

刘忠达 编著

J I Q I

GUANG

激光及其应用

YING YONG

辽宁人民出版社

激光及其应用

刘忠达 编著

•
辽宁人民出版社出版
(沈阳市南京街6段1里2号)

辽宁省新华书店发行
朝阳六六七厂印刷

•
开本: 787×1092 1/32 印张: 10 1/2

字数: 225,000 印数: 1—6,500

1979年11月第1版 1979年11月第1次印刷

统一书号: 15090·69 定价: 0.72元

前 言

激光技术是以原子物理、量子理论、光学技术和电子技术为基础，在工业、农业、科学技术和国防现代化发展需要的推动下产生，并迅速发展起来的一门新技术。

激光技术出现的意义，决不仅是在技术领域内增添一个新的分支，而且标志着人类认识自然、改造自然的能力又发展到一个新高度。大力发展和推广激光技术在各行各业的应用，不仅为加速实现四个现代化提供强有力的手段，而且对提高人民的生活，增进人民的身体健康，也具有极为重要的意义。当前，全国各条战线正在积极推广应用激光新技术，取得了可喜的成果。为了配合我省发展和推广激光技术应用和向四个现代化进军的需要，笔者编写了《激光及其应用》一书，希望能为读者学习激光技术，了解激光技术应用现状和发展前景提供参考。

本书在编写过程中得到了辽宁大学物理系佟傅功副教授、肇树春讲师、黄恩令讲师、宋常立讲师的热情帮助，并参考了上海光机所、吉林应化所、广东中山医学院、黑龙江大学、沈阳仪表研究所等单位的一些有关资料，在此一并致谢。

刘 忠 达

目 录

第一章 绪论	1
§ 1—1 光的本质	1
§ 1—2 光线的反射和折射现象	6
§ 1—3 光的色散和干涉现象	12
§ 1—4 光的偏振和绕射现象	15
§ 1—5 透镜成像	18
§ 1—6 激光及其特点	25
§ 1—7 原子结构与原子光谱	40
第二章 激光的基本原理	54
§ 2—1 光和物质的作用	54
§ 2—2 粒子数的反转分布	60
§ 2—3 光谱线的加宽	66
§ 2—4 光学谐振腔	74
§ 2—5 激光的振荡条件	78
§ 2—6 谐振腔的模式	84
§ 2—7 谐振腔的模体积和模式选择	86
第三章 固体激光器	94
§ 3—1 固体激光器的工作物质	95
§ 3—2 谐振腔和泵浦系统	107
§ 3—3 目前常用的几种固体激光器	129
第四章 气体激光器	134
§ 4—1 原子气体激光器	135
§ 4—2 分子气体激光器	161
§ 4—3 离子气体激光器	179
§ 4—4 稳频技术	191

第五章 调 Q 与锁模技术	195
§ 5—1 调 Q 激光器的基本原理	195
§ 5—2 转镜开关	199
§ 5—3 电光开关	201
§ 5—4 饱和吸收体开关	210
§ 5—5 锁模技术	212
第六章 其它几种常见激光器	219
§ 6—1 液体激光器	219
§ 6—2 半导体激光器	228
§ 6—3 化学激光器	239
第七章 激光器的应用	243
§ 7—1 激光在材料加工上的应用	243
§ 7—2 激光在精密测量和测试方面的应用	254
§ 7—3 激光准直	261
§ 7—4 激光测距	264
§ 7—5 全息照相技术	266
§ 7—6 激光在化学上的应用	274
§ 7—7 激光分离同位素和激光裂解色谱	277
§ 7—8 激光光谱学	279
§ 7—9 激光测污与大气研究	282
§ 7—10 激光在通讯上的应用	284
§ 7—11 激光技术在农业上的应用	292
§ 7—12 激光在医疗上的应用	303
§ 7—13 激光在海洋学中的应用	315
§ 7—14 激光跟踪人造卫星	317
§ 7—15 激光在计算机上的应用	319
§ 7—16 激光受控热核反应和激光加速器	322
§ 7—17 激光技术在司法和公安上的应用	325
§ 7—18 激光技术在军事上的应用	326
§ 7—19 激光技术的未来	329

