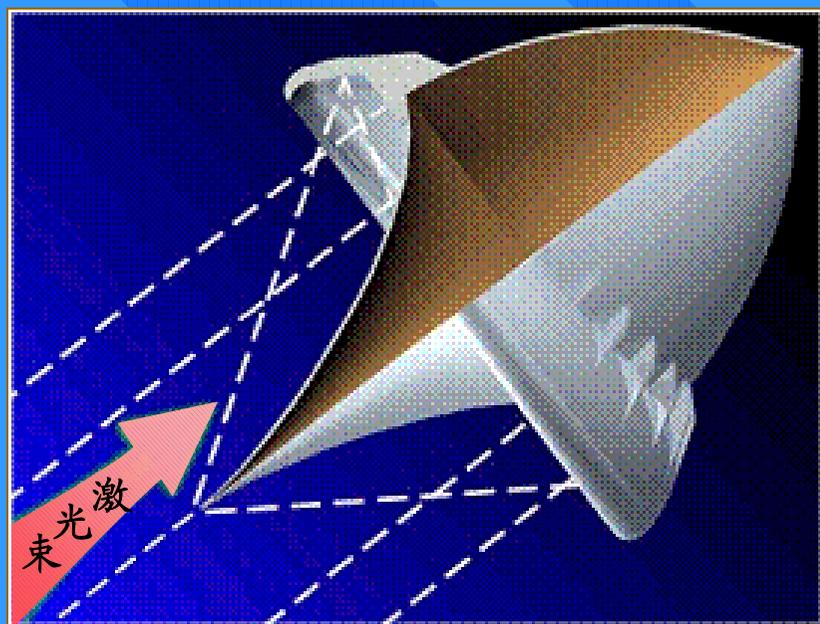


火箭模式激光推进试验照片 大气呼吸模式激光推进试验照片

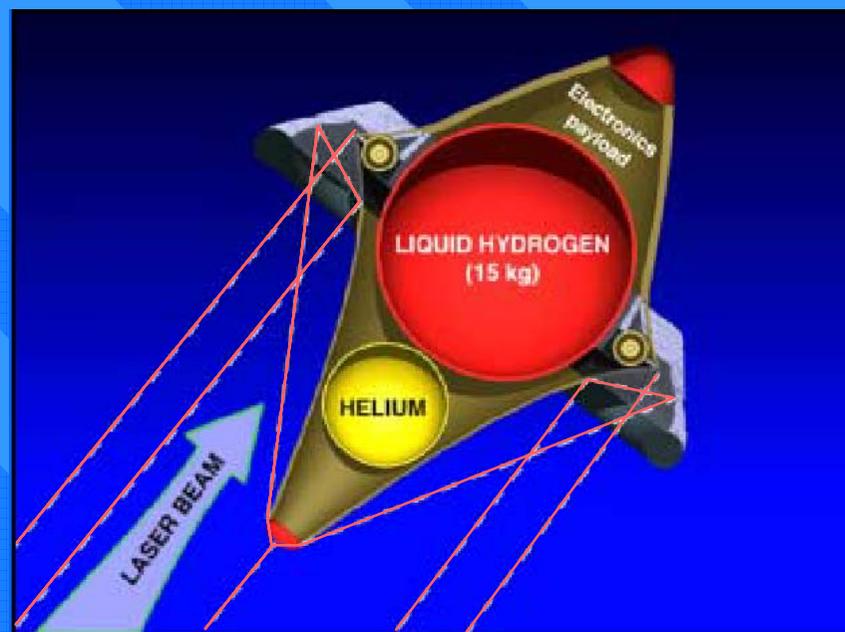
三、工作原理



根据工作物质的不同可分为两者模式：

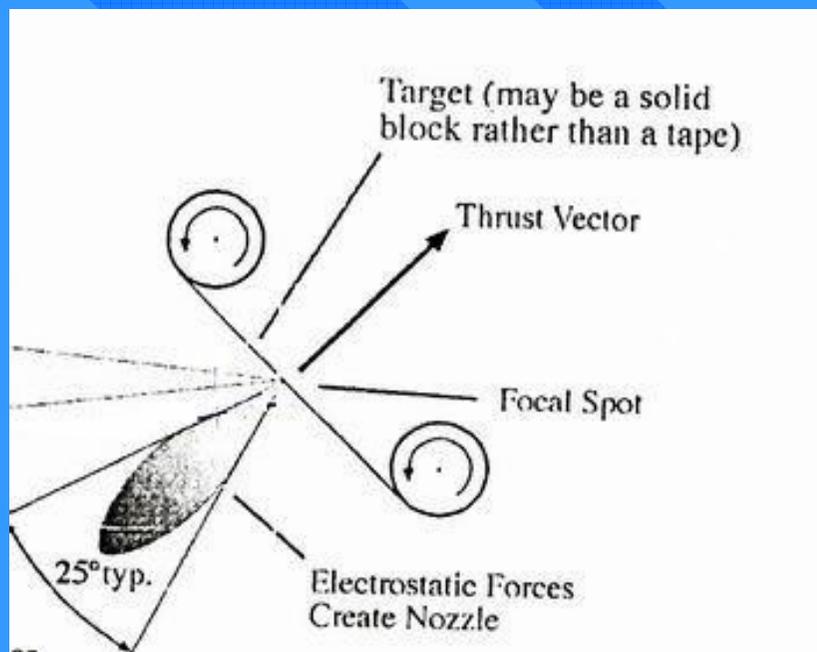


激光推进大气呼吸模式示意图

