

第二篇 光学发展简史 及光学家简介

第一章 光学发展简史

一、几何光学基础的奠定

光学的历史应该上溯至遥远的古代，几乎是从有了人类开始就有了对于光——这种自然界最普遍现象的认识。世界上有关光学知识的最早纪录是在公元前4世纪，墨翟及墨家学派在《墨经》中所系统地阐述的关于光的实验现象。《墨经》全文不过五千余字，分为178条，每条独立成文，其中专论光学的有八条。八条中涉及的几何光学知识有：影子(半影与本影)、小孔成像、平面镜成像、凹面镜成像及凸面镜成像五个部分。我国物理学家钱临照指出：“墨经字数虽少，然说的都是从观察得来的事实，毫无臆测之语。所以我们肯定地说，光是直线进行的基本性质的伟大发现，墨经上所说的要比欧几里德来得早，并且来得好。”国外学者也一致认为，传说为欧几里德所著的光学一书是世界上最古老的光学书籍，但它比《墨经》约晚百年。《墨经》中具有这样有条理的、完整的八条记载，确可称为二千多年前世界上的伟大光学著作，在科学史上占有重要地位。墨经光学不足的地方在于书中缺乏定量分析，因此由墨经八条得不出反射定律来，况且对于球面镜的焦

点与球心的概念古人还未能分辨清楚，他们也没有触及到折射现象等等。

在墨翟之后，古希腊的哲学家与数学家们也分别独自写下不少光学著作。比如关于视觉理论，当时就有几种不同说法，以毕达哥拉斯和德膜克利特为代表的一派认为，视觉是所见物体射出的一股微粒流，这股微粒流撞击人眼之后会引起观察效应，古代原子论者的这一观点亦成为后来光粒子说的思想渊源。以恩培多克勒、柏拉图和欧几里德为代表的另一派则主张一种投射学说，他们认为眼睛自身就可以发出某种须状的东西，这些触须散落至物体上，与物体形成一个相切的锥角就造成了视觉，因此，物体大小是由视角决定的。恩培多克勒甚至提出过光是以有限速度向前传播的杰出思想，当然所有这些不过是停留于思辨水平上的原始论述，没能从中引出更多的科学理论。

亚里士多德最先思考过光的折射，欧几里德也曾在自己的著作中研究过光的反射现象。大约在公元前1世纪，亚历山大里亚的希隆用类似光程最短的原则论证了反射定理，这个原则后来又被费马所发展。公元2世纪，著名的天文学家托勒密对光的折射现象进行仔细地实验研究，他在一个圆盘上装设两把可以绕着圆心转动的尺子，又将盘的一半浸入水中，转动尺子分别与入射的光线及折射的光线重合。通过实验托勒密已经得到了足够精确的入射角与折射角的角度数值，但十分遗憾，他却断言光的入射角与折射角成正比关系，这和实际情况相差得太远了，托勒密没能成为折射定律的发现者。

随着历史的变迁，古希腊的光学知识遗产首先在阿拉伯人的手中保存下来，尔后又传入欧洲大陆。生于公元10世纪中叶的阿拉伯学者阿勒哈森及其著作《光学全书》就是一个很好地例证。阿勒哈森是叙述和描绘人眼的第一位学者，他的光学知识对欧洲产生过相当大的影响，他论证过各种球面镜及抛物柱面镜的特殊光

路，著名的“阿勒哈森问题”也曾一度风行整个欧洲大陆。13世纪杰出的英国僧人罗吉尔·培根就是受到阿拉伯人著作的启发而进行一系列光学实验的。培根描述过焦点的位置，研究过球面像差，提出可利用透镜来矫正人的视力，以及采用组合透镜构成望远镜的光辉思想。此后意大利人阿玻蒂发明了眼镜；他的同胞波尔塔在书中首先讨论了凹凸透镜的组合问题。到了16世纪末，眼镜与眼镜制造业已经成为欧洲大陆上一种十分兴旺的手工工业了。

17世纪是实验物理学的开端，也是几何光学发展的转折点。在此期间，人们确立了正确的光的反射与折射定律，扩大人类眼界的光学仪器也相继出现。继荷兰工匠立帕席发明了第一架望远镜之后，也许是詹森，或许可能是丰特纳发明了第一架显微镜。当然，早期的望远镜和显微镜不过是一种令人好奇的玩具，真正将它们有效地用于科学，还应该归功于伽利略。1610年伽利略首次使用自制望远镜观察星空，他的重大天文发现全部详细记载在《星界信使》这本有名的著作之中。

开普勒对于几何光学的贡献也是举足轻重的。这位站在近代科学理论门槛上的天文学家汇集前人的光学知识及自己的实验成果写出了两部出色的光学著作。尤其是《折光学》，无论在形式上还是在内容上都堪称与现代几何光学教科书相比美。开普勒首次提出光度学基本定律，建立透镜与透镜系统作用的近似理论，还设计了多种新型式的天文望远镜。由此开普勒被称为几何光学理论的奠基人。

斯涅耳最先写出了折射定律的确切表达形式，这个定律于1637年被笛卡尔公布于世。接着，费马提出著名的最小时间原理，这一原理具有哲学意义。费马认为，自然界的行永远以路程最短为准则，从这个准则出发光将选择这样的路径传播，即在最短的时间内抵达目的地。据此原理，费马还假设光在不同媒质中传播受到的阻力大小不同，采用数学方法详细地推导出折射定律。

