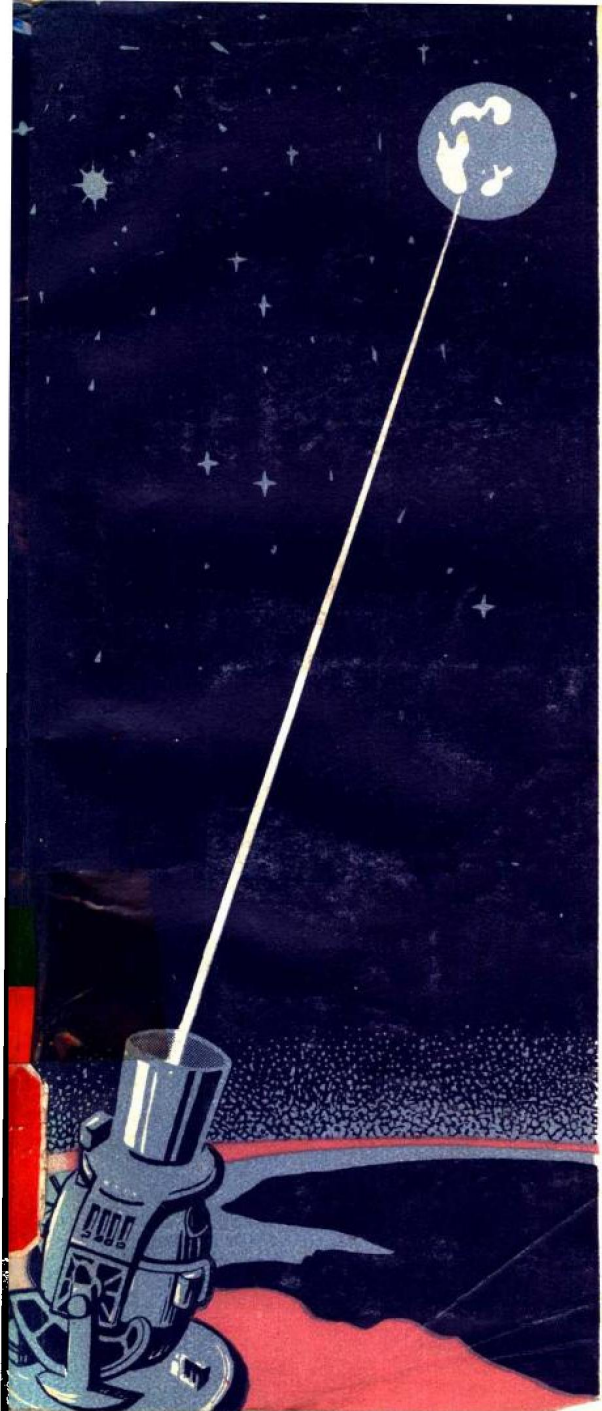


谈谈激光科学技术

王之江 王能鹤 编
上海科学技术出版社



现代科学技术讲座

谈谈激光科学技术

王之江 王能鹤 编

上海科学技术出版社

出版说明

为了帮助广大读者初步了解现代科学技术一些重要部门的基本面貌,我们请有关同志分头编写了这组《现代科学技术讲座》,扼要介绍现代农业科学技术、能源科学技术、材料科学技术、电子计算机科学技术、激光科学技术、空间科学技术、高能物理和遗传工程的概况及其在四个现代化中的重要意义,供广大干部和各条战线上的同志们参考。

错误和不足之处,欢迎广大读者批评指正。

现代科学技术讲座

谈谈激光科学技术

王之江 王能鹤 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 浙江嘉兴印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 2.125 字数 46,000

