

《光子学》

光子学（量子电子学）：用量子力学方法研究光（电磁场）与物质（原子与分子）相互作用（高等激光物理、非线性光学）。

主要内容：

- (1) 激光谐振腔、激光的产生与传播
- (2) 若干典型激光器的工作原理
- (3) 激光与物质相互作用----非线性光学效应
- (4) 激光技术（激光器的Q开关和锁模技术）

量子电子学采用的基本理论：

半经典理论为基础（电磁场采用经典理论描述，原子和分子系统采用量子理论描述），简要介绍全量子理论

课程要求:

物理概念清楚, 了解理论方法。

参考教材: 《量子电子学》 A. 亚里夫 著 刘颂豪等译

预计讲授章节: 6-10, 16-18章

第六章 光束在均匀介质和类透镜介质中的传播--高斯光束及其传播

第七章 光学谐振腔

第八章 辐射场与原子系统的相互作用

第九章 激光振荡

第十章 几种特定的激光系统

第十六章 非线性光学导论-----二次谐波产生及位相匹配

第十七章 光参量放大、参量振荡

第十八章 受激喇曼散射和布里渊散射

补充内容: (1) 超短激光脉冲(飞秒激光)产生

(2) 三阶非线性光学效应(光克尔效应、三次谐波、四波混频、双光子吸收等)

- 参考书**
- (1) 英文原版 A. Yariv: “Quantum Electronics”
 - (2) 《激光原理》，周炳琨等著
 - (3) 《非线性光学》，石顺祥等著

成绩评定：

期末笔试（开卷）**80%+**平时成绩（学习态度和出席率）**20%**

“光子学”课程知识点：若干重要物理物理、原理、技术

(1) 谐振腔与高斯光束：

激光器主要组成部分及其主要作用；谐振腔与高斯光束；高斯光束的传播与ABCD定律；

(2) 激光与物质相互作用：

极化率的实部与虚部的物理意义；均匀加宽和非均匀加宽；增益饱和与增益曲线烧孔效应；频率牵引；光与物质相互作用的半经典理论；

(3) 若干激光器：

红宝石激光器、YAG激光器、He-Ne激光器、CO₂激光器、染料激光器、半导体激光器、钛宝石飞秒激光器；

(4) 激光技术：

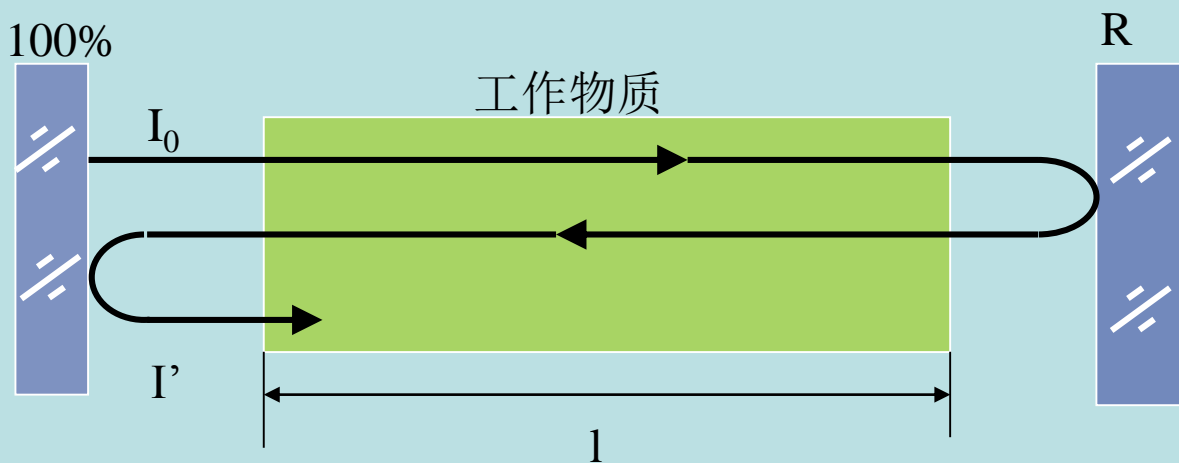
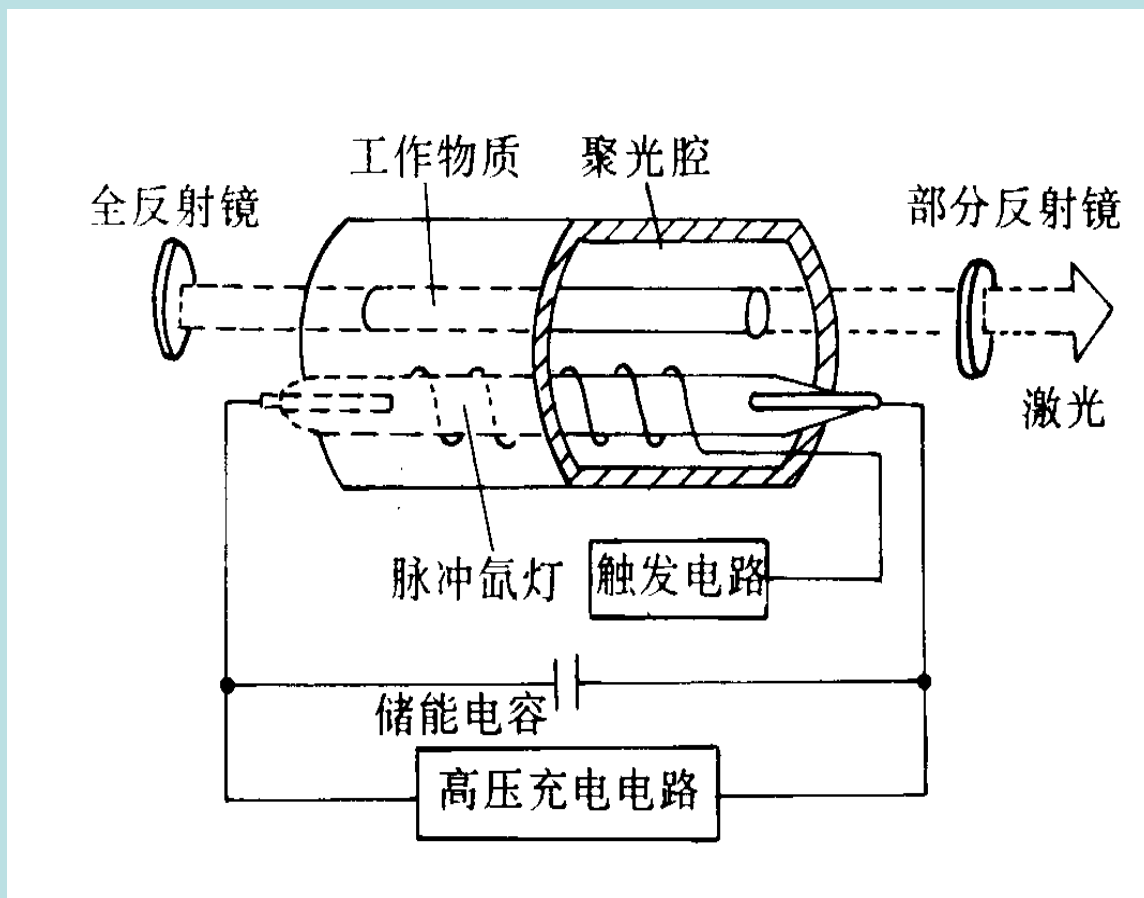
激光器锁模技术；激光器调Q技术；兰姆凹陷稳频技术；单纵模和单横模选模技术；电光调制、声光调制等；