第一章 绪 论

“光”是我们最熟悉的现象之一。我们的周围是一个充满着光的世界。白天，金色的阳光沐浴着大地；夜晚，灯光灿烂，月光如洗；还有那茫茫大海中的灯塔，照耀着黎明前的海洋，指引着千船万舰，破浪前进，夜航不息……。正是由于有了光，我们才能看到周围的世界，才能从事生产和生活活动。没有光人类就无法生活。光对人类的生存如此重要，那么光究竟是什么东西？光是怎样产生的？怎样控制和利用它？这些问题，很早就引起了人们的极大关注，并积极开展了对“光”的研究工作，致使光学成为物理学中发展最早的部门之一。

§ 1—1 光的本质

我国古代劳动人民对“光”现象、光的本质、光的控制和利用进行了大量的研究工作，取得了很大的成绩，积累了丰富的经验。早在公元前五世纪到三世纪形成的《墨经》一书，就有八条有关光学方面的论述。说明了成影、成像的道理，为几何光学的形成和发展打下了基础。如，在《墨经·经说篇》有这样的一段记载：“景光之人煦若射。下者之人也高，高者之人也下。足蔽下光，故成景于上，首蔽上光，故成景于下。”意思是说，当光照射到人身上的时候（光之人），被人体反射的光线，就好象射出的箭，直线前进（煦

若射)。这样，人体的下部在光屏的高处成像；人体的上部则在光屏的下面成像（下者之人也高，高者之人也下）。这也就是说，所成的像是一倒像。《墨经》中有关光学的论述是世界上最早的。此后，北宋的沈括在其所著的《梦溪笔谈》一书中也有类似的实验叙述：如：“若鸢飞空中，其影随鸢而移，或中间为窗隙所束，则影与鸢遂相违，鸢东则影西，鸢西则影东。又如窗隙中楼塔之影，中间为窗所束，亦皆倒垂。”再如，我国古籍《淮南子》中还有关于凹镜取火的记载：“阳燧见日则燃而为火”，等等。这些都充分说明了我国古代劳动人民对光学的研究和利用已经取得了很大的成就，对光学技术的发展做出了重大的贡献。

对光的本质的认识，自古以来，一直进行着激烈的争论。古希腊人认为光是从人的眼睛里射出来的东西，所以人才能看到周围的物质。到了十七世纪，便形成了两种对立的学说。十七世纪初德国天文学家开普勒认为，光是从发光体中不断发射出来的某种物质，而不是从眼睛里流出来的东西，并且指出光是瞬时传播的。到了十七世纪六十年代，英国物理学家牛顿，在开普勒等人的基础上，进一步提出了光是从光源中发射出来的微粒构成的特殊物质。这些微粒在同一介质中，以有限的速度作均匀直线运动。牛顿认为光之所以有不同的颜色，是由于从光源中发射出来的微粒的大小不一样，尺寸最大的微粒呈红色，尺寸最小的微粒呈紫色，微粒大小不一样，微粒前进的速度也不一样。所谓“白光”，则是各种颜色的光的混合。牛顿还利用棱镜对光的色散进行了最初步的观察，并作了如下的解释：光的色散是由于折射介质（如玻璃棱镜等）的质点对大小不同的光微粒吸引力不

等而产生的，这个吸引力使较大的光微粒飞行方向改变的角度，小于较小的光微粒。在说明光的反射时牛顿认为：“光微粒正象弹性球在弹性壁上反射时，遵守的定律那样，而从镜面上反射。”如图1—1所示。按着牛顿的理论，当光从光疏介质进入光密介质时，光线向着由入射点所作的介质交界面的法线偏折，如图1—2所示。牛顿解释说，这是由于光密