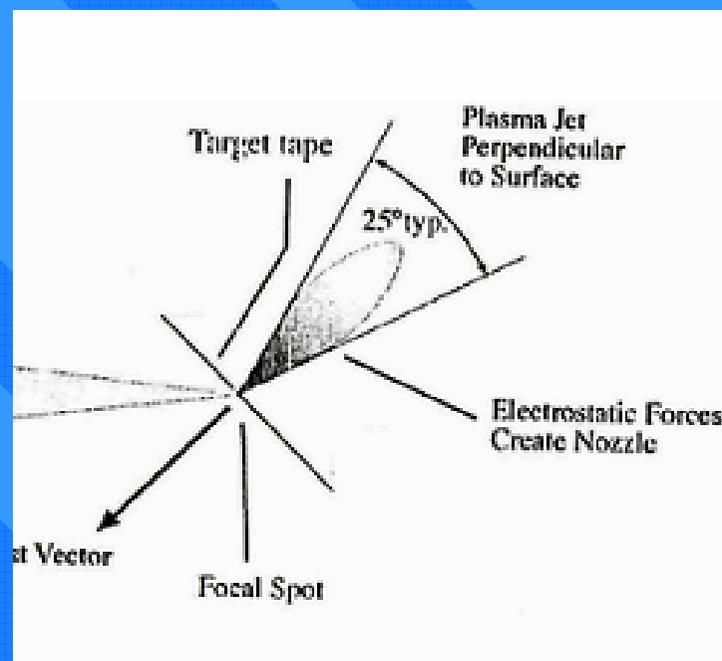


激光推进火箭模式示意图

根据激光束与飞船前进方向不同可分为：



反射式示意图



透射式示意图

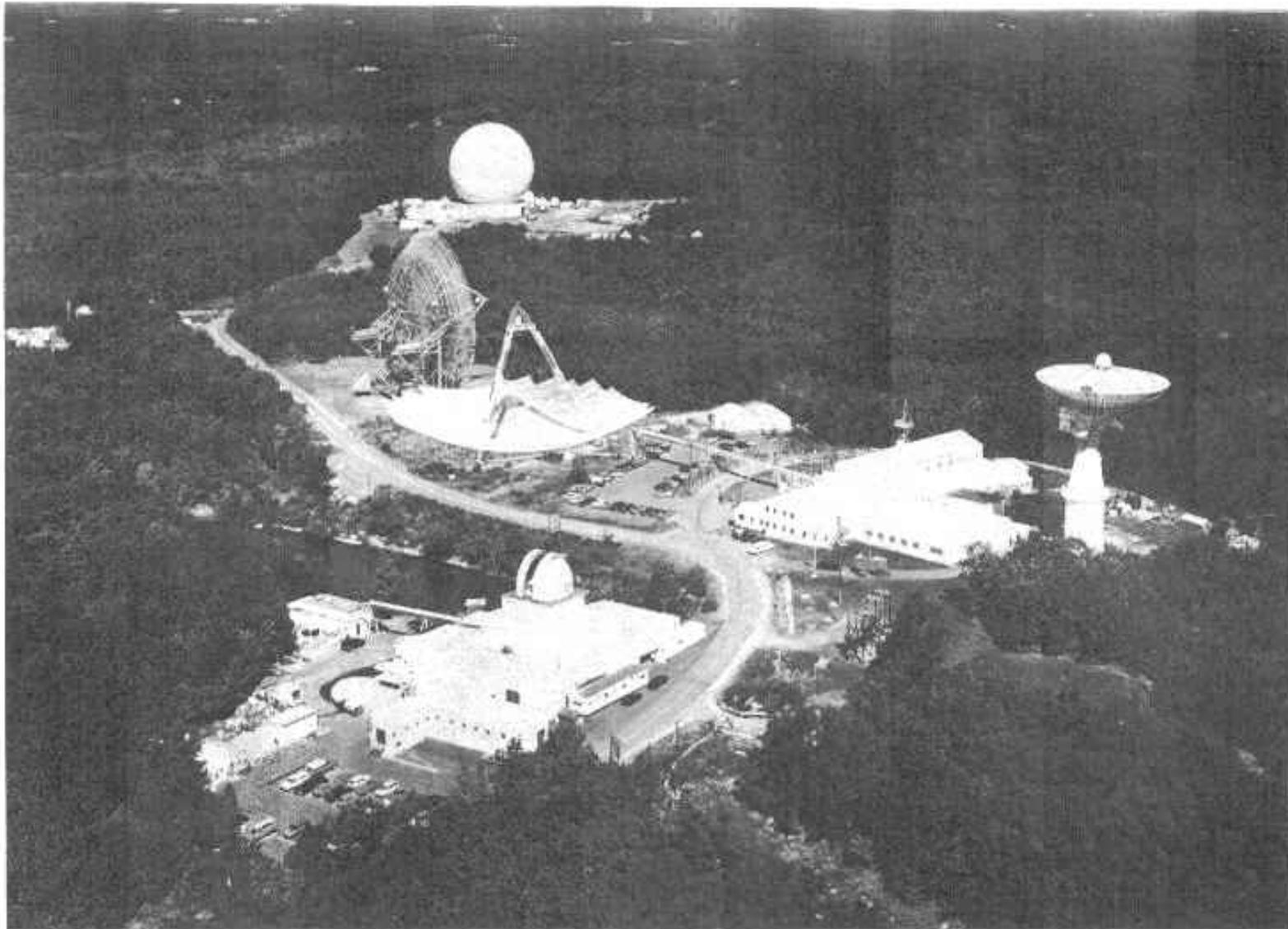
根据推进所起的作用不同分为：

- **大推进**——用于火箭的发射、飞行...
- **微推进**——用于火箭姿势的调整，精确入轨...