(5) 非线性光学

二次谐波、参量振荡（放大）、四波混频、受激喇曼散射、受激布里渊散射、光学克尔效应、相位匹配、二阶与三阶非线性效应。

激光器的组成:

1. 激光工作物质
2. 泵浦源
3. 聚光腔
4. 谐振腔

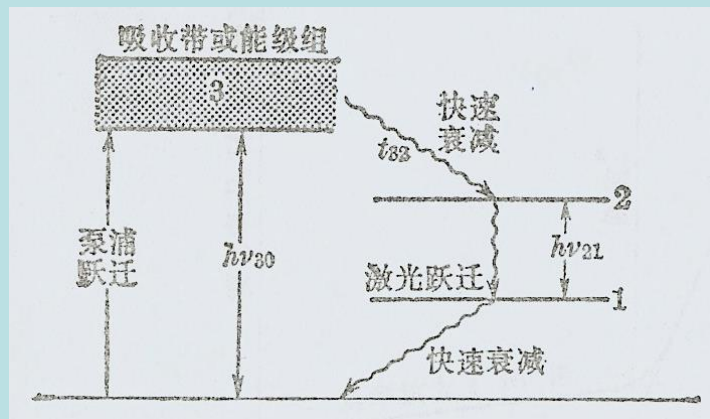


激光器中谐振腔的作用

1、提供光学正反馈：

在腔内共振频率处建立高的场强，维持自激振荡。

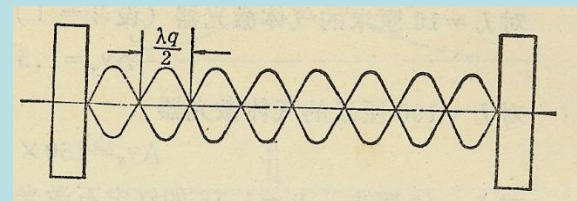
$$(W_{21})_i = W_i(\nu) = \frac{\lambda^2 I_\nu}{8\pi h\nu n^2 t_{spont}} g(\nu)$$



2、频率滤波：

有效地控制腔内实际振荡的模式数目，使大量光子集结在少数几个状态中，提高光子简并度，获得单色性好的相干光。

$$k_q l - (m + n + 1)(\tan^{-1}(z_2 / z_0) - \tan^{-1}(z_1 / z_0)) = q\pi$$

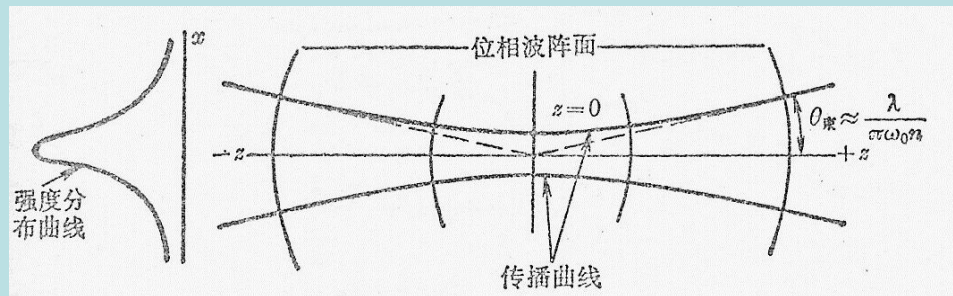


3、控制光束空间特性：

调节腔的几何参数可以直接控制激光束的横向分布特性、光斑尺寸、谐振频率、光束发散角等。

$$\omega(z) = \omega_0 \left[1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right]^{1/2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{r}{z}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi\omega_0 n}\right) \approx \frac{\lambda}{\pi\omega_0 n}$$