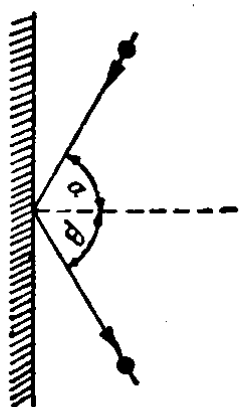


图1—1 弹性球与壁的碰撞

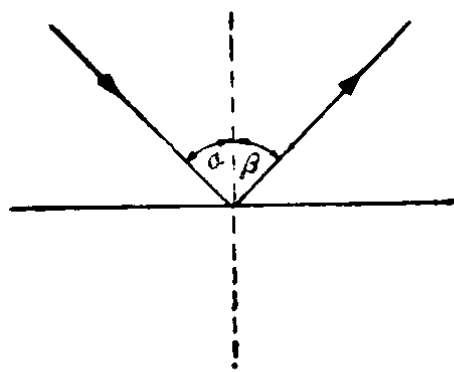


图1—2 光的反射与折射

介质的质点对光微粒吸引力强的缘故。根据牛顿这一理论，可得出光线折入水中时，光在水中的传播速度，应比光在空气中的传播速度大（这一结论后来证明是错误的）。

在牛顿的光的微粒说刚刚确立不久，荷兰物理学家惠更斯，提出了一个和牛顿的微粒理论截然对立的理论，即光的波动理论。惠更斯认为光是一种波，而根本不是什么微粒。他还假定了在空气、水、玻璃，甚至在真空中都存在着一一种特殊的物质“以太”，而光波是在“以太”中传播的，就好象声音在空气中传播一样，具有波所固有的各种现象。在说明光的折射现象时，惠更斯也是从介质不同，而使光的传播速度不同这一点出发，但他认为光在光密介质中的传播速度小于在光疏介质中的传播速度。按着惠更斯的波动说，得出光在水中的传播速度小于光在空气中的传播速度。这与根据

牛顿微粒说得出的结论恰恰相反。那么究竟是牛顿的微粒说正确，还是惠更斯的波动说正确呢？由于当时技术水平的限制，人们尚不能准确地用实验方法测定光速，因此无法根据折射现象判断两种学说的优劣。

牛顿的微粒说和惠更斯的波动说都能解释一定的现象。例如，用光的微粒说可以解释光的色散、反射、折射和光的直进等现象；用光的波动说可以解释光的反射、折射、双折射等现象，但惠更斯没有对光的颜色和直进现象进行解释，所以显示不出那一种理论更为优越。但当时由于牛顿在科学界威信极高，加之微粒说能较自然地说明光的直进现象，致使惠更斯的波动说被忽视，甚至被遗忘将近百年。

到了十九世纪初，人们发现了光的干涉、绕射和偏振等现象。这些现象都是波动的特征，和微粒说是格格不入的，这时人们又开始想起惠更斯的波动说。1802年，有人用双缝干涉实验第一次测量了相应于可见光的波长，于是光的波动说在光的微粒说占有统治地位的情况下，开始被人重视。1862年，福克用实验的方法测定了水中的光速，并得到了水中（光密介质）的光速小于空气（光疏介质）中的光速的结论。这一结论有力地支持了惠更斯的波动说，从而使光的波动说战胜了光的微粒说而居于主导地位。但是，惠更斯的波动说，对很多光学现象还不能圆满地加以解释，如光的直进性，光的颜色等。特别是，由于他臆造了一种奇妙的“以太”，作为传奇式的传播光的介质。这表明惠更斯的波动说，仍然不能确切地描述光的本质。这时，实际上光的本质仍然是一个没有彻底揭开之谜。

到了十九世纪中期，电磁场理论获得很大发展，才确认了

光是一种电磁波，而不是惠更斯所说的机械波。当时，英国的物理学家麦克斯韦，根据电磁场理论，推断光也是一种电磁波。并算出电磁波的传播速度，与光速一样，都是每秒三十万公里，并使其推断得到证实。这是对光的本质的认识上的一次质的飞跃，但仍然很不完善。

到了十九世纪末，对光的本质的认识，又出现了新的见解。当时德国人基尔霍夫，通过对热辐射法则的实验研究，提出了“完全黑体”模型。接着，德国斯特藩和波耳兹曼通过对各种温度下不同物体辐射特性的研究，发表了“完全黑体”的能量亮度 R 和其绝对温度 T 的四次方成正比的法则，即

$$R = \sigma T^4 \quad 1-1$$

式中 σ 是常数。

在此同时，还产生了一个叫做“维恩位移定律”的法则。根据这个法则，以能量亮度的频谱密度作为最大值的黑体辐射频谱的波长 $\lambda_{\text{最大}}$ 和绝对温度成反比，即

$$\lambda_{\text{最大}} = \frac{C}{T} \quad 1-2$$

式中 C 是常数。

英国的瑞利和金斯，试图把这两个法则统一起来，并提出被加热物体的能量亮度和它的绝对温度成正比，而和它的辐射光线的平方成反比。但是，他们的这种假设只有在长波长领域中才与实验相符，在短波长领域则与实验不符合。根据瑞利—金斯公式，短波长的强度将无限制的增大，出现了所谓的“紫外灾难”。