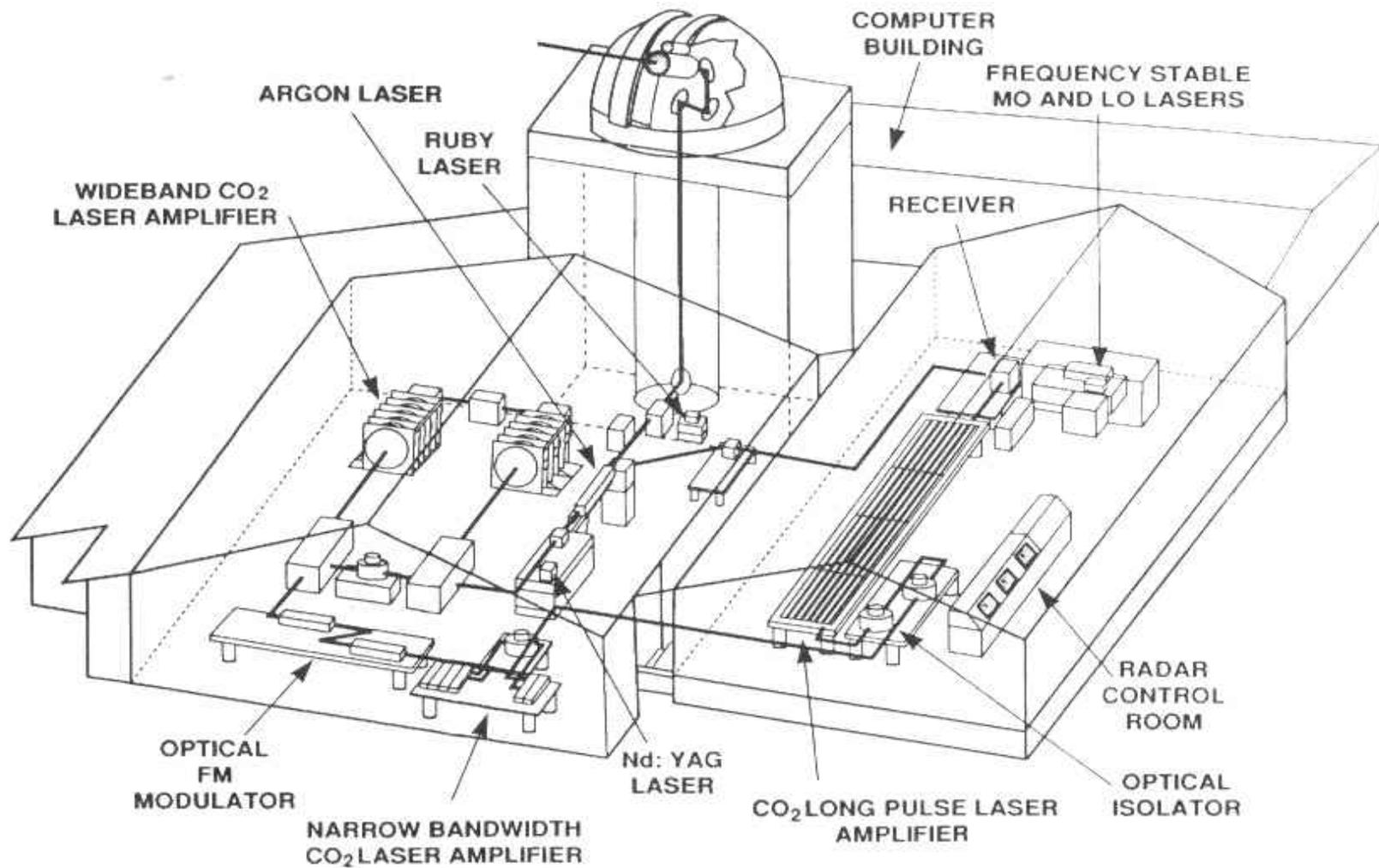
激光雷达

- 激光器的军事应用，是从激光雷达开始的。应用方向包括了战略应用和战术应用两个主流。
- 激光雷达的优势（比之微波雷达）在于极高的空间分辨率、极大的Doppler频移以及相对较为轻便的天线系统。
- 其优势所在，决定了它在军事应用中的地位。在战略方面，主要用于精确定位和目标特征识别。

最早的战略激光雷达是美国麻省理工学院林肯实验室于1975年建成的火池雷达 (Firepond)，它位于美国东北部马萨诸塞州 (Massachusetts) 的Millstone Hill 外场基地，用于监测GEOS-III卫星，(作用距离1100km) 也用于观察美国NASA从弗吉尼亚州的Wallops基地发射的火箭的运行轨迹。