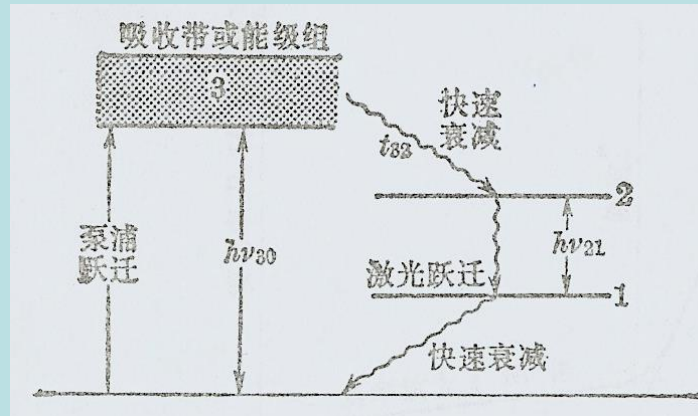
激光工作物质的作用

增益系数

$$\gamma(\nu) = \frac{[N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1] \lambda^2}{8\pi n^2 t_{spont}} g(\nu)$$

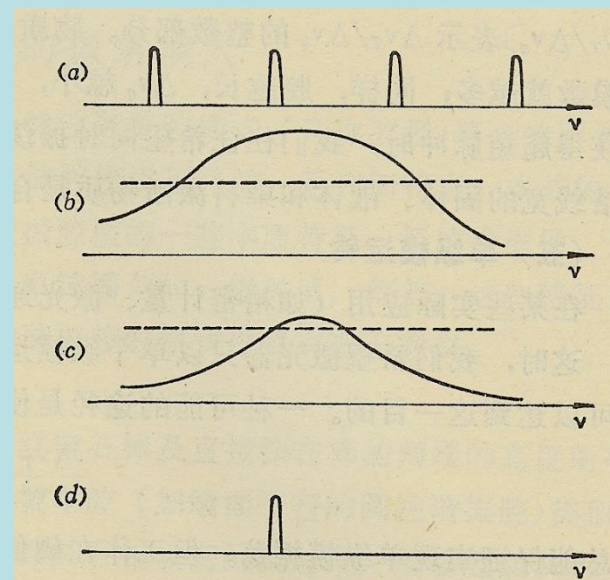
$$W'_{spont} = \frac{1}{t_{spont}} = \frac{2n^3 e^2 y_{12}^2 \omega^3 g_1}{\epsilon h c^3} = \frac{2n^3 \mu^2 \omega^3 g_1}{\epsilon h c^3}$$

自发辐射寿命 t_{spont} 与原子的跃迁偶极距 ($\mu = ey_{12}$) 成反比。

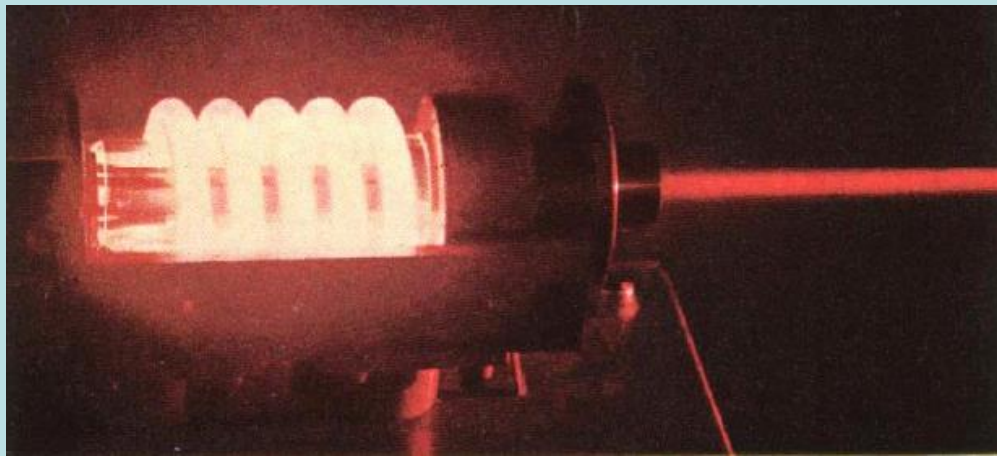


激光器输出激光的波长（频率）

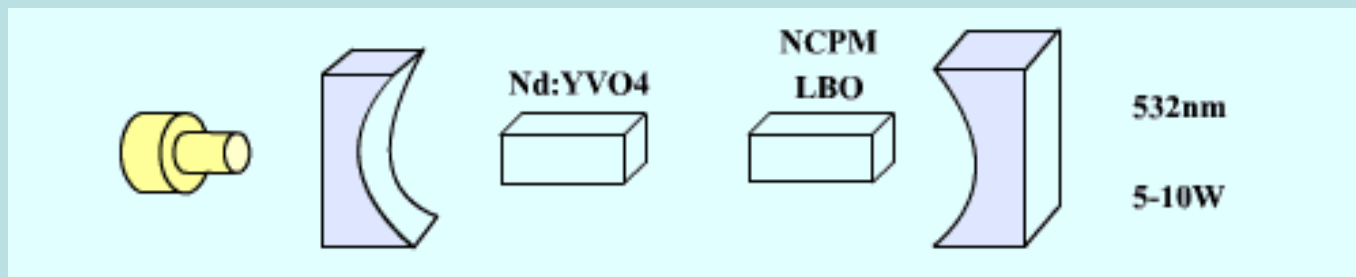
$$\nu \approx \nu_m - (\nu_m - \nu_0) \left(\frac{\Delta \nu_{1/2}}{\Delta \nu} \right)$$