开普勒与费马的研究工作使几何光学达到理论成熟的高度，至此它的基础才算是完全奠定。我们注意到，几何光学从萌芽到确立，它的发展经历了二千多年的漫长岁月，在如此长久的年代里始终是一门孤立的、单凭视觉而获得的原始学科，在本质上与其它领域没有发生过任何交叉与联系。

二、光的微粒说与波动说之争

干涉、衍射和偏振对发展光的理论有决定性意义。17世纪初意大利人格里马尔迪最先观察到杆与光栅的衍射现象，玻意耳和胡克也各自独立地发现薄膜产生的色环。胡克是早期主张波动学说的学者之一，他最先指出光是一种振动，能以极大的速度越过任何距离。胡克还假设这种振动在均匀介质中产生一个圆球，圆球可以稳恒地向外扩展，事实上他的理论已经触及到了波前的概念。

尽管如此，整个18世纪中仍然是微粒说占上风，因为波动说在解释光的直进现象及微小偏离问题中遇到困难，牛顿似乎是特别主张发展光的射气学说。在牛顿天才的论著《光学》里，光被视为从光源发出来的大量的弹性球状微粒。微粒在真空及均匀媒质中作匀速运动，在两种媒质的交界面上由于媒质性质和粒子抵达界面的状态不同，粒子受到不同的引力与斥力，于是，粒子的速度和动量在沿垂直于界面的方向上要发生变化，而在平行界面的方向上维持不变。牛顿用微粒说解释光的反射与折射，推导出物质的折射率等于两种媒质内光速的比值。牛顿对光学的又一大贡献是他对颜色的解释。1666年牛顿发现了白光的色散现象，并且确定每一种纯粹的光色可由一种折射率来标志。牛顿提出，白光是由各种单色光复合而成的，单色光在性质上比白光更加简单。他的工作使人类对光色的认识摆脱了主观视觉的印象，上升到与客

观量度相联系的科学发 展轨道。

惠更斯的成就使波动说得以建立和发展。他在《论光》一书中提出：光是存在于以太中的一种扰动，扰动落到以太的新的每一点仍可看成继续向外发射子波的扰动中心。只有在诸子波的包迹面上才能发生可以察觉的作用，次级波的包络面将决定以后任意时刻的波前，这就是惠更斯原理。在光传播的问题上，他的结论恰恰与牛顿相反，认为光在透明媒质中的传播比在真空中传播的慢。在《论光》一书中惠更斯用冗长的篇幅探讨了巴塞林发现的方解石双折射现象。他假设双折射晶体中除了寻常光线的球面子波以外，还存在一种非寻常光线的椭球面子波，而且在研究双折射的同时，惠更斯还发现了光的偏振性质。惠更斯的观点在波动说中是重要的，但必须指出，他的学说并没有道出波动的周期本质。早期胡克和惠更斯的波动说，说的都是一个一个的脉冲波，并非指具有一定波长的波列。惠更斯没有看出光波动的周期特性，也没有考虑到子波可以按一定的相位关系进行叠加，因此他的理论基本上不能解释干涉、偏振等波动现象的基本特征。反之，坚持微粒说的牛顿，倒从牛顿环的研究中确认光现象是包含着某种周期性的。在解释光色与薄膜厚度的关系时，牛顿曾经提出过一个著名的猝发理论。他设想光微粒在媒质的界面处会激起以太的振动，振动时而加速，又时而减速地作用着光微粒，至使光线一阵容易透过又一阵容易反射。在光前进的过程中，这种状态每隔相等的间隔就要复发一次，这种等间隔的猝发体现了光的周期性质。类似波长的概念，牛顿还把猝发间隔与光的光色相联系，指出红光的猝发间隔最大而紫光的猝发间隔最小。我们看到，牛顿的《光学》中包含着许多关于两种学说的种种思考。不是牛顿，而是牛顿的后继者们才更加偏执和固守着早先牛顿微粒说方面的理论。

由于牛顿的权威，历史上波动学说的理论大约停滞了一个世纪之久，直至19世纪初叶一些决定性的光学发现才导致光波动说

的再次复苏。这一阶段从1800年起一直延续到1835年。光学发展的中心主要在英国和法国。向前迈出第一步的是英国医生托马斯·杨。杨氏看出来自同一光源的相干光与来自两个光源的非相干光的区别,提出干涉原理并对薄膜的色彩作出重新解释。杨提出光波与微粒流不同,相遇后不一定是加强,有时也可能减弱或者相互抵消。从此,“干涉”这一概念成为物理学中宝贵财富之一。杨氏第一个用双缝显示了白光的干涉实验,还成功地测定了光波的波长,可惜他当时发表的见解中定性表述太多了,以至没能得到科学界的普遍承认。