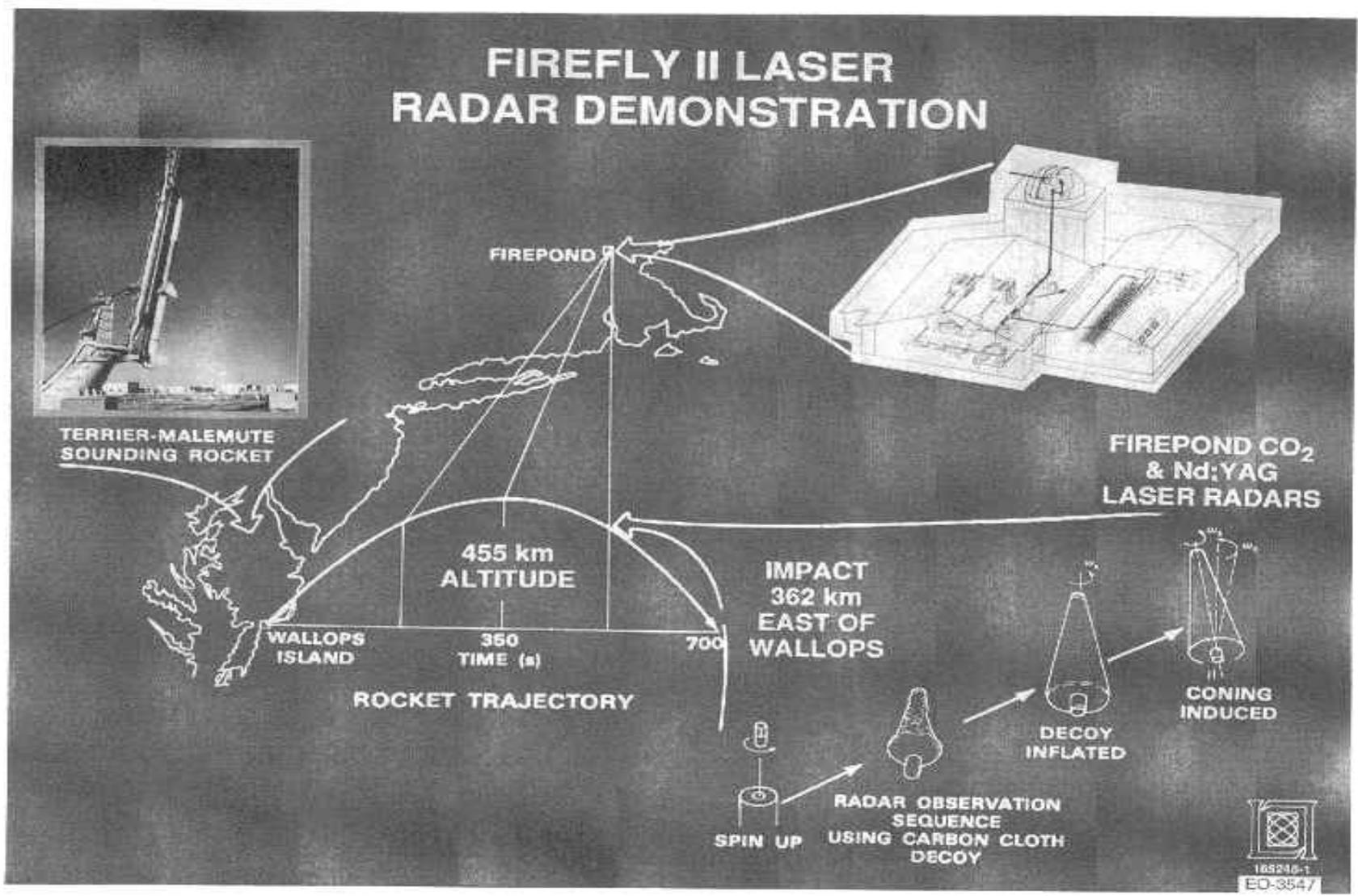


122 / Millstone Hill site.



Firepond laser radar.

FIREFLY II LASER RADAR DEMONSTRATION



Firefly II laser radar demonstration.

激光测距 激光准直

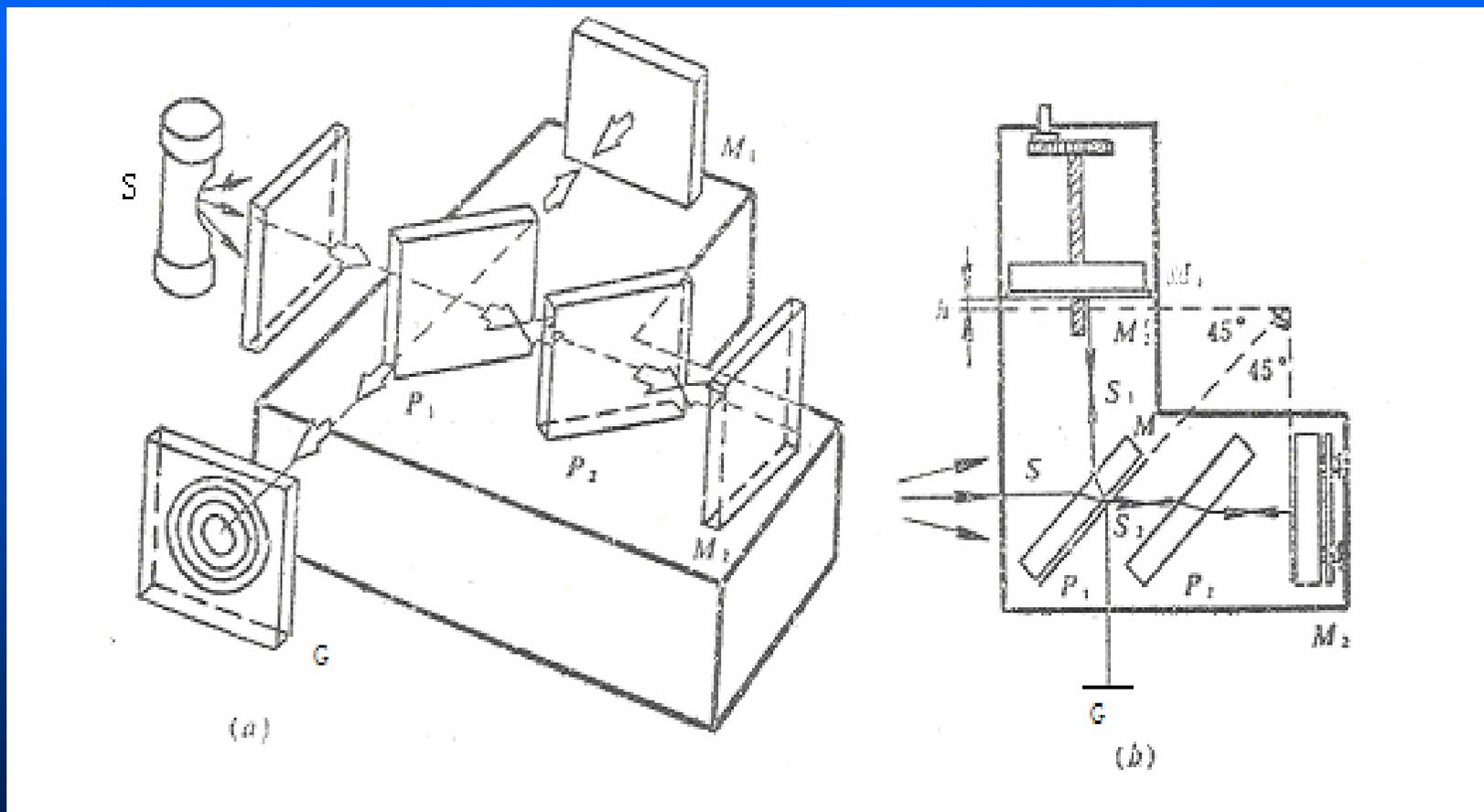
激光测距的原理与声波测距的道理差不多，因为光速 c 已知，只要测量从激光发射至接收到从物体反射回来的激光的时间间隔即可。