1960-5-17, Ted Maiman 发明第一台激光器



第一台红宝石激光器的拆卸图



腔内倍频

第六章 光束在均匀介质和类透镜介质中的传播

本章讨论用简单的 2×2 矩阵来描述光束通过下列介质和元件的传播问题：**各向同性介质**，**薄透镜**、电解质面、曲面反射镜、具有二次型折射率变化的介质、增益变化介质等。这些 2×2 矩阵也能描述高斯光束（激光光束）的变化情况。

6.1 透镜波导

考虑一条通过薄透镜（焦距为 f ）的近轴光线，用两个参量 $\tilde{r}(z) = \begin{vmatrix} r(z) \\ r'(z) \end{vmatrix}$ 来描述光线。

（如图6.1所示，取对称轴为 z ）

r : 为光线与 z 轴的距离。

r' : 为光线的斜率 dr/dz 。

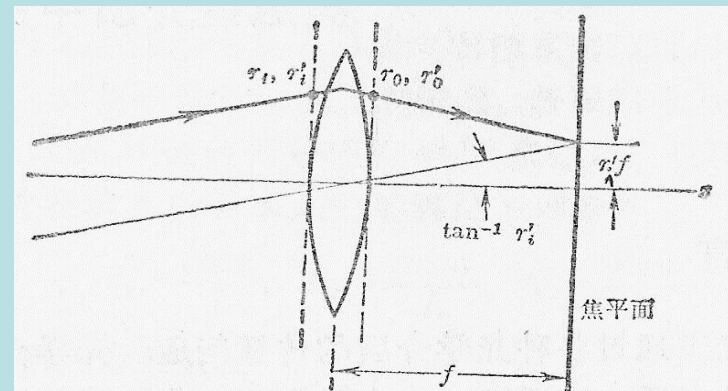


图 6.1 薄透镜引起的光线的偏折

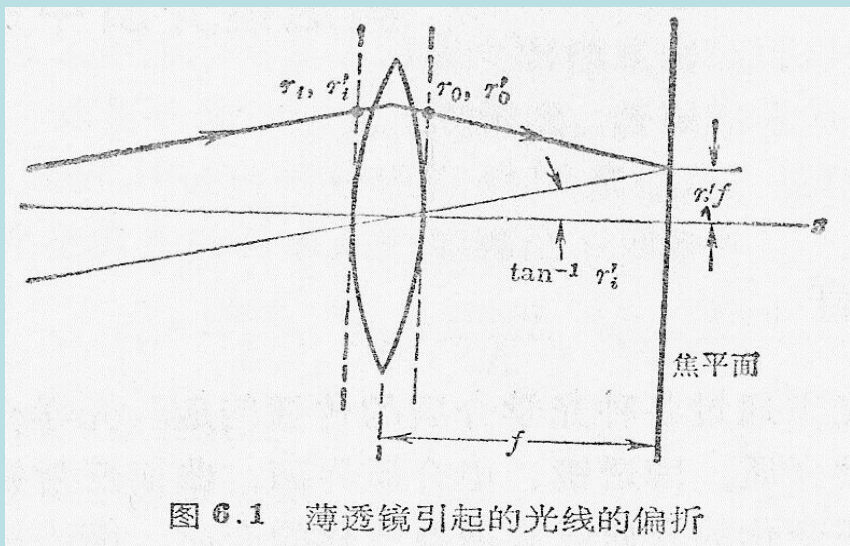
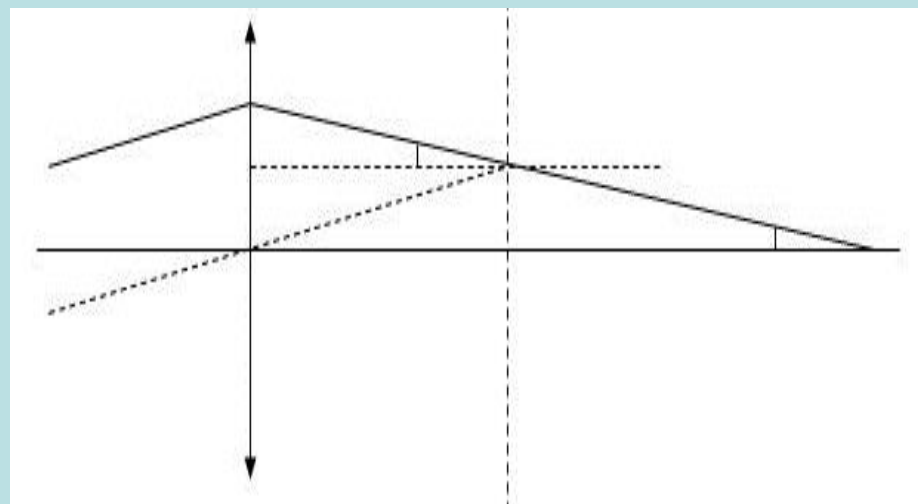