为了正确地说明热辐射法则，德国人普朗克在做了大量

的试验后于1900年提出：电磁波这种形式的能量辐射是不连续的，它是以一个一个量子的形式进行辐射。按着普朗克的假说，频率为 ν 的量子能量是：

$$E = h\nu$$

1 — 3

式中 h 是普朗克常数， $h = 6.625 \times 10^{-27}$ 尔格/秒。

由于导入了辐射分散性的概念，人们就很自然的联想到电磁波一定也近似于某些粒子，即光量子。为了强调光的粒子属性，把光量子取名为“光子”。光子的质量在运动时显示出来，静止时为零。

光量子的基本特性，是它的内部集中了能量。所谓单色光，就是由同一能量的光子组成的光。根据量子理论，辐射的频率就是光子的能量。按着波动理论可知，不同的振动波，其频率 ν 是不一样的。而量子理论告诉我们，它们之间存在着 $E = h\nu$ 的关系。这表明了光具有波动性和微粒性两重属性。这样，人们就把光的波动性和微粒性这两个矛盾的性质，辩证地统一起来了，并用以描述光的本质。利用这种理论可以令人满意地解释各种光学现象。但是，人类对光的本质的认识还不能说最后完成。

§ 1—2 光线的反射和折射现象

光的反射和折射现象，在我们日常生活中，不仅常常可以看到，而且有些反射和折射现象所构成的幻景极其美妙。如，把一根筷子倾斜插入盛水的玻璃杯中，便可看到筷子在水上和水下的部分好象折断了似的，这是由于光线由空气进入水中，经过折射以后留下的幻觉。再如，每当春夏之交或仲夏之际，当你站在海岸上，有时会突然看到海空之上，时

而浮动着一座城廓，车水马龙，行人熙攘；时而山林古庙，峰耸入云，若隐若现，可望而不可及，仿佛大海之上，九霄云外，还有一个“天上人间”。正象诗人白居易所形容的那样：“忽闻海上有仙山，山在虚无缥缈间，楼阁玲珑五云起，其中绰约多仙子。”这种奇异的景色，就是人们通常所说的海市蜃楼。这种蜃景不仅在海滨、江湖之上有，甚至在沙漠上也可以看到。沙漠地区的蜃景更有其绝妙之处：远远望去，微波涟漪，倒影绰绰，宛如一片碧蓝的湖水。海市蜃楼现象，并不是什么神蜃显圣，点化“仙山琼阁”，而是光线在一定条件下，经过大气的折射和反射作用，将遥远处景物的幻象“搬到”并展现在我们眼前。这是一个十分典型而有趣的光线的反射和折射现象。

掌握光线的反射和折射规律是十分重要的。下面我们就具体地介绍一下光线的反射和折射定律，并用光线的反射和折射定律解释海市蜃楼现象。

1. 光线的反射定律

大家知道，光线在同一种密度均匀的介质中，其传播速度是一定的，在不同均匀介质中，传播的速度是不同的。光在真空中的传播速度最大，每秒达30万公里。光在真空中的传播速度与光在空气中的传播速度相差很小，通常就把光在真空中的传播速度，视为光在空气中的传播速度。

当光射到两种不同介质的分界面上时，光线传播方向将发生改变，其中一部分仍然返回到原来的介质里，这种现象叫做光线的反射。射到分界面上的光线，叫做入射光线，经分界面返回介质里的光线，叫反射光线。

假定，让光从空气射到平面镜上，光到达分界面上的一

点O，过O点作分界面的法线ON，以SO表示入射光线，则入射光线与法线的夹角叫入射角；以OA表示反射光线，反射光线与法线的夹角叫反射角，如图1—3所示。若使入射光线沿着不同的方向射到平面镜上，实验证明：

(1) 反射光线在入射光线和通过入射点的法线所决定的平面内，并且反射光和入射光分居在法线的两侧。

(2) 反射角与入射角相等，即

$$\angle \alpha = \angle \beta \qquad 1-4$$

我们把这个定律叫做反射定律。

2. 光线的折射定律

光从一种介质射到另一种介质分界面上时，除了发生反射现象外，还有一部分光线，在分界面上改变了原来的传播方向，折入第二种介质。这种现象叫做光线的折射，如图1—4所示。其中SO为入射光线，OA为反射光线，OT为折射