1979年7月第1版 1979年7月第1次印刷

印数:1—150,000

书号: 13119·752 定价: 0.18元

目 录

一、激光器的诞生.....	3
二、激光的用途.....	15
三、激光器家族.....	41
四、新学科的生长点.....	58

谈谈激光科学技术

激光科学技术是在近代量子物理学的基础上发展起来的一个新兴的科学技术领域。

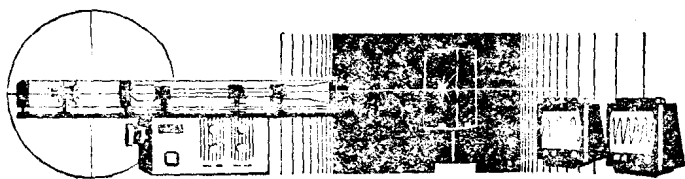
激光器在六十年代出现之后，各行各业几乎都对激光提出了要求(合理的或不合理的)：从“死光”到裁纸剪布，从找准一条直线到激光导航，从光通讯到全息照相。西方一部分人还把激光引发核聚变作为解决能源的一个途径。在一些工业发达国家中，激光器的生产已经形成成为一种新的工业(见附表一)。

激光科学技术是一门高度综合性的科学技术。如果说初期的工作还比较多的利用光学技术，主要由光学和电子学专业的人来完成，那末近十年，激光就十分明显的成为一门综合性科学技术了。除了光学和光谱学的理论和技术之外，化学、气体动力学、核物理、等离子体物理、高能物理等多种学科和各种现代化技术都用于激光研究，制造出了一大批新型激光器，大幅度地提高了激光器的效率和功率。激光器的发展和应用反过来又促进了物理学、化学、生物学和其他许多学科的发展，产生了多门分支学科。

本世纪中，虽然在科学技术上有许多发明创造，但是，象激光那样，几年之内其影响能波及到社会的广泛领域的，是屈指可数的。

激光科学技术已经被列为我国科学技术发展的八项重点之一。在这本小册子中，我们给读者介绍如下几个问题：什

么是激光，它有什么用途，常用的激光器有哪几种，激光科学技术与其他学科的关系如何等等。在第一章中，提到了一些在激光技术中经常要用到的量子物理的概念和名词。对这些概念有一个大致的了解是很有帮助的，但并不是一定要都对它们都理解之后才能读后面的内容。



一、激光器的诞生

激光器是一九六〇年诞生的一种新颖的光源。说到光源，我们一口气可以报出太阳、蜡烛、白炽电灯、日光灯、“小太阳”（碘钨灯）和其他许多天然的或人造的光源。可是，光的本质是什么呢？电灯通电之后怎么会发光的呢？对于这类早已见惯的事物和现象，说出个“所以然”来倒未必是件容易的事。因为，问题的答案多少要涉及到一些量子物理的概念。

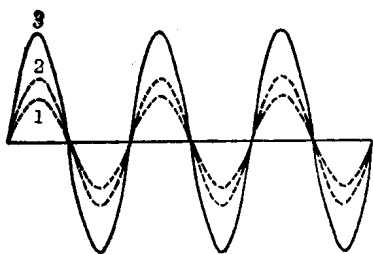
激光器正是在量子物理的基础上诞生的。

光 是 什 么

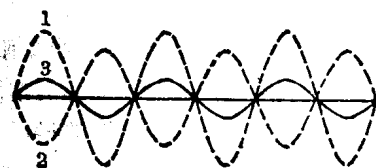
人类对于光的认识经历了一个十分曲折的过程。三百年前，物理学家牛顿认为，光是由一个一个弹性小球组成的。同时代的一位科学家惠更斯不同意牛顿的观点，他说光象声音一样是一种波动过程。两种观点各有各的根据，相持不下。由于牛顿在科学上的巨大威望，光的微粒说在当时占了上风。

差不多过了一个世纪以后，1815年，杨氏完成了光的干涉实验，否定了光的微粒说，确立了光的波动说。

干涉现象是波动的普遍属性。任何一类波动，如果有两个波迭加在一起，波峰与波峰重合，波谷与波谷重合，这两个



甲



乙

图 1 波 1 与波 2 相互干涉, 出现波 3

波就会相长, 合成的波比任何一个单独的波都强 (见图 1 甲)。如果一个波的波峰落在另一个波的波谷中, 两个波就会相消 (见图 1 乙)。两个水波的相长或相消表现为波浪的变高或变低; 两个声波的相长或相消表现为声响的增强或减弱。杨氏的实验发现, 一束单色光通过两个靠得很近的小孔, 会在后面的屏上出现明暗相间的条纹花样。这种现象只能用光波的干涉才能很好解释。后来, 麦克斯韦总结