图 6.1 薄透镜引起的光线的偏折



则出射光线和入射光线有下列关系：

$$r_o = r_i$$

$$r_o' = -(r_o - r_i' f) / f = r_i' - \frac{r_o}{f} \quad (6.1-1)$$

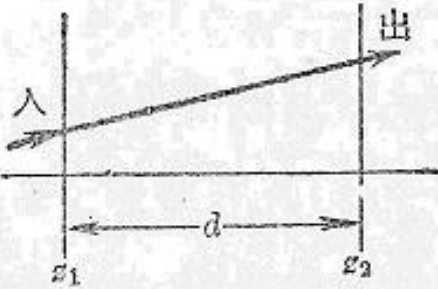
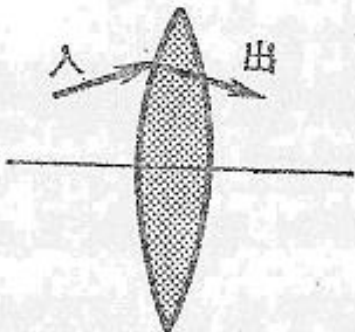
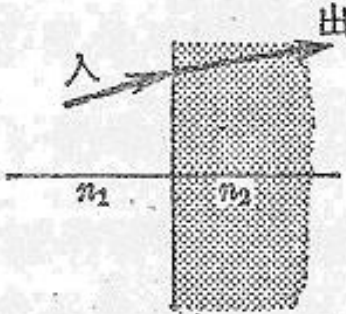
用矩阵乘法规则可以吧(6.1-1)式改写为

$$\begin{vmatrix} r_o \\ r_o' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_i \\ r_i' \end{vmatrix} \quad (6.1-2)$$

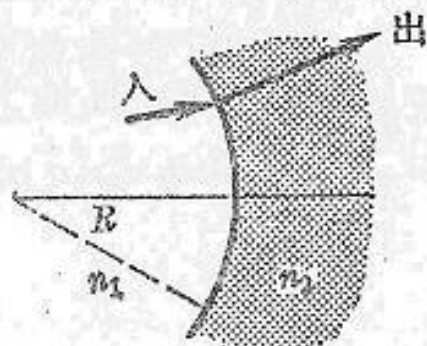
对于会聚透镜 $f > 0$ ，而发散透镜 $f < 0$ 。

表6.1列出了其它若干光学元件的光线矩阵。

表 6.1 某些常用的光学元件和介质的光线矩阵

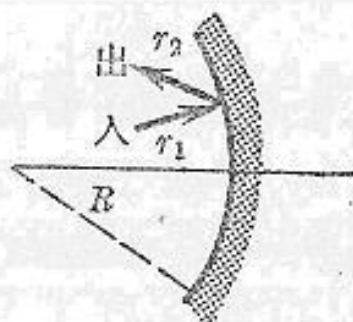
<p>(1) 长度为 d 的直线段</p>		$\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
<p>(2) 薄透镜: 焦距 f ($f > 0$, 会聚; $f < 0$, 发散)</p>		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$
<p>(3) 电介质界面: 折射率 n_1, n_2</p>		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$

(4) 球面电介
质界面:
半径 R



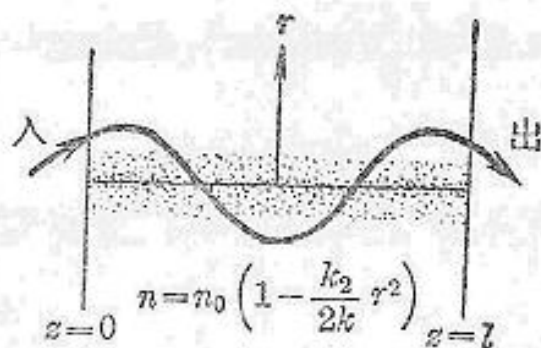
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2} \frac{1}{R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$$

(5) 球面反射
镜:
曲率半径 R



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}$$

(6) 有二次型
折射率变
化曲线的
介质



$$\begin{bmatrix} \cos\left(\sqrt{\frac{k_2}{k}} l\right) & \sqrt{\frac{k}{k_2}} \sin\left(\sqrt{\frac{k_2}{k}} l\right) \\ -\sqrt{\frac{k_2}{k}} \sin\left(\sqrt{\frac{k_2}{k}} l\right) & \cos\left(\sqrt{\frac{k_2}{k}} l\right) \end{bmatrix}$$

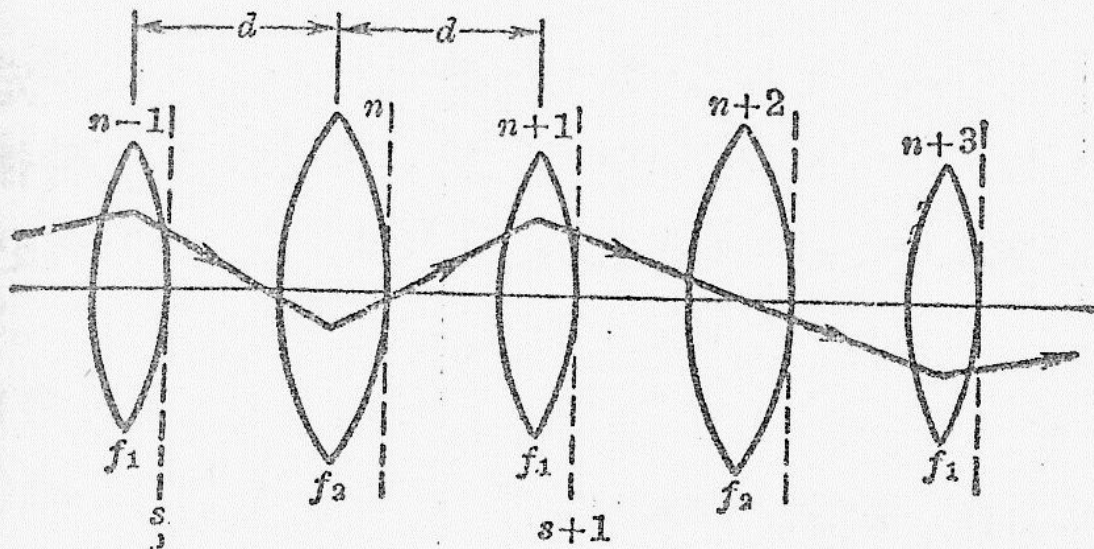


图 6.2 光线通过二元周期透镜序列的传播

考虑光线通过长度为 d 的均匀介质，然后通过一个焦距为 f 的薄透镜的传播。
 它等效于高斯光束在光学谐振腔内的传播。（反射镜曲率半径： $R_1 = 2f_1$ ； $R_2 = 2f_2$
 反射镜间距为 d 。）

$$\begin{aligned}
 \begin{vmatrix} r_o \\ r_o' \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_i \\ r_i' \end{vmatrix} \\
 &= \begin{vmatrix} 1 & d \\ -1/f & (1-d/f) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_i \\ r_i' \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