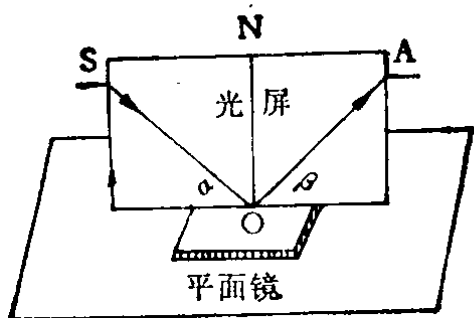


图1—3 光线的反射

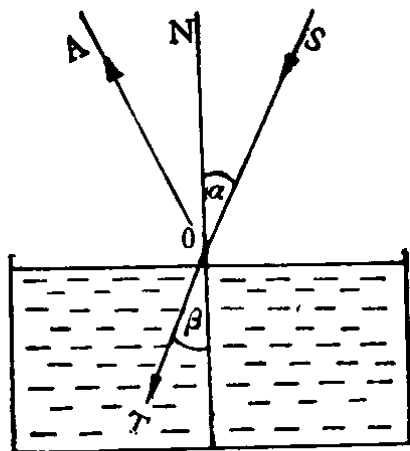


图1—4 光线的折射

光线。折射光线与法线的夹角β为折射角。当我们改变入射光线的方向时，可以发现，折射光线的方向也随着改变。光在折射时遵从折射定律即：

(1) 折射光线在入射光线和通过入射点的法线所决定的平面内，并且折射光线和入射光线分居在法线的两侧。

(2) 当入射角改变时，折射角也相应地改变，但对确定的两种介质来说，入射角的正弦和折射角的正弦之比，却是不变的。例如，当光线从空气射到水面上时，为：

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{\text{水对空气}} \quad 1-5$$

式中 $n_{\text{水对空气}}$ 是常数，叫做水相对于空气的折射率。

在一般情况下，当光线从第一种介质射入第二种介质时，1—5式可写成：

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{21} \quad 1-6$$

式1—6中常数 n_{21} 叫做第二种介质相对于第一种介质的折射率（又叫做相对折射率）。

相对折射率 n_{21} 的大小由分界面两边的介质的光学性质所决定，分界面两边的介质改变，相对折射率也就改变。它表明光通过两种介质分界面时偏折的程度。相对折射率越接近于1，偏折的程度则越小。

当光线从真空射向一种介质，在其分界面上发生折射，这时介质相对于真空的折射率，叫做绝对折射率，或简称为折射率。在很多情况下，常把空气的绝对折射率看做是1。

从光的波动理论可以得出：光线从第一种介质进入第二种介质时，第二种介质对第一种介质的折射率 n_{21} 等于光在第一种介质里的速度 v_1 与光在第二种介质里的速度 v_2 之比，即

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad 1-7$$

同理，第一种介质对第二种介质的折射率为

$$n_{12} = \frac{v_2}{v_1}$$

所以 $n_{21} = \frac{1}{n_{12}}$ 1—8

从公式 1—7 可知：介质的绝对折射率(n)，等于光在真空中的速度(C_0)，跟光在介质里的速度(v)之比，即

$$n = \frac{C_0}{v}$$
 1—9

光在某种介质里速度越大，这种介质的绝对折射率越小。由于光在空气里的速度跟它在真空里的速度相差很少，所以某种介质对空气的相对折射率，跟它的绝对折射率相差很少，可以看作是相等的。

表 1—1 列出几种物质的绝对折射率

表 1—1 几种介质的绝对折射率

金 刚 石	2.40	水 晶	1.54	空 气	1.0003
重火石玻璃	1.74	酒 精	1.36	糖	1.56
红 宝 石	1.76	乙 醚	1.35	冰	1.31
岩 盐	1.54	水	1.33		

下面，我们再来讨论一下两种介质的相对折射率跟它们的绝对折射率之间的关系。

设某一种介质的绝对折射率 $n_1 = \frac{C_0}{v_1}$ ，另一种介质的绝对折射率 $n_2 = \frac{C_0}{v_2}$ 。那么，两个介质绝对折射率之比：

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\frac{C_0}{v_1}}{\frac{C_0}{v_2}} = \frac{v_2}{v_1} = n_{12}$$