年轻的菲涅耳为波动光学打下牢固基础,1815年在他向法国科学院提交的关于光衍射的报告中,用子波干涉的思想补充了惠更斯原理。正如菲涅耳所证明的,这一重要原理不仅可以解释光的直进,而且还能说明光通过障碍物时发生的微小偏离。菲涅耳使用自己建立的非涅耳带作图法令人信服地计算直边、圆孔、圆屏的衍射花样。最有趣的是,当时泊淞为了反对这一理论,从菲涅耳原理中推出一个引人注目的结论。他指出,如果菲涅耳是正确的,那末按照菲涅耳原理计算,小圆屏的阴影中心应该可以出现一个亮斑,而出现亮斑显然是违反常识的。年轻的菲涅耳和他的朋友阿拉果接受了这一挑战,他们通过精细的光学实验很快找到了出现亮斑的现象。菲涅耳和阿拉果还合作研究过有关偏振光的课题,他们发现振动方向互相垂直的两条光线从来不能干涉,托马斯·杨从阿拉果那里听到了这个发现,以后才提出光波是横向振动的大胆设想。菲涅耳在短促的一生中为物理光学作出不少至关重要的发现,1821年他第一个指出色散的起因应该考虑物质的分子结构,以后这个思想被科希加以详细阐发,他还推导出光在以太参照系中的运动规律,给出入射光与折射光强度及偏振光所依从的定律,完成著名的菲涅耳公式。菲涅耳的工作为波动学说奠定了坚实的基础。

由于菲涅耳等人的工作，光是一种波动现象是可以肯定下来了。但按照当时的认识，任何波动的传播必须借助于弹性媒质。当时人们认为传播光的媒质是以太。波的传播速度 $v = \sqrt{M/\rho}$ ，式中 M 为媒质的弹性模量， ρ 为媒质的密度。由于光速极高 $v = c = 3 \times 10^8$ 米/秒，那么以太应该是一种密度极小，弹性模量极大而且是透明的媒质。具有这样离奇特性的物质太难令人想象了。这里暴露出光是一种弹性波理论的重大弱点。至此，光是一种什么形式的波动？光媒以太究竟是怎样的？这些仍是重大的疑难！

三、光的电磁理论的发展

与此同时，电磁学方面的研究几乎是平行地和光学同时发展起来。电和磁，这个两千多年以前就被早已发现了的自然现象，一直被人们认为是毫不相干的两件事。1820年丹麦物理学家奥斯特经过多年的探索，发现了电流的磁效应。法国物理学家安培、毕奥和沙伐尔等人进而总结出电流产生磁场的基本定律。从1822年开始，经过九年的艰苦努力，法拉第终于发现了磁场的变化也可以产生感应电流，揭开了自然界关于电与磁之间相互转化的奥秘。他还天才地提出电和磁是通过电场和磁场来发生作用的，并且用他所创造的力线概念给与电场和磁场一个符合客观实际的直观定性描述。众所周知，青年物理学家麦克斯韦被法拉第场的这一物理思想所深深吸引了，他决心为法拉第的工作提供一个完善的数学表述。麦克斯韦花费了十多年的功夫，撰写出三篇论文和一部《论电与磁》的专著，独自一人完成宏大高深的电磁场理论的建树。

麦克斯韦电磁场理论引入了涡旋电场和位移电流两个基本概念，深化了法拉第电磁感应定律和安培环路定律，并概括了电场和磁场中的高斯定理。他把电磁现象上升为场的关系，即变化的

磁场产生变化的电场和变化的电场产生变化的磁场，其完整的数学方程式是麦克斯韦方程组。据此，麦克斯韦预言了电磁波的存在，计算出电磁波的传播速度并在数值上与光速的实验值相同。他同时明确指出：光波是电磁波而且是横波。1875年洛仑兹亦证明，已被实验证实的菲涅耳公式完全可以用电磁场理论代替原来菲涅耳所依据的光的弹性波动理论。

麦克斯韦的思想太不平常了，它只能逐渐地被物理学家们所接受，光的电磁波理论为争取承认斗争了30年，直到1888年德国物理学家用实验证实了电磁波之后，才结束了一切怀疑。这说明，在19世纪受机械自然观支持的旧理论的力量是何等顽强！今天人们已经认识到，热辐射、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线、 γ 射线都是电磁波，只不过是它们的波长不同而已。麦克斯韦电磁场理论的建立是经典物理大厦的最后一层楼阁，它使这个大厦具备了极为完美壮观的整体结构，电磁场理论揭示了热、电、光、磁的统一性，是物理学史上的又一次伟大综合。现在科学史家认为，电磁场理论是19世纪伟大发现之一，它和恩格斯提出的19世纪三大发现及1869年门捷列夫发现的化学元素周期律并列为19世纪的五大发现。

麦克斯韦在他的理论中并未使用任何详细的以太模型就成功地建立了电磁学的数学模型。若只考虑理论的内容，他完全可以废弃以太这个概念。然而在他逝世以前的文章中仍然坚持“以太海洋”充满整个宇宙的说法。这是因为麦克斯韦当时对自然界的认识只能走那么远，当时无法想象波可以是没有媒质的波。以太的问题还有待于爱因斯坦的狭义相对论的出现，才获得解决。

光速是物理学中最基本的物理常数之一，它的数值测定及其特性的研究，从古至今成为物理学家们瞩目的课题。1607年伽里略做了世界上第一个测量光速的实验，虽没有得到肯定的结果，但其测量方法一直被后人采用。1676年罗默总结多次观察木星蚀的