分析了当时电磁学的研究成果, 最后得出结论, 光波同无线电波、微波、X 射线以至 γ 射线一样, 都是电磁波。它们的区别只在于波长的不同 (见图 2)。无线电波的波长一般以米作单位, 例如上海人民广播电台 (990 千周) 发射的电磁波波长约为 300 米。光的波长比无线电波短许多, 常用微米 (一百万分之一米) 或“埃” ($\text{\AA}$, 一百亿分之一米) 为单位。人的肉眼能感觉到的只是波长大约在 4000 埃到 7000 埃之间的一小部分电磁波。

从牛顿到麦克斯韦, 人类对于光的认识完成了一次飞跃。光作为一种波动已确定无疑了。

可是, 人的认识并没有到此为止。光的电磁波理论虽然

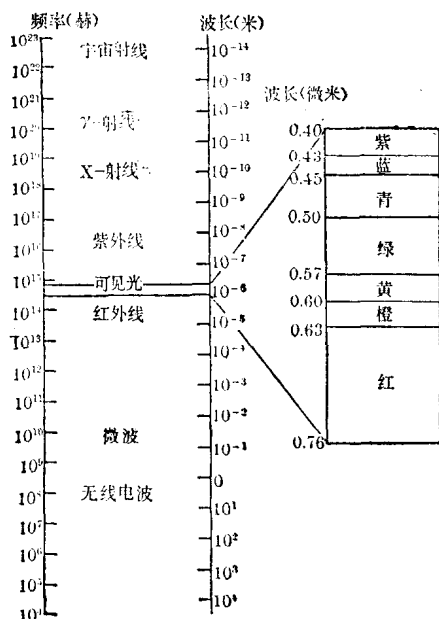


图 2 电磁波谱图

能够很好地解释光在传播过程中的反射、折射、干涉、衍射等现象,但在研究光与物质的相互作用时,便出现了光的电磁波说无法解释的情况,光电效应便是其中最突出的事例。

图 3 中有一个光电管①。在没有光照到阴极上的时候,电路中没有电流通过,电流计 A 不偏转。当阴极受到光照时,电流计立刻偏转,表示电路

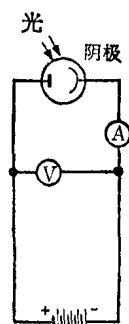


图 3 光电效应示意图

① 最初做光电实验时,还没有光电管这种元件,但是意思是一样的。

中有电流通过。这种现象显然是由于光照射到阴极上时，阴极有电子放出，飞向阳极而形成电流。这种现象就称为光电效应，所形成的电流称光电流，产生的电子称光电子。

按照光的电磁波理论，光电子的动能应取决于照射光的强度，不论什么频率的光，只要有足够的强度，都能产生光电子。然而实验事实却表明：光电子的动能与光强无关，而与光的频率成正比；当照射光的频率小于某一个值时，不论光的强度多大，照射时间多长，都不产生光电子。

1905年，爱因斯坦根据光电效应的事实，提出了“光子”^①的假说。爱因斯坦认为，光能是聚集成一份一份互不连续的形式在空间传播的，每一份光能称作一个光量子。这样，每一个光量子就相当于一个微粒，光就是以每秒30万公里速度运动的光量子流。但是光子说一方面承认光是由光量子这种微粒组成，另一方面，也没有否认光是电磁波。光量子这种微粒与牛顿的“弹性小球”不同，它既是粒子，同时又是波，具有频率、相位等波动的性质。每一个频率为 ν 的光量子具有的能量 $E=h\nu$ （其中 h 为普朗克常数）。物质在与光量子相互作用时，要么全部吸收 $h\nu$ ，要么全部不吸收。因此，在光电效应中，一个光子只能打出一个光电子。光电子的能量取决于光子的能量，而光子的能量则是由它的频率决定的。光的频率越高，光电子的能量自然就越大，而光强的大小（即光子的多少），只能决定光电子的数量。如果光的频率过低，一个光子的能量不足以将一个电子拉出金属表面，那么，光子再多，也不能打出光电子来。这样，爱因斯坦利用光子假说成功地解释了光电效应的规律。