所以 $n_{12} = \frac{n_1}{n_2}$ 1—10

从 1—10 式可以看出，第一种介质相对于第二种介质的折射率，在数值上等于第一种介质同第二种介质的绝对折射率之比，故折射定律又可以写成：

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$
 1—11

3. 光线的全反射

光线的折射有一定的规律。当光线从光疏介质进入光密介质时，便向光垂直于界面的法线一边偏折（即折射角小于入射角）。相反，若使光线倾斜地从光密介质进入光疏介质时，它就向远离法线的方向偏折（即折射角大于入射角）。在后一种情况下，使入射角不断增大，当大到一定限度时，光线就不再穿过界面进入光疏介质，而又折回到光密介质中。这种现象称为光的全反射现象，如图 1—5 所示。

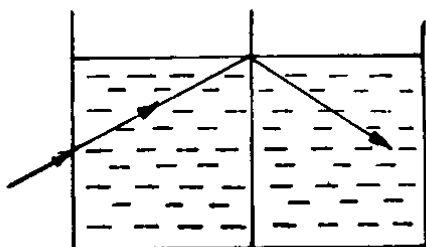


图 1—5 光的全反射

上面介绍了光的反射和折射定律，现在再用这些定律来进一步解释神奇的海市蜃楼现象。大家知道，空气本身并不是均匀的介质。一般说来，它的密度随高度的增大而减小，即越往高处，空气越稀薄。所以当光线穿过空气时，总会引起一些折射，不过这些折射现象，在我们日常生活中已经习惯了，并不觉得有什么异样。可是，当空气因为气温变化或

其它原因，在垂直或水平方向上引起空气密度的分布反常时，就会发生与通常情况不同的折射和全反射，出现海市蜃楼现象。如，夏季的白天，海水温度比气温低，特别是在有寒流或冷水团经过的地方，水温更低，由于低温海水的影响，就更进一步加剧了空气上疏下密的现象。假如我们把空气分成许多个密度不同的层次，设各层次的界面分别为 ij 、 hl 、 mn 等，那么，每个界面上方空气的密度都比它下方空气的密度小。当光线从 A 点到达 B 点，穿过界面 ij 时，由于光线是由光密介质进入光疏介质，光线将偏离法线方向，折射角大于入射角。在光线到达 C 点时，要穿过界面 hl ，仍是由密介质进入疏介质，光线要继续偏离法线，折射角仍然大于入射角。依此类推，光线层层由密介质穿入疏介质，每经过一个界面就偏折一次，随着层次的增高，偏折程度越来越大，当到达一定程度时，从某一点（设该点为 D ）起，光线就不再穿过界面 mn 进入疏介质了，而又折回到密介质中，即发生全反射。此后，光线就走着与上述情况相反的路程，由疏介质步步深入密介质，在经过界面 op 、 qr 等后，最后到达 E 点。这时，若我们在 E 点的话，就可以看到从 A 点出发，经过漫长的路途，而终于到达 E 点的光线，如图 1—6 所示。这就是说，我们在 E 点，可以看到远隔千山万水的 A 点的物体幻影。

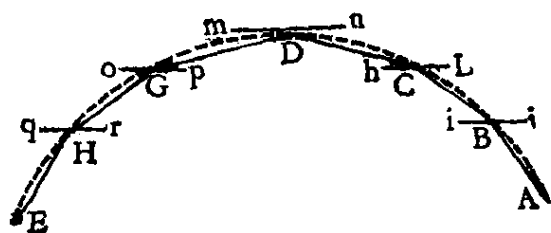


图 1—6 海市蜃楼形成示意图

当光线从 A 点到达 B 点，穿过界面 ij 时，由于光线是由光密介质进入光疏介质，光线将偏离法线方向，折射角大于入射角。在光线到达 C 点时，要穿过界面 hl ，仍是由密介质进入疏介质，光线要继续偏离法线，折射角仍然大于入射角。依此类推，光线层层由密介质穿入疏介质，每经过一个界面就偏折一次，随着层次的增高，偏折程度越来越大，当到达一定程度时，从某一点（设该点为 D ）起，光线就不再穿过界面 mn 进入疏介质了，而又折回到密介质中，即发生全反射。此后，光线就走着与上述情况相反的路程，由疏介质步步深入密介质，在经过界面 op 、 qr 等后，最后到达 E 点。这时，若我们在 E 点的话，就可以看到从 A 点出发，经过漫长的路途，而终于到达 E 点的光线，如图 1—6 所示。这就是说，我们在 E 点，可以看到远隔千山万水的 A 点的物体幻影。

§ 1—3 光的色散和干涉现象