激光制导的导弹，头部有四个排成十字形的激光接收器（四象限探测仪）。如果四个接收器收到的激光一样多，就按原来方向飞行，如果有一个接收器接收的激光少了，它就自动调整方向。另一类可用激光束照射要打击的目标，经目标反射的激光被导弹上的接收器收到，引导导弹击中目标。

位移和速度检测装置

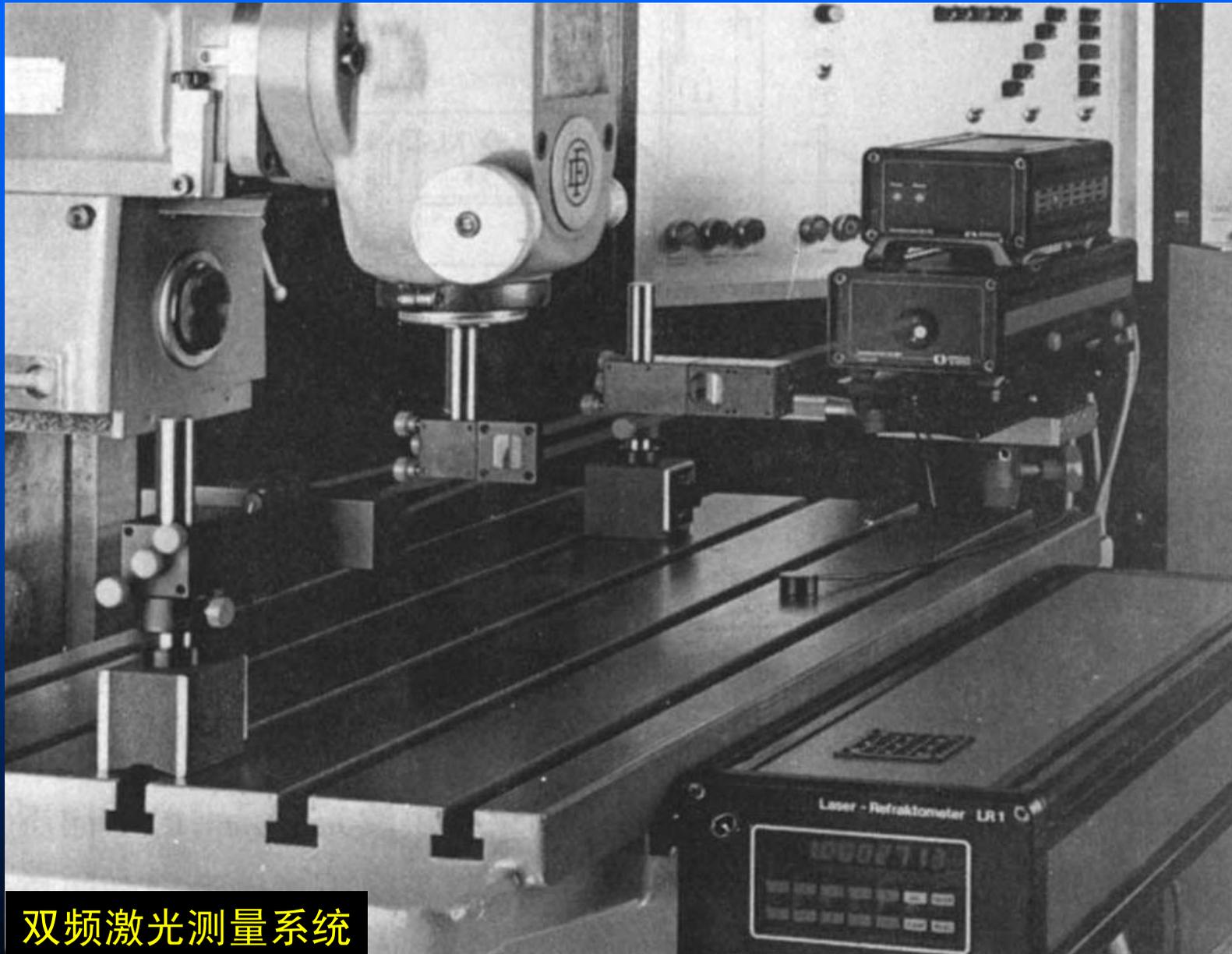
激光干涉仪原理

迈克尔逊干涉仪结构



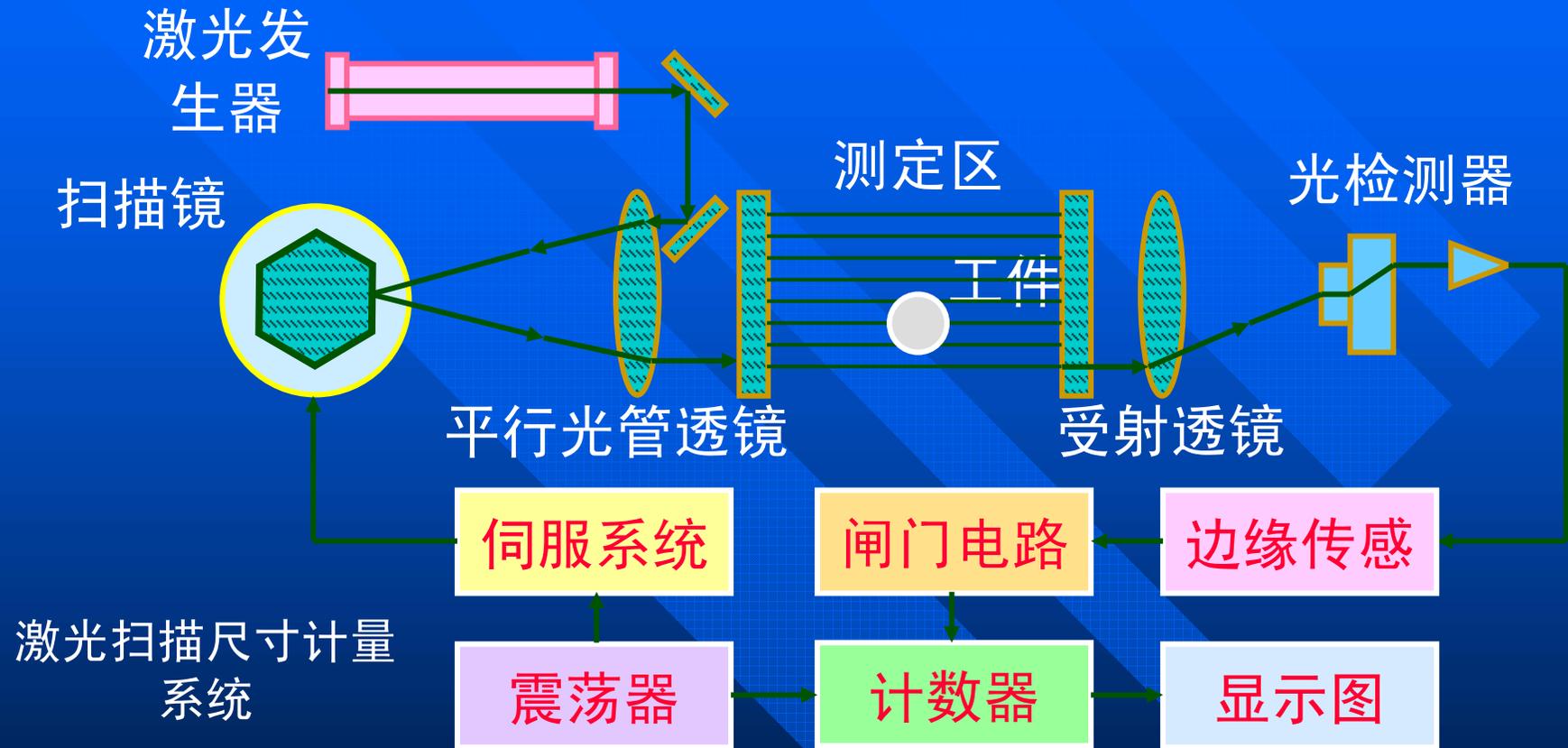
迈克尔逊干涉仪

由四个光学元件（两块平板玻璃 P_1 P_2 和两块平面反射镜 M_1 M_2 ）和一个精密的移动机构组成。



双频激光测量系统

激光高速扫描尺寸计量系统