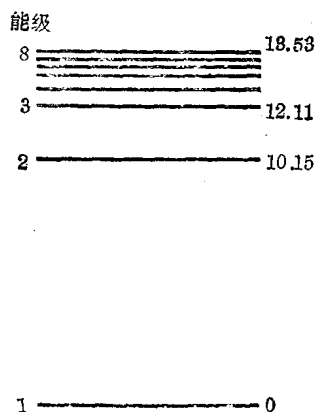
^① “光子”的名称是在1926年才提出的，但爱因斯坦在1905年的文章中已经用“光子”的概念解释了光电效应。

现在,大多数人已经接受了光子说。而且认识到,一切微观粒子都同光子一样,具有波粒二像性。这是人类对光的认识的第二个飞跃。自然,人类对于光的本性的认识今后还将继续深化。

激光是什么

光是一种物质形态,它具有波粒二象性。那么,激光又是什么呢?要答复这个问题,就得深入到原子内部去看一看。

大家知道,原子由原子核和电子构成,电子围绕着原子核不停地运动着。按照量子物理的理论,电子的这种运动不能随意变化,而是具有一定的轨道。这些轨道代表了电子的不同运动状态,它们相互分立,各有特定的能量,一个电子必定沿着这些轨道之一运动。我们把电子具有最小能量的运动状态叫作基态,其余统称激发态。如果我们用水平线的高低来表示电子各个运动轨道的能量大小,就得到一张阶梯式的图,其中各个轨道对应的能量叫能级。图4是氢原子的能级图,图中能级1表示基态,其余都是激发态。右边的数字表示各激发态与基态之间的能量差。



当原子从较高的能级跳到较低的能级,或者说原子中的电子从能量较大的运动轨道跳跃到能量较低的运动轨道时,多余的能量以光的

图4 氢原子能级图

形式放出，这就是原子发光了。所发光的频率取决于两个能级的能量之差。

原子是怎么从较高的能级跳跃到下面能级的呢？1917年，爱因斯坦提出，原子可以通过自发辐射或受激辐射这两种不同的方式从高能级跃迁到低能级发光。

地面上任何东西都有从高处向低处落的自发倾向。在微观世界里，也有类似的倾向。如果一个原子处在激发状态^①，即使没有任何外界的影响，过了一段时间之后，它自己会跃迁

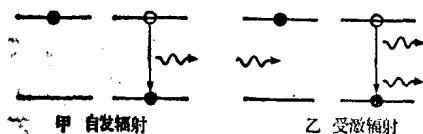


图 5 自发辐射和受激辐射

到较低的能级，同时发出一个光子。这种发光的过程叫做自发辐射（见图 5 甲）。普通光源的发光主要就是自发辐射。

不受任何外界影响，原子在某个激发态上的平均停留时间叫做该激发态的寿命。各种原子的各个能级寿命差别很大，寿命短的不到万分之一秒，寿命长的可达几天，甚至几年。

除了自发辐射之外，处在激发态的原子可以在别的原子的撞击之下，或者其他某种作用之下跃迁下来。例如光照就可以引起原子跃迁，光照感生的跃迁对于激光器来说是特别重要的。如果有一个光子打到一个处于激发态的原子上（见图 5 乙），它的能量又正好等于上下两个能级的能量差值，这个光子就会把原子从上能级拉到下能级，强迫原子发光。原子的这种发光方式叫做受激辐射。

受激辐射与自发辐射产生的光不一样。自发辐射的各个

^① 原子处在激发状态和原子中的电子处在激发状态是一个意思。

发光原子彼此无关，发光时间参差不齐，辐射出光子的运动方向、相位、偏振度等都是互不联系的。这种光不呈干涉现象，称作不相干光。受激辐射时，受激原子辐射的光子同入射光子是一模一样的，无论从波长、相位、偏振度、运动方向等哪一种参数看，都无法把它们区别开来。这种光称作相干光。激光就是受激辐射产生的相干光。