(6.1-3)

考虑光线通过一个二元周期透镜系统的传播（图6.2）。周期透镜的基本单元：平面 $n-1$ 和 $n+1$ 之间的部分。

将平面 $n-1, n+1, n+3, \dots$ 计为 $s, s+1, s+2, \dots$ ，则有

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} r_{s+1} \\ r'_{s+1} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} 1 & d \\ -1/f_1 & (1-d/f_1) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & d \\ -1/f_2 & (1-d/f_2) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_s \\ r'_s \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_s \\ r'_s \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (6.1-4)$$

该式也可以写成

$$\begin{aligned} r_{s+1} &= Ar_s + Br'_s \\ r'_{s+1} &= Cr_s + Dr'_s \end{aligned} \quad (6.1-5)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= 1 - \frac{d}{f_2}, B = d\left(2 - \frac{d}{f_2}\right) \\ C &= -\left[\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}\left(1 - \frac{d}{f_2}\right)\right] \\ D &= -\left[\frac{d}{f_1} - \left(1 - \frac{d}{f_1}\right)\left(1 - \frac{d}{f_2}\right)\right] \end{aligned} \quad (6.1-6)$$

由(6.1-5)式的第一式得

$$r_s' = \frac{1}{B}(r_{s+1} - Ar_s) \quad (6.1-7)$$

$$r_{s+1}' = \frac{1}{B}(r_{s+2} - Ar_{s+1}) \quad (6.1-8)$$

将(6.1-5)的第二式代入上式，并利用(6.1-7)式可得

$$r_{s+2} - (A + D)r_{s+1} + (AD - BC)r_s = 0 \quad (6.1-9)$$

根据(6.1-6)式可得 $AD - BC = 1$ ，从而上式可以写成

$$r_{s+2} - 2br_{s+1} + r_s = 0 \quad (6.1-10)$$

式中

$$b = \frac{1}{2}(A + D) = \left(1 - \frac{d}{f_2} - \frac{d}{f_1} + \frac{d^2}{2f_1f_2}\right) \quad (6.1-11)$$

使用试探解

$$r_s = r_0 \exp(is\theta) \quad (6.1-12)$$

并代入(6.1-10)式可得 $e^{2i\theta} - 2be^{i\theta} + 1 = 0$

其解为

$$e^{\pm i\theta} = b \pm i\sqrt{1-b^2} = \cos \theta \pm i \sin \theta \quad (6.1-13)$$

因此可得 $\cos \theta = b = \frac{1}{2}(A + D)$

由(6.1-13)式可得**光线稳定的条件为 θ 为实数**。而 θ 为实数的条件是

$$|b| \leq 1$$

$$-1 \leq 1 - \frac{d}{f_2} - \frac{d}{f_1} + \frac{d^2}{2f_1f_2} \leq 1 \quad (6.1-15)$$

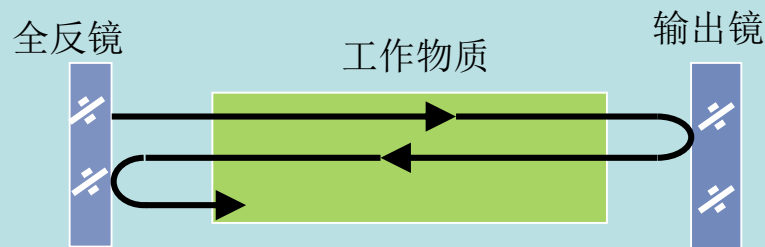
或写成

$$0 \leq \left(1 - \frac{d}{2f_1}\right)\left(1 - \frac{d}{2f_2}\right) \leq 1 \quad (6.1-16)$$

此式相当于**光学谐振腔的稳定条件**。

$$0 \leq \left(1 - \frac{l}{R_1}\right)\left(1 - \frac{l}{R_2}\right) \leq 1$$

$$(R_1 = 2f_1, R_2 = 2f_2, d=l)$$



6.5-6.7 高斯光束和ABCD定律

高斯光束： 在垂直于传播方向的平面上的强度分布为高斯型的光束。激光器输出的激光束通常是高斯光束。

光波电场可以写成

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{E}(x, y, z)e^{i\omega t}]$$

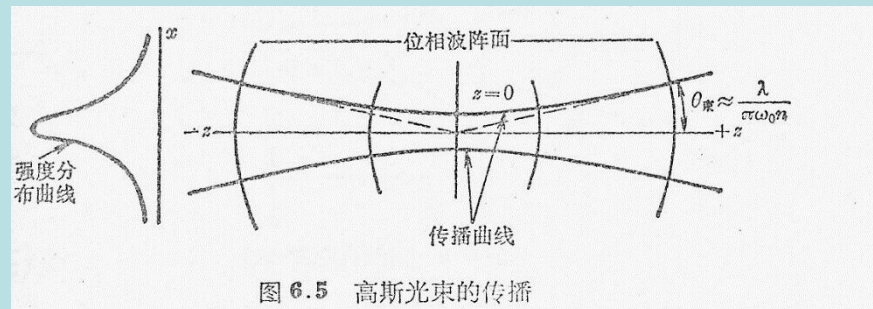


图 6.5 高斯光束的传播

由麦克斯韦方程可以推出 $E(x,y,z)$ 的表达式,

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp[-i(kz - \eta(z)) - r^2 \left(\frac{1}{\omega^2(z)} + \frac{ik}{2R(z)} \right)] \quad (6.6-14)$$

$$\text{其中 } r^2 = x^2 + y^2, \quad \omega^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right] \quad (6.6-11)$$