周期性延迟和超前现象，认为原因在于光速的有限性，他利用当时的天文数据测得光速 $c = 214300$ 千米/秒，1725年英国天文学家布莱德雷利用光行差法测得光速 $c = 295000 \pm 5000$ 千米/秒，这些天文测量扭转了人们对光速无限性的习惯看法。到了1849年菲佐最早在地面上用旋转齿轮连续遮断光信号，测得 $c = 315300 \pm 500$ 千米/秒，至此，光速有限性的论断才被公认。1850年傅科用转动镜面法使光源的象产生位移，测得的光速值与菲佐法相近。1862年傅科又使用旋转镜法，测定了光在不同媒质中的传播速度，为波动理论提供了有力的证据。1926年迈克尔逊经过半个世纪的努力，根据1600次的实验结果，得到 $c = 299796 \pm 4$ 千米/秒，为当时公认的光速最精确的数据结果。

四、量子光学的建立

麦克斯韦光的电磁理论可以解释有关光的波动本性以及光传播的物理现象，然而它还不能说明光的发射与吸收过程。事实上，除非对物质结构的了解已经深入到它可能解决电磁特性的程度，否则光和物质间的相互作用，特别是决定辐射、发射和吸收的过程就不可能被了解。19世纪末，震惊世界的三大发现撼动了经典物理大厦的基础，也深深影响到人类对光的本性的认识。洛仑兹的电子理论尽管可以解释色散、发光以及物质对光吸收中的一些现象，但对于黑体辐射中能量按波长分布的这一类重大问题仍然是一筹莫展。1887年赫兹发现了光电效应，金属板上逃逸电子的动能只与光照频率有关的事实更使经典光学陷入了重重困境。但是，电磁波理论已经扩大了人类的眼界，在长期的科学实验中人们逐步形成了电磁波谱的概念，科学家们意识到，可见光只是电磁波谱中的一个狭小范围，必须开拓一个电磁波与电子、原子结构相关联的新的研究领域。

德国物理学家普朗克，在这个问题上首先敲开近代物理的大门。在解决黑体辐射分布的问题中，他提出一个与经典概念全然相反的新观点。1900年12月14日，普朗克在德国物理学年会上宣读的论文《正常光谱中能量分布定律的理论》中指出，包围辐射空腔壁的谐振子给予电磁场的能量是不连续的，这种不连续可看成一份一份的量子发射，其大小等于一个最小能量 $h\nu$ 的整数倍。普朗克的能量子理论标志着近代物理的诞生，为了纪念他，人们把 h 称为普朗克常数，这是一个至关重要的物理常数。

爱因斯坦在研究光电效应时发展了能量子假说，为量子理论的研究作出重大贡献。他认为不仅光在发射和吸收时是一份一份的，而且光的传播也应该是一份一份地进行。爱因斯坦的光量子假说可从1905年《关于光的产生与转化的一个启发性观点》的论文中看出：“在我看来，如果假定光的能量不连续的分布于空间的话，那么更容易理解对黑体辐射、光致发光、紫外线产生阴极射线以及其它一组与光的产生或转化有关的现象所做的各种观测”，“密度小的单色辐射，从其在热现象方面的行为看来，它像是由一些独立的量值为 $\frac{R\beta}{N}\nu$ （因子 $\frac{R\beta}{N}$ 即为 h ）的能量子所组成的”。

爱因斯坦揭示了光在传播过程中辐射场本身也是量子化的实质，指出光是能量为 $h\nu$ 的光量子流。在光电效应中光电子是被一个光量子从物质中打出来的。这样，不仅圆满地解释了光电效应的现象，也使人们对光本性的认识和探索深入了一步。

认识到光量子的能量是 $h\nu$ ，已经意味着光子的诞生，“光子”是后来1926年由路易斯所命名的），但在1905年爱因斯坦的光量子理论中，光量子还仅仅是一团集中的能量。至1917年后爱因斯坦又仔细研究了物质和辐射的平衡，要求光量子除了具有能量之外还应具有动量 $h\nu/c$ 。例如在《关于辐射的量子理论》一文中，爱因斯坦提到：“如果有一辐射束作用于一个它所碰到的分子……那

么总有冲量 $h\nu/c$ 能传递给分子”，这说明对光的粒子性的认识又前进了一步。直到1923年，康普顿在解释 x 光散射实验中运用光子与自由电子碰撞的理论，使具有确定 $h\nu$ 能量和确定 $h\nu/c$ 动量的光子概念得以重新验证并开始被普遍接受。

光的波粒二象性概念也是爱因斯坦提出来的。1909年爱因斯坦认为辐射场的能量及动量具有涨落现象，并注意到对这一问题的理论解释似乎意味着波与粒子共存。

今天，近代光子理论中有构成光子动量和能量的两个基本方程

$$\begin{cases} E = h\nu \\ P = h\nu/c \end{cases}$$

显而易见，方程左边是表明粒子特征的动量与能量，方程右边是显示波动特征的频率与波长。表面上看粒子性似乎与牛顿时代的微粒说有相同之处，其实光子并非是一般的实物粒子。光子的静止质量是零，能量是 $h\nu$ ，频率不同的光子其动量和能量也绝不相同。光子在真空中的速度永远为 c ，但它们的运动状态又服从大量光子运动分布的统计规律，表现出波动性。这两个光子理论的基本公式用普朗克常数把等式两侧联系起来，恰恰反映了光子波粒二重性的深刻本质。