激光产生的条件

处于高能级的原子能够辐射光子，跃迁到低能级。那么，反过来，低能级的原子能不能通过某种途径向上跃迁到高能级呢？回答同样是肯定的。

如果一个光子打到一个处于下能级的原子上，那末，这个光子将被原子吃掉，原子获得了光子的能量之后，就会向上跃迁到上能级。这个过程有时称作受激吸收（见图6）。除了光照之外，原子之间的碰撞、通电、化学反应等都可能使原子向上跃迁。

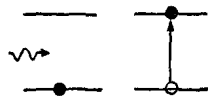


图6 受激吸收

上面我们经常着眼在一个原子上，事实上，一个实际的光源总是包含着大量的发光原子，譬如电灯钨丝中有大量的钨原子，每一种原子都有自己特定的能级结构。通电之后，输入的电能很快转化为钨丝的热能，钨原子纷纷从低能级往上跳。但是，由于各个原子得到的能量不一致，所以总是有的跳得高，有的跳得低。某一个原子跳到哪个能级，这完全是偶然的。但是，从整体来看，原子在各个能级上的数量分配却是有规律的。理论分析表明，在通常条件下，原子在各个能级上的分布呈金字塔形，处于较低能级的原子总

是多于较高能级。

原子世界是在不断地运动和变化的。一个光子打到一个原子上,可以因受激辐射感生出另一个光子,也可能造成受激吸收,被原子吃掉,究竟如何,这决定于原子原先是处在高能级,还是处在低能级。一个光子射到一群原子中间去,如果多数原子处在低能级,这个光子被吃了的可能性就很大,受激辐射的比例是很小的。

电灯、日光灯以及一切传统的光源,它们的发光原子多数都处在低能级,因此,它们都是依靠自发辐射发光。

要想得到大量的受激辐射光,就必须造成一种非常的状态,在这种状态下,物质中处于高能级的原子数超过低能级。物质的这种状态叫做“粒子数反转”,也叫聚居数反转。

处于粒子数反转状态的物体好比是一个倒立着的啤酒瓶,处于一种不稳定的平衡状态。稍一晃动,就会倒下。在这类物体中,只要有一个高能级的原子自发辐射,发出一个光子,这个光子就会引发附近另一个相同能级的原子受激辐射,发出的光子又会引发其他原子的辐射,如此继续,很快就激发出大量光子。因为受激辐射对光子的这种增殖作用,所以粒子数反转的物质是很好的光放大器(见图7)。

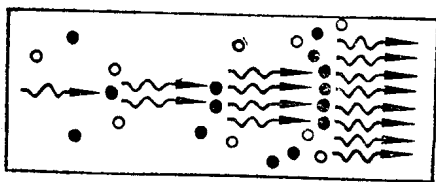


图7 受激辐射引起的光放大

实现粒子数反转要有两个条件:一是要选择好工作物质,

在它的能级结构中,应该有一个寿命较长的高能级,能够积累起大量的原子;二是要求强有力的激励手段,例加强光照,把原子很快地送上高能级。这类激励手段有时就叫“泵”,用光照的叫光泵,用化学能的叫化学泵,用核能的叫核泵,它们都能象水泵抽水一样,将原子很快地提升到高能级。

激光器的诞生

从粒子数反转到激光器,中间仅仅只有一步之差了。可是这一步却足足走了二十年。

1940年前后,人们在实验过程中已经观察到粒子数反转和激发态原子的受激辐射对入射信号的放大作用。但是,当时并没有人立即去研究利用受激辐射光。阻碍人们前进的不是技术上的困难,而是缺乏创造性的思想,更为重要的是社会生产没有迫切的需求。