($\omega(z)$ 称为高斯光束光斑尺寸)

$$R(z) = z \left[1 + \frac{z_0^2}{z^2} \right] \quad (6.6-12)$$

($R(z)$ 称为高斯光束曲率半径)

$$\eta(z) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (6.6-13)$$

$$z_0 = \frac{\pi\omega_0^2 n}{\lambda} \quad (6.6-13a)$$

z_0 等于光斑尺寸 $\omega(z)$ 增大到 $\sqrt{2}\omega_0$ 时离开束腰的距离。

光斑尺寸 $\omega(z)$: 由(6.6-14)式可见, 当 $r = \sqrt{x^2 + y^2} = \omega(z)$ 时, 光场振幅下降为轴上值的 $1/e$ 倍。可见, **高斯光束的能量密度约束在 z 轴附近。**

高斯光束束腰: $\omega(0) = \omega_0$ 称为最小光斑尺寸, 也称为高斯光束束腰。

讨论: 由(6.6-14)式可知, 一旦知道了高斯光束的束腰 ω_0 和它的位置 (此位置可以设为 $z=0$), 高斯光束就可以被唯一地确定。并可以求出在任一 z 处的光斑尺寸 $\omega(z)$ 和曲率半径 $R(z)$ 。

高斯光束的发散角

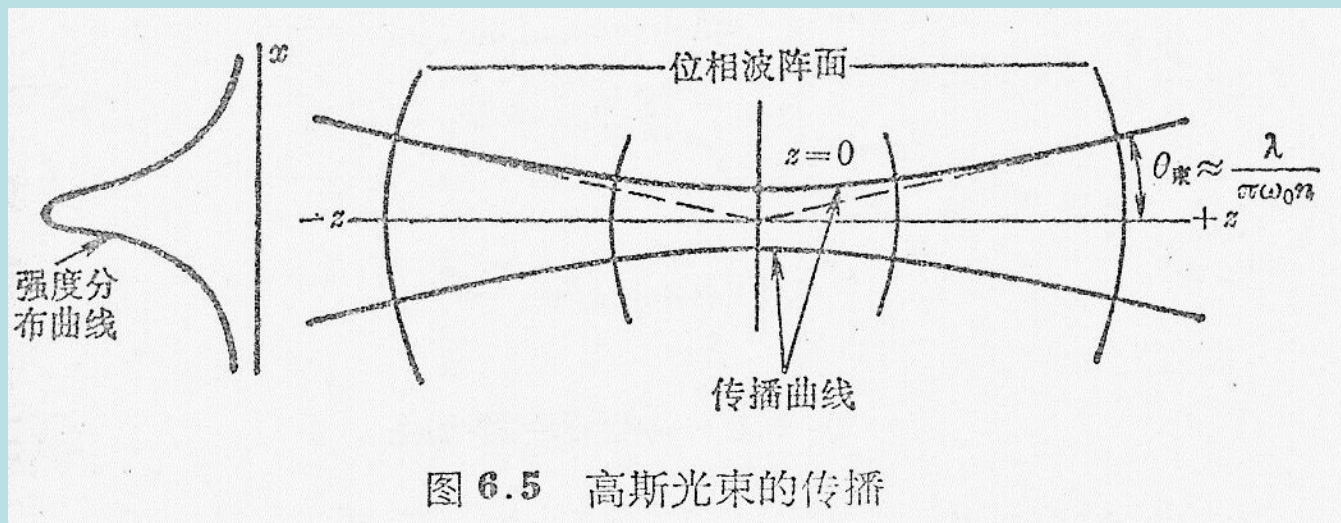


图6.5给出了高斯光束的传播特性示意图。图中的双曲线表示光线的方向，它是包含 z 轴的平面与双曲面的交线。由(6.6-14)式该双曲面表达式为，

$$\text{双曲面: } x^2 + y^2 = \text{常数} \cdot \omega^2(z) \quad (6.6-16)$$

此双曲面相应于能量传播方向。

对于大的 z (即 $z \gg z_0$)，利用(6.6-11)式有

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right]$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{\lambda}{\pi \omega_0 n} z \quad (6.6-17)$$

(6.6-17)式是一个圆锥体方程，这个锥体的半顶角被用于度量高斯光束的发散角，

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{r}{z}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi\omega_0 n}\right) \approx \frac{\lambda}{\pi\omega_0 n} \quad (6.6-18)$$

可见高斯光束的束腰越小，其发散角越大。

高斯光束的ABCD定律

如果已知高斯光束在任一z处的光斑尺寸和光束半径，此高斯光束也就被唯一地确定。

因此，为了计算方便，可以引入q参量来描述高斯光束

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi n \omega^2(z)} \quad (6.7-5)$$

q参量满足下面ABCD定律；

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (6.7-6)$$

式中的A，B，C，D是表征同一介质的光线矩阵元，表6.1中列出的所有元件都遵守该定律。

例一、考虑高斯光束通过一焦距为 f 的薄透镜的传播

高斯光束在薄透镜输入和输出的 q 参量分别为 q_1 和 q_2 薄透镜的光线矩阵为

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{vmatrix}$$

因此有

$$q_2 = \frac{q_1}{-q_1/f + 1} = \frac{1}{1/q_1 - 1/f}$$

于是可得

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{q_1} - \frac{1}{f} \quad (6.7-7)$$