★ 采用平行光管透镜将激光准确地调整到多角形旋转扫描镜上聚焦。通过激光扫描被测工件两端，根据扫描镜旋转角、扫描镜旋转速度，透镜焦距等数据计算出被测工件的尺寸。

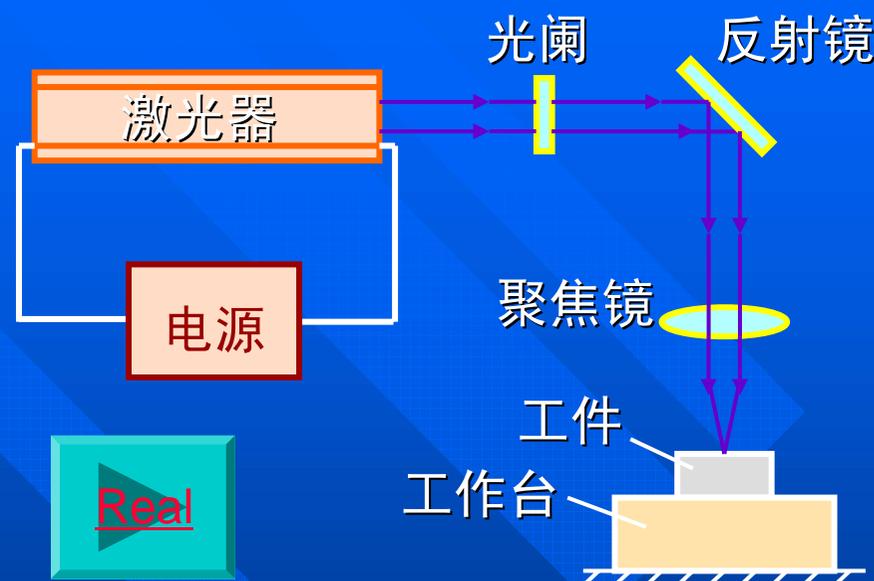
激光加工

工作原理

➤ 激光是一种受激辐射而得到的加强光。其基本特征：

- ◎ 强度高，亮度大
- ◎ 波长频率确定，单色性好
- ◎ 相干性好，相干长度长
- ◎ 方向性好，几乎是一束平行光

➤ 当激光束照射到工件表面时，光能被吸收，转化成热能，使照射斑点处温度迅速升高、熔化、气化而形成小坑，由于热扩散，使斑点周围金属熔化，小坑内金属蒸气迅速膨胀，产生微型爆炸，将熔融物高速喷出并产生一个方向性很强的反冲击波，于是在被加工表面上打出一个上大下小的孔。