玻尔也是早期光量子理论的奠基人之一。他最先提出微观体系中存在一系列不连续的能级定态，这与传统力学中连续的能量状态是截然不同的。他还表述了原子从一种能态改变到另一种能态时，吸收或放出一个光子 $h\nu$ 能量的电子跃迁过程。玻尔的成就使他成为揭示光谱线与原子结构内在联系的先驱。

微观世界的波粒二象性首先在光的本性研究中被确认下来，这种情况也启迪着人们去追问微观的实物粒子是否也有波动性？1924年法国的德布罗意创立物质的波动学说，指出波粒二象性是微观粒子的普遍属性，他的假设后来被电子、中子和原子的衍射

实验所证实。1925年薛定谔建立了描述微观粒子运动规律的波动方程。从此，只要解出表示电子运动状态的波函数，就可能得到量子力学系统中任何力学量所取数值统计分布的实验结果。用量子力学的方法去探索光与物质结构间的关系，已成为近代光学的基础课题之一。

光子、电子和原子虽然都是微观粒子，但本质是不相同的。由于光子特定的质量与速度，非相对论的量子力学还不能对光子的物理现象作出完善的描述，研究光子必须考虑相对论的理论不可。光原来被认为是电磁波，它在空间的运动状态是用麦克斯韦方程表达的，由于麦氏电磁场理论符合狭义相对论的要求，为反映光的量子性还必须将电磁场的理论量子化。量子化的电磁场其状态随时间的变化，也可用一种波函数和方程来表达。狄拉克、乔丹和威格纳从电磁场量子化建立的量子电动力学，就是一门较好地解释近代高能物理中一系列实验现象的学说。早在1926年，狄拉克就曾用量子力学的微扰法研究发光机制，他成功的说明了受激辐射与吸收现象，建立了电磁辐射的半经典理论。半年之后，狄拉克又取得了新的进展，完成了辐射场的量子化，建立了电磁辐射的量子理论，从而对光的波动性与粒子性两种表面上相互矛盾的性质作出了统一解释。正如狄拉克所说，光的波动图像与粒子图像是完全协调的。这主要表现在具有波动图像的电磁场经量子化后就出现了不连续的结构，辐射场与无穷个能量不连续的谐振子等价，而光子则是辐射场的量子。这样辐射场量子化后，粒子图像可以从波动图像中显示出来，从而将光的波粒二象性协调统一。狄拉克的工作标志了人类对光本性认识的进一步深化以及新的飞跃。

关于对光的本性的认识，爱因斯坦在1951年曾这样讲过：“整整50年有意识的思考还没有使我更接近‘光量子是什么’的答案。”直至今日，人类对光本质的认识还远远没有终结，近代高能物理

实验中 γ 光子在强电场下分裂为正负电子的现象无疑表示了光子与实物粒子之间的奥妙关系；随着激光技术和理论的发展，人们对光子的统计规律又有新的认识；自捕获光效应的发现，似乎在此理论基础上通过对光二象性的探讨可以解释光子能量与光波频率成正比的原由，但是光子能否可分？有没有静止质量？有无内部结构？以及如何对光子的内部结构进行探索？等等，仍然属于尚未解决的问题。我们相信，随着科学技术与理论的进展，人们对光的本性一定还会有更多的认识与发现。

五、激光由来与激光器的问世

以激光科学为主体的现代光学是在光量子理论的基础上发展起来的。它的兴起无疑使人类对光的认识和利用又走向一个新的里程碑。历史上最早涉及物质参与相干光的产生与传播是经典电动力学中的负吸收概念，直到爱因斯坦才指出这一过程的明显特征。爱因斯坦在《关于辐射的量子理论》一文中进一步研究了发光的微观物理机制。他从原子具有分立能级的观点出发，提出光与物质相互作用的过程有三种，即除了吸收过程和自发发射过程外，还必须存在受激辐射过程的假设。爱因斯坦认为，在热平衡时吸收与辐射平衡应包括受激辐射在内，这样才能解释普朗克黑体辐射能量密度分布定律。如果平衡过程只包括吸收过程和自发发射过程，而不包括受激辐射过程，则与普朗克定律矛盾而导致维恩定律。所谓受激辐射，是指处于高能级的粒子在频率适当的辐射光子作用之下，跃迁至低能级并同时发射出一个与入射光子全同的辐射光子，受激辐射产生的新光子在能量、传播方向及位相上与原光子状态完全一致。根据爱因斯坦理论，人们可以进一步推想，如果体系中有许多原子都处于某种激发态，而某一原子通过自发辐射放出的光子能够促使激发态的其它原子产生受激辐射的

话,则这一过程将以连锁反应的方式在很短的瞬间完成。如此我们能得到大量的处于同一状态的光子辐射,因而产生一个单色性极好的高强度光束,这就是受激辐射的基本原理。几十年后,爱因斯坦的受激辐射概念成为蓬勃发展的激光技术的理论基础。