第二次世界大战之后,无线电通信的发达和雷达的应用促进了无线电技术的迅速发展。人们对电磁波的研究从中短波扩展到微波波段。50年代初期,由于汤斯、巴索夫和普罗霍罗夫的创造性思想,发明了微波激射器(又叫微波量子放大器)。在研制微波激射器的基础上,1958年,汤斯和萧洛把微波激射器的原理扩大到光谱段,提出了激光器的第一个理论方案,1960年,第一台激光器诞生了。

按照汤斯和萧洛的思想,激光器的结构可用图8来表示。激光器的中心是一块工作物质,旁边是光泵(譬如氙灯),工作物质的两端装有两块相互平行的反射镜,构成一个光频共振腔。

什么叫共振腔呢?举个例子,收音机的喇叭箱是一个声

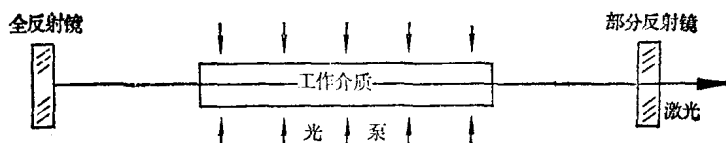


图 8 激光器示意图

学共振腔。它对不同频率的声波有不同的响应，可以起到改善音质的效用。激光共振腔可以类比于光波的“喇叭箱”。但它与声喇叭箱形式不同，除了端面有两块反射镜以外，侧面是敞开的，常称为“开式谐振腔”。由于这个特点，激光共振腔不仅对不同的光波频率有不同的响应，而且对光波的不同传播方向也有不同的响应。

第一台激光器是以红宝石为工作物质，以强光为激励源的。

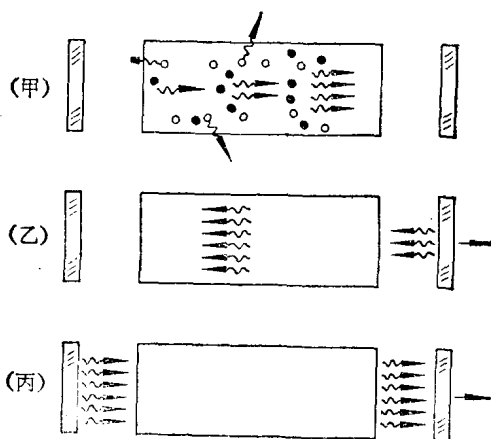


图 9 激光共振腔的反馈作用

电路接通之后, 氙灯发出强闪光照射红宝石, 使红宝石中的铬离子大量地从基态激发到高能态, 造成粒子数反转。一些高能态的铬离子自发跃迁到低能态, 向各个方向辐射出光子。向侧面发射的光很快就离开了工作物质, 唯有沿轴线方向的光, 因受激辐射而增殖放大(见图 9 甲)。轴向的光遇到反射镜后, 一部分透过镜子(这就是输出的激光), 大部分被反射回工作物质, 继续增殖放大。这和电子线路中的正反馈是相当的(见图 9 乙)。在另一端, 镜子常制作成全反射, 几乎所有的光都被反射回工作物质中(见图 9 丙)。经过多次来回反射, 高能级的原子都受激辐射出光子, 跃迁回低能级。工作物质中因粒子数反转积累起来的能量就变成了强度极高的激光沿轴方向输出。

激光共振腔实质上又是一台光学干涉仪。按照干涉理论, 光在干涉仪内只能以驻波的方式存在(见图 10 甲), 这些光波波长的整数倍必须等于干涉仪长度的两倍。如果没有激光共振腔, 工作物质发出的光按频率的分布是连续的(见图 10 乙)。共振腔的作用是等间隔地选择频率, 使输出激光按频率的分布变为不连续的梳齿形(见图 10 丙)。共振腔的这种作用称作选频。

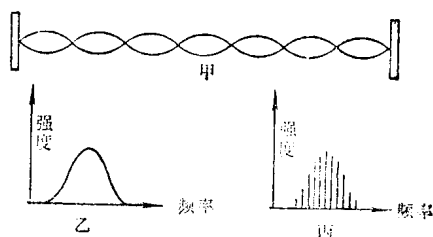


图 10 激光共振腔的选频作用