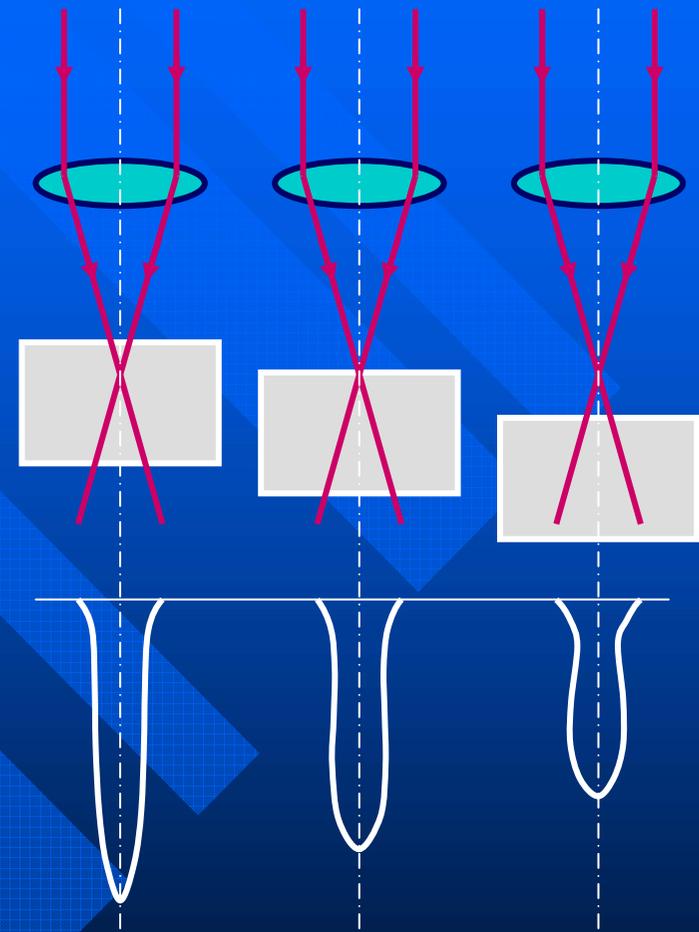
➤ 激光加工原理图

➤ 激光打孔

◎ 广泛应用于金刚石拉丝模、钟表宝石轴承、陶瓷、玻璃等非金属材料，和硬质合金、不锈钢等金属材料的小孔加工。

◎ 激光打孔具有高效率、低成本的特点，特别适合微小群孔加工。

◎ 焦点位置对孔的质量影响：若焦点与加工表面之间距离很大，则激光能量密度显著减小，不能进行加工。如果焦点位置偏离加工表面1mm，可以进行加工，此时加工出孔的断面形状随焦点位置不同而发生变化。