微波波谱学和量子电子学促进了激光器的诞生,它们为激光的发展提供了充分的理论准备。这里,不再追述19世纪初关于红外辐射、紫外射线以及太阳光谱暗线的发现历史,光谱与光谱学规律早已成为原子物理中研究物质结构的必要实验基础。有关微波与微波振荡放大的研究是从本世纪20年代开始的,1928年拉登伯格和考夫曼首次观测到由于受激辐射而引起的负色散现象,1934年克里通与威廉斯用1~4厘米的各种微波与氮分子相互作用,发现在1.25厘米处有强烈的吸收。第二次世界大战结束后,雷达和无线电的通讯事业把微波技术带回科学领域,继海森堡和泡利发展了量子电动力学的理论之后,布洛赫又把用于原子束的磁共振方法推广至固体和液体。1947年拉姆在实验中发现的 H 原子 $2^2S_{1/2}$ 和 $2^2P_{1/2}$ 态能级的微小差异是一个重要的发现,它说明氢原子激发态的精细结构并非像狄拉克预示的那样简单;在适当条件的氢放电管中,如果输入对应两态能级跃迁的大约一千兆赫频率的弱微波信号,可以得到两态之间的反转分布,拉姆甚至定量求出每厘米可得到大约0.01%的极小相干增益。

两年之后卡斯特勒的实验表明,有可能将正常的热平衡分布颠倒过来,使得某些高能级比低能级实际上保持了更多的粒子,实现粒子数反转。珀塞尔和庞德也找到了实现粒子数反转的方法,1951年他们在用氟化锂作核感应实验时,有意识地突然改变磁场方向,结果在由原子核自旋所构成的反转系统中首次观测到感生的净发射。

激光器的前身是微波激射器,它的研制在激光发展史中占有重要的地位。50年代初期不同国籍、不同学科的科学 家 与 工 程

师各自从自己的研究方向出发，探索解决这一问题的理论与方法。其中最早研究微波激射器并取得成绩的是美国汤斯和他的小组，汤斯从1951年起就开始从事分子束的研究工作，一个偶然的场合使汤斯闪现出用二能级分子制造微波激射器的思想，他预料到如果在微波系统中加装一个共振腔，为原子共振的放大波提供反馈，就有可能产生受激发射。经过二年的艰苦努力，汤斯及其合作者们终于制成了世界上的第一台氨分子微波激射器（简称MASER）。激射器的工作波长为1.25厘米，输出功率只有 10^{-3} 瓦。汤斯的成功震动了整个物理界，之后利用新方法实现粒子数反转的各种微波激射器相继问世。巴索夫、普罗霍洛夫以及布隆伯根分别提出三能级固体微波激射器的原理，不出一年贝尔实验室成功地实现布隆伯根型工作装置的运转，这一进展又大大扩充了激射器的使用范围。

1956—1957年间，微波专家们开始把工作目标转向红外和光频，狄克最先设计了一台高强度氨微波激射器同时草拟使该装置能在红外区工作的修正计划。他的红外激射器中，使用了一个带有多层介质膜反射板的法布里—珀罗腔。汤斯也意识到在可见光和近红外区的范围内可能比远红外区容易振荡，他与肖洛密切合作，最先公布了在光频段工作的激射器的理论分析与设计方案。他们建议使用光学共振腔的装置，把适当的激光材料放入两个高反射的平行平面镜之中，然后使原子在适当能级上发生反转分布，当达到一定的阈值时，在受激振荡模中将产生相干光辐射。几乎是同时，苏联的巴索夫，美国的恰范等人也先后提出过激光器的设计方案，涉及到的工作物质有气体、液体、固体和半导体，激发方式有光激励和电激励，等等。

一场力争最先制成并运转第一台激光器的竞赛开始了，当时世界上许多优秀的光学实验室都参与了这场竞赛，结果美国休斯研究所的梅曼取得了胜利。梅曼的成功并不是偶然的，在激光器的

研制过程中，梅曼掌握了正确的方法。尽管当时有不少科学家从理论上分析并指出红宝石不会是一种适合的激光物质，但梅曼仍然仔细地研究了各种掺铬含量的红宝石的荧光强度与弛豫时间，从而他推测含0.05%铬离子的红色宝石有可能是最恰当的激光材料。为证实这一点他采用试试看的实验方法，首先用水银灯去照射红宝石，发现激光原子的荧光量子效率高达70%以上，接着他又用氙闪光灯的强光去激发一块一厘米见方、两面镀银的红宝石，观测其荧光谱线宽度以及荧光寿命的变化，并确认这是由于受激辐射作用的影响。为此他增强信心并继续实验，终于在逐步提高脉冲氙灯的发光强度下获得了新的原子辐射光。1960年7月美国纽约时报第一个公布了红宝石激光器试制成功的消息，其后梅曼又在《自然》杂志上发表一篇短文，正式报导了这项成果。梅曼成功的消息公布于众后，贝尔实验室立即重复了这一实验，确认它是由于受激辐射而产生的激光作用。一个月后，不论是贝尔实验室还是休斯实验室都采用圆柱形红宝石棒代替立方体红宝石，得到方向性与相干性很好的红色激光。

同年秋天肖洛利用铈和钐掺杂的氟化钙晶体制成了四能级激光器。1960年底，美国光学家恰范和他的小组也制成了第一台氮-氛气体激光器。恰范小组的实验说明气体激光器成功的关键在于腔内两块高精度平行反射镜放置的位置。为了调整两镜的中心线与激光管中心一致，恰范小组几乎花费了一个月的时间，最后他们终于得到了波长为 $1.15\mu\text{m}$ 的连续激光振荡。气体激光器不论在单色性还是方向性上都远远超过了固体激光器的脉冲输出。恰范小组还制成了第二台同类型的激光器，他们使两台仪器的输出重合并观察两束激光的拍频。显而易见，除了相干性极好的激光光源外，任何两个独立的光源是不可能产生此种效果的。