将 q 参量定义式和(6.7-7)式合并可得,

$$\omega_2 = \omega_1$$
$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{f} \quad (6.7-8)$$

例二、考虑高斯光束在均匀介质中的传播

高斯光束通过长度为 d 的均匀介质，输入和输出的 q 参量分别为 q_1 和 q_2

均匀介质的光线矩阵为 $\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$ ，因此有

$$q_2 = \frac{q_1 + d}{0 + 1} = q_1 + d \quad (6.6-5)$$

例三、考虑高斯光束通过两个相邻的类透镜介质的传播

介质 1 的光线矩阵： $\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix}$ 介质 2 的光线矩阵： $\begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix}$

在介质 2 出射处的光束参量 q 可以写成

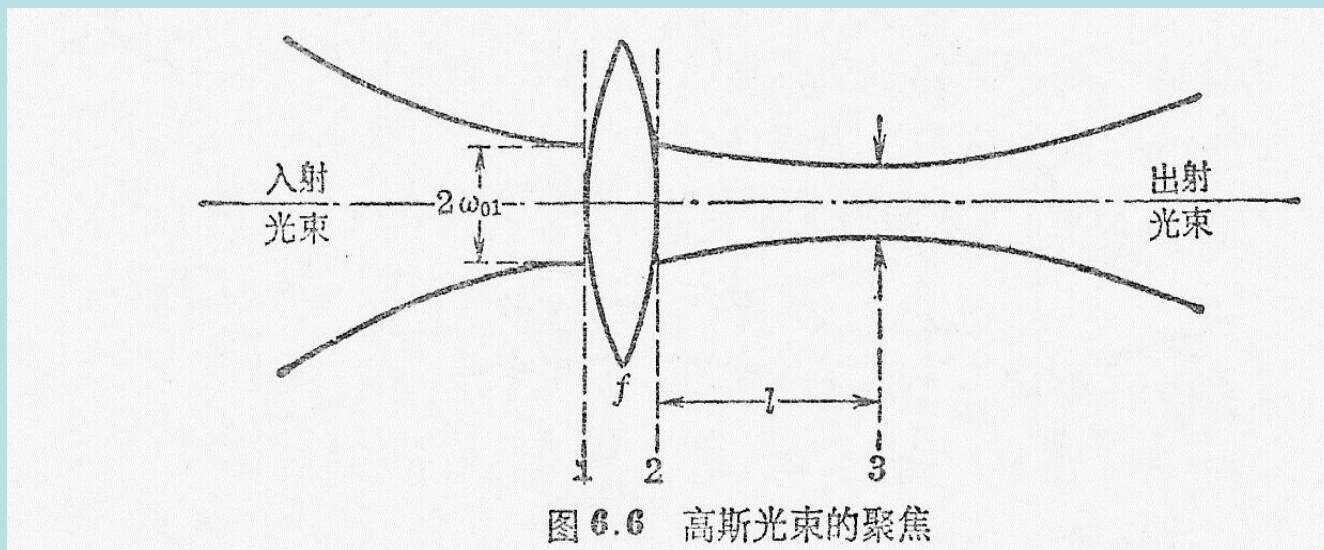
$$q_3 = \frac{A_T q_1 + B_T}{C_T q_1 + D_T} \quad (6.7-9)$$

介质 1 和介质 2 的组合矩阵元等于两个矩阵元的乘积，

$$\begin{vmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \quad (6.7-10)$$

在计算高斯光束通过组合元件组成的复杂系统时，使得计算大为简化。

举例---高斯光束的聚焦



如图6.6所示，高斯光束的束腰入射在焦距为 f 的薄透镜上，求出射光束束腰及其位置。

在入射平面 1 处 $\omega = \omega_{01}$, $R = \infty$, 因而

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{R_1} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_{01}^2 n} = -i \frac{\lambda}{\pi \omega_{01}^2 n}$$

用(6.7-7)式可以导出在平面 2 处有

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{q_1} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{f} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_{01}^2 n}$$

$$q_2 = \frac{1}{-\frac{1}{f} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_{01}^2 n}} = \frac{-a + ib}{a^2 + b^2}$$

其中

$$a = \frac{1}{f}, \quad b = \frac{\lambda}{\pi \omega_{01}^2 n}$$

由(6.6-5)式可以得到在平面 3 处有

$$q_3 = q_2 + l = \frac{-a}{a^2 + b^2} + l + \frac{ib}{a^2 + b^2}$$

$$\frac{1}{q_3} = \frac{1}{R_3} - i \frac{\lambda}{\pi \omega_3^2 n} = \frac{\left(\frac{-a}{a^2 + b^2} + l\right) - i \frac{b}{a^2 + b^2}}{\left(\frac{-a}{a^2 + b^2} + l\right)^2 + \left(\frac{b}{a^2 + b^2}\right)^2}$$

平面 3 为出射光束束腰位置，因此有 $R_3 = \infty$ 则可导出光束新束腰位置，

$$l = \frac{a}{a^2 + b^2} = \frac{f}{1 + \left(\frac{f}{\pi \omega_{01}^2 n / \lambda}\right)^2} \quad (6.7-11)$$

还可以得到

$$\frac{\lambda}{\pi \omega_3^2 n} = \frac{1}{\left(\frac{b}{a^2 + b^2}\right)}$$

则可以得到光束束腰，

$$\frac{\omega_3}{\omega_{01}} = \frac{\frac{f\lambda}{\pi \omega_{01}^2 n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f\lambda}{\pi \omega_{01}^2 n}\right)^2}} \quad (6.7-12)$$