焦点位置对孔形状影响

➤ 激光切割

◎激光切割具有切缝窄、速度快、热影响区小、省材料、成本低等优点，并可以在任何方向上切割，包括内尖角。

◎可以切割钢板、不锈钢、钛、钽、镍等金属材料，以及布匹、木材、纸张、塑料等非金属材料。

➤ 激光焊接

◎与打孔相比，激光焊接所需能量密度较低，因不需将材料气化蚀除，而只要将工件的加工区烧熔使其粘合在一起。

◎优点：没有焊渣，不需去除工件氧化膜，可实现不同材料之间的焊接，特别适宜微型机械和精密焊接。

➤ 激光热处理

◎原理：照射到金属表面上的激光使表面原子迅速蒸发，由此产生微冲击波会导致大量晶格缺陷形成，达到硬化。

◎优点：快速、不需淬火介质、硬化均匀、变形小、硬化深度可精确控制。

激光切割



激光焊接车身

非线性光学效应

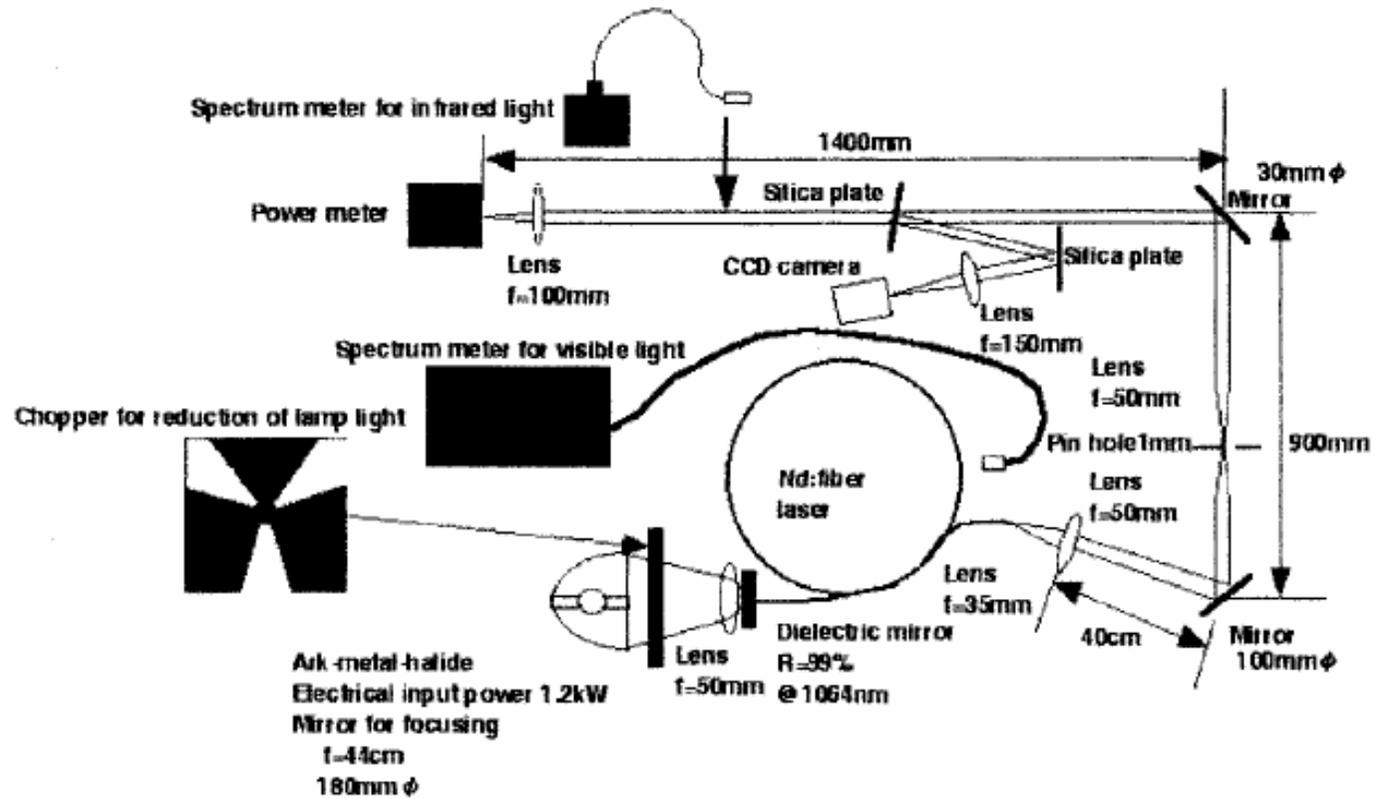
$$P = \varepsilon_0 \chi E = \alpha E$$

$$P = \partial E + \beta E^2 + \gamma E^3 + \dots$$

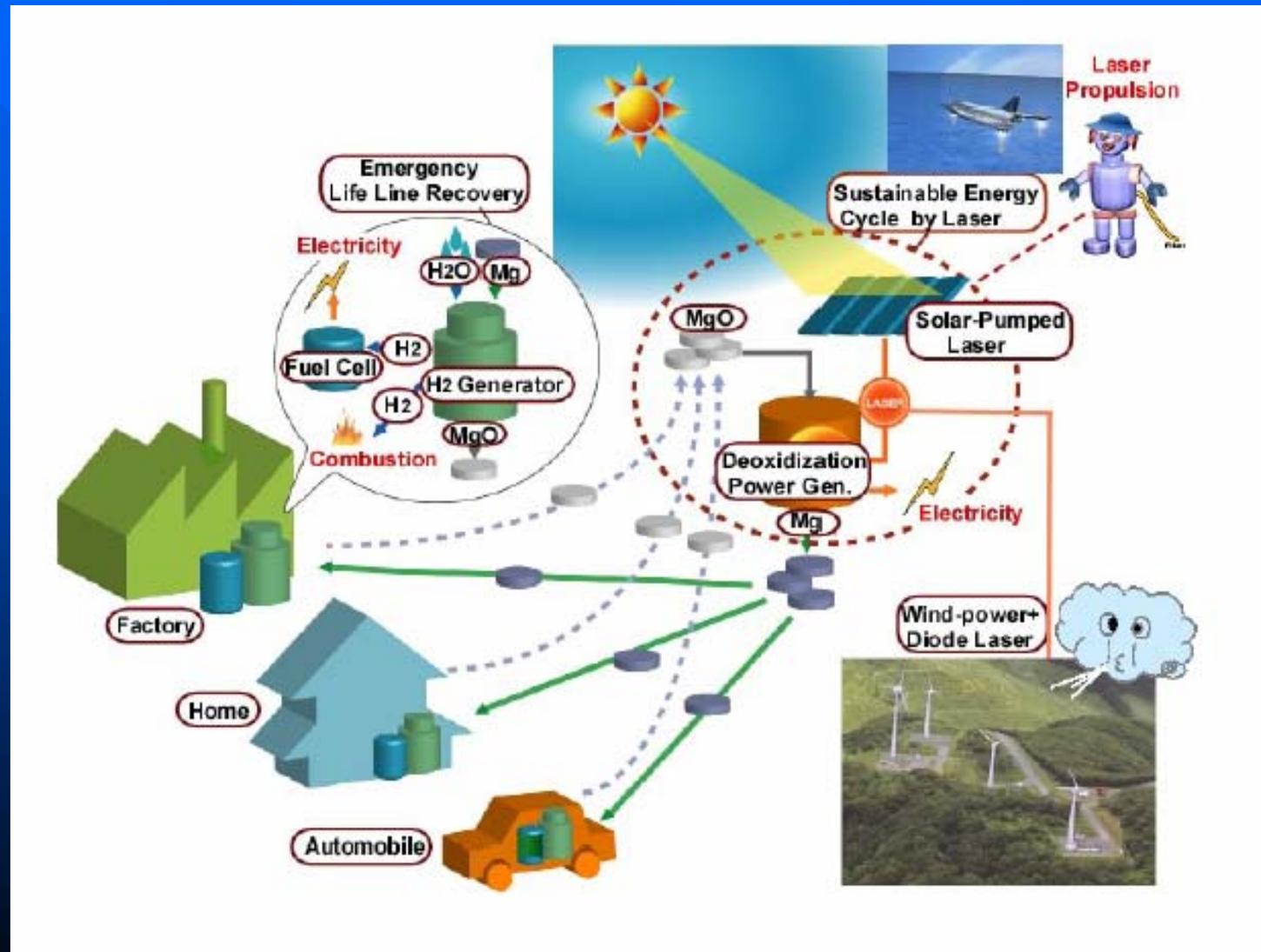
非线性光学现象

1. 倍频技术：红外变可见
2. 受激拉曼散射
3. 激光自聚焦

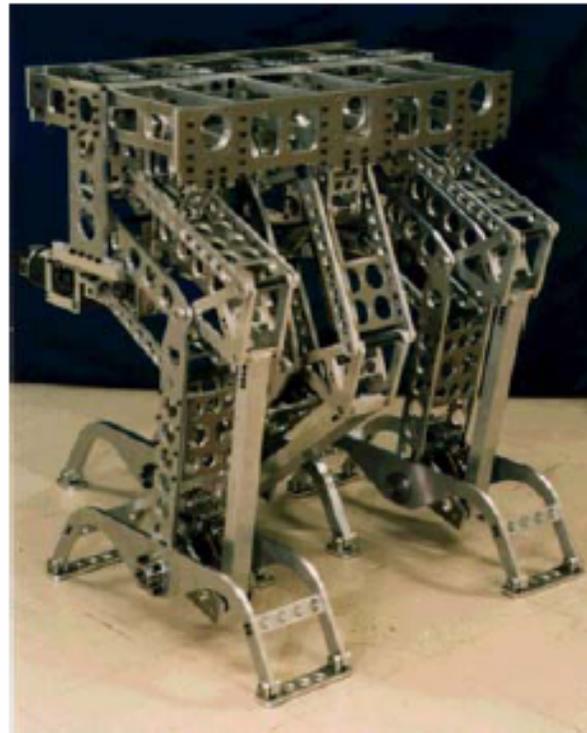
太阳能激光器



基于太阳能激光器的可再生能源



激光驱动机器人 Non-Electronics Robot (NEBOT)



激光



记忆合金



驱动机器人

应用：核电厂



冲击强化

激光力学



谢谢大家!