六、现代光学的发展

新型的激光光源带来现代光学的创新与应用。自60年代以来,科技领域对发展各种类型的激光器提出许多新的课题,随着对激光材料的普查,众多性能良好的新式激光光源不断涌现。1961年钕玻璃激光器首先由斯尼泽研制成功,这是一种可用于激光核聚变的大功率脉冲器件。1962年输出在可见光范围(633nm)氦-氖激光器的振荡也引起人们普遍的关注。1963—1967年间氩离子激光器、钇铝石榴石激光器、二氧化碳激光器、化学激光器及动态气体激光器等大能量器件相继制造出来,它们在输出频率、输出功率和放电方式上都有新的进展。半导体作为激光物质的一种,多年来一直受到人们的重视并进行了多种实验,但只有到了70年代初,当同质结、单异质结和双异质结型半导体激光器依次问世后,这种常温下可连续运转的砷化镓激光器才将此项研究推向一个新的阶段。近年来由于光纤通信走上实用化的最新技术阶段,输出波长约 $0.85\mu\text{m}$ 的双异质结半导体激光器作为最理想的光源广泛用于多模光纤通讯系统。1966年索罗金和朗开德发表可调谐染料激光器的详细结构,1970年左右各种波长可调激光器迅速发展起来,使用数种染料能够保证激光在整个可见光区域实现放大与振荡,这种高增益的窄带调频染料激光器在激光光谱学、非线性光学、光通信等多个领域中占有重要地位。1970年苏联的巴索夫还研制成功第一台准分子激光器。目前这种新型激光器(如氟化氙,氟化氮,氟化氩激光器)已发展至很高的水平,其输出波长在紫外区与真空紫外波段调谐,可以高重复率地工作,而且一个脉冲能够激发出100焦耳以上的能量。继准分子激光器运转之后,美国的约翰·多迪又研制成功第一台自由电子激光器(1977年),这种以韧致辐射和康普顿散射为工作原理的新型激光器具有

频率高、幅度可调节、高功率及高效率等优点，除最常见的应用周期静磁场的结构外，最近几年还提出一些新的结构类型的自由电子激光器。总之目前已成型的激光器是五花八门，激光的工作物质包罗固体、液体、气体、等离子体甚至自由电子；输出的波长范围自亚毫米波一直到真空紫外甚至x光；从工作机理上看有束缚态与束缚态、束缚态与自由态、自由态与自由态之间的跃迁。激光源的工作方式和输出功率也是多种多样，激光器的研制正朝着新波段、短脉冲以及更高功率的方向迅速发展着。

现代光学的主要发展与激光的出现和应用是密不可分的。从研究内容来说它可以分为两大部分——激光与信息以及激光与物质的相互作用。前者指激光用于传输、处理或传感信息；后者则是激光与物质相互作用，造成暂时或永久性的变化。涉及激光与信息的应用很广，光纤通信、光信息处理和光盘存贮都是近年来光学中最激动人心的进展领域。特别是光纤通信，已成为光波技术应用于国民经济的明显实例。由于它具有传递信息容量大、价廉和抗干扰、保密性强等许多特点，目前已进入大量推广和广泛应用的阶段。回顾光纤通信的历史，早在19世纪中叶，英国的丁匹尔就曾指出，光线在弯曲管道中由于全反射可以传输。1930年，德国的拉姆将弯曲的光导纤维集成束，开创了传输光学图像的先声。1953年荷兰的范·希尔又用低折射率的固体介质包在高折射率的玻璃纤维之外，这样既保护了纤维芯的表面又造成光的全反射条件。后来，科特尼—普拉特提出用熔合方法制成纤维面板，希斯肖威兹开创棒管法的拉制工艺，多种可应用的光纤及光学纤维束才相继制成。但由于早期光导纤维的能耗太大，传输距离只有数米，对光通讯并没有多大的实际意义。1966年英籍华裔科学家高昆从理论上指出，如果消除光导纤维中的有害杂质，该传光能力就能大幅度提高并有可能用于激光通信。1970年美康宁玻璃公司首次研制成功低损耗的石英光导纤维，为光纤通讯揭开了序

幕。1974年法国的米歇尔·普兰又发现一种奇特的氟化玻璃，用它制成的光导纤维比普通的石英光纤衰减率要低1、2个数量级，大大加速了光纤通信的研究步伐。到了1977年，美国贝尔实验室首先完成了光纤通讯的现场实验，从此光纤通讯才步入推广与实用阶段。随着光纤通信的发展，集成光学(ⅠO)也应运而生，1970年贝尔实验室成功地制造出第一块包含激光器、波导和探测器的微型集成光学器件，现阶段正朝着整片集成光学器件的研制方向努力。今天以 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 短波长光源和石英多模光纤组成的第一代光纤通信系统业已成熟，在世界各地电话的中继线路及中短距离信息传输上广泛使用；第二代光纤通信系统(以 $1.3\sim 1.55\mu\text{m}$ 长波长光源和单模光纤为代表)也发展得十分完善，它可用于中等距离的通信系统并即将在长途干线上使用。据统计，世界各国敷设的光纤线路1982年总长达到170 000km，1983年总长达到270 000km。

光信息处理和全息术的发展也是惊人的。1948年丹尼斯·加伯首次提出波前再现的全息照相原理，过了13年，美国的利思和乌帕特尼克斯才利用激光拍摄了第一张实用的离轴全息照片。之后前苏联科学家又将全息术与李普曼的体记录法相结合，使白光读出的彩色全息技术取得明显的进展。70年代以来全息术走出实验室，在照相显示、干涉测量、显微术和信息存贮与处理等实际应用中大显身手。高级光学空间滤波系统的出现，使光信息处理也获得了新生。人们把数学计算和通讯理论跟光学结合起来，形成所谓“傅里叶光学”，由于傅里叶变换可以同时实现二维图像的平面运算，因而具有速度快和内存储信息量大等一系列优点。现代的光信息处理已成功地应用于综合孔径雷达技术、现代象质评价和图像特征识别之中，利用空间光调制器就能进行实时图像处理，这在处理由卫星摄得的过量信息时是非常必要的技术。声光学和集成光学已用于实时射频频谱分析仪中，相干光学计算机与电子

数字计算机的联合开拓了一个全新的技术领域。

用于声频和视频记录的高精度数据存贮光盘也是激光应用的一大成果。所谓光学存储是采用聚焦的激光束对信息进行写入和读出技术。这一方面，录像光盘、数字声频光盘和可录/可擦光盘已经商品化。70年代录像光盘与数字声频光盘进入市场，美国、日本等许多国家开始光盘的生产与实际应用。一个直径为12cm的光盘，单面可以容纳550多兆字节的数字数据及3 000幅静止图像，其存贮密度比磁盘要高100倍以上，光盘的文档存储潜力也很大，20万页的文字资料只须存贮在几张廉价且精密的激光盘中。由于光盘具备微缩胶卷、磁录像带不可比拟的优点，故发展前景是十分乐观的。

光与物质相互作用的研究，是现代光学的又一重要组成部分，这一方面也取得显著的成就。在超强光作用下物质离化成为等离子体，激光引发核聚变就是等离子体光学研究的重点项目之一。1961年，巴索夫最早提出激光加热获得高温等离子体的可能性，并随着调Q脉冲激光器的研制开始探索激光引发核聚变这一课题。1968年，前苏联巴索夫小组首先报导了从氟化锂平面型靶上获得中子；1972年，美国劳伦兹国家实验室公开发表了高密度聚爆理论；从此，激光核聚变的研究在许多国家迅速开展起来。进入80年代，大型多路钕玻璃倍频激光系统的研制已取得很大进展，在实验室中模拟热核爆炸以及利用惯性约束的途径开辟受激热核的能源，成为激光核聚变研究的宗旨。

今天，激光用于医疗手术已取得满意的效果，强激光用在国防武器上，以及工业材料的处理、加工技术上也十分普遍。近年来激光化学的研究又导致新型激光工艺的发展，利用激光改变材料的表面性能或达到关键材料的从优熔合都为工业的发展提供了极大的竞争能力。

研究光学媒质在强光作用下表现的非线性光学效应叫做强光

光学或称非线性光学。自激光出现后,这一方面的理论与应用都有很大进展。80年代前后人们陆续发现了一批强光物质的新效应:如超荧光现象、光学双稳现象以及光波在原子分子体系中选择性的激发等等。由于强激光产生的非线性光学效应,激光光谱学、包括激光拉曼光谱学、高分辨率光谱和皮秒(10^{-12} 秒)超短脉冲已使得传统光谱学发生了革命性的变化。激光分离同位素成为非线性光学中的一项重要应用,它具有分离系数高、成本低和能耗小的优点,在军事和经济上具有特别的意义。此外,强光光学中超短脉冲的研究也是当前国际上的瞩目课题。自从1960年锁模激光器研制成功后,锁模技术成为产生超短光脉冲的主要方法,它使激光脉冲输出达到皮秒和亚皮秒的数量级。近年来这一研究又有新的进展,利用对撞锁模技术可产生 10^{-14} 秒量级的超短光脉冲,进一步采用脉冲压缩技术获得了短至6飞秒(10^{-15} 秒)的光脉冲。超短光脉冲的获得是人们研究物质微观结构和运动规律的重要手段,这项研究开辟了时域的前沿,不仅仅在光谱学与电子学方面有广泛的用途,而且也表明,人类对光本性的认识又深入了一步。

综上所述,在过去的几十年中光学经历了一场深刻的革命而且方兴未艾。由于激光的出现与发展,现代光学与现代电子学,凝聚态物理,分子生物学和化学相结合产生了一系列全新的领域,结下了丰硕成果,已给科学技术和社会生产带来广阔的影响。现代光学技术的潜力是巨大的,它既能延伸到上亿光年的宇宙空间,又可深入到微观世界,前途发展不可估量。仅就光学的本身能力而言尚包含着极为丰富的内容有待开发。如利用光的短波长取得大的信息容量以及光传递与信息处理的二维特性等还远未达到人们预期的水平。随着科学的进步,人类将进入崭新的光子时代。