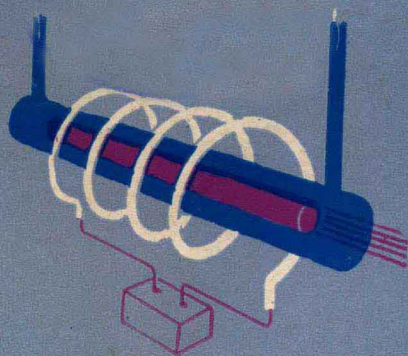


中学生课外读物



激光

王殖东 著



人民教育出版社

中学生课外读物

现代科学技术丛书

激光

王殖东 著

人民教育出版社

这是一本介绍现代科学技术中的宠儿——激光的中级读物。它从原子结构、电子运动出发介绍了能级概念，借助图象和插图通俗地阐述了激光原理，深入浅出地介绍了激光的特性。在此基础上，介绍了固体激光器、气体激光器、液体激光器、化学激光器、半导体激光器等典型激光器，并从十多个应用领域介绍了我国近年来的成就与世界上的一些新成果。

本书可供对激光、激光技术有兴趣的高中学生和具有中等文化程度的科技人员阅读，也可供中学教师 and 大学生参考。

中学生课外读物
现代科学技术丛书

激 光
王殖东 著

*

人民教育出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
北京顺义永利印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 3.375 字数 70,000
1989年8月第1版 1989年8月第1次印刷

印数 1—1,041

ISBN 7-107-10390-3
G·1484 定价 1.15 元

目 录

一、引言	1
二、激光原理	7
(一) 用能级描述原子的状态	7
(二) 氢原子的能级	10
(三) 氢原子发光与光谱	14
(四) 原子数目按能级的分布	16
(五) 自发辐射和受激辐射	18
(六) 光的吸收和增益	29
(七) 粒子数反转与激活媒质	30
(八) 谐振腔	35
(九) 阈值条件	39
三、激光的特性	41
(一) 方向性好	41
(二) 亮度高	42
(三) 单色性好	43
(四) 相干性优越	50
四、激光器的种类	54
(一) 固体激光器	55
(二) 气体激光器	60
(三) 液体激光器	69
(四) 化学激光器	73
(五) 半导体激光器	75
(六) X射线激光器	75
五、激光的应用	80

(一) 激光在机械加工方面的应用	80
(二) 激光在电子工业方面的应用	84
(三) 激光在精密测量方面的应用	85
(四) 激光测距与激光雷达	87
(五) 激光探测大气及污染	89
(六) 激光在医学方面的应用	91
(七) 激光在军事方面的应用	96
(八) 全息术与光信息处理	97
(九) 激光仪器及其应用	100
(十) 激光在化学上的应用	102
(十一) 激光在通信方面的应用	103

一、引言

激光器是二十世纪科学技术创造的一个奇迹，它使人们终于有能力驾驭杂乱无章地运动的大量分子和原子的发光过程，并获得了从红外直至 X 光波段的相干电磁辐射。

激光的出现，使古老的光学焕发了青春，它的出现深化了人们对光的认识，并扩展了光为人类服务的范围。

激光这门尖端科学从其问世到现在，仅有二十余年的历史。虽然时间短，但发展很快，无论在国防军事、工业生产、农业研究、医疗卫生、新技术开发等方面都有了重要应用，并且还在不断地出现新的应用，喜人的成果时有所传。为什么它的应用会这样日益广泛呢？这是激光本身所具备的几个得天独厚的特性决定的。这是些什么特性以致这样惹人喜爱呢？开门见山地说，这些特性就是亮度高、方向性好和单色性好，以后我们再来解释这些特性。

古代人日出而作，日没而息，现代工人日夜三班倒，这种局面是由什么因素决定的呢？那就是光源。古人只有天然光源——太阳，因而形成了日出而作、日没而息的习惯。太阳看起来很亮，其实它的亮度并不大，在每平方厘米的地面上得到的太阳光的功率只有 0.14 瓦，从这个角度看，应该说太阳的亮度太小了。晴天用放大镜会聚太阳光，在透镜焦点处可点燃纸、木片和棉布等易燃物体。传说古人在战争中曾利用大

量的反光镜会聚阳光来消灭敌方。曾流传有这样的故事，说阿基米德曾用巨大的反光镜会聚太阳光把停泊在港口的敌舰付之一炬。托尔斯泰幻想小说中的工程师设计了一种凹面镜把光会聚成极细的、不发散的光束，轻而易举地把几千米外的铁甲舰切穿了。二十世纪六十年代美国五角大楼曾想搞出“死光”的武器，是这类思想的延续。但是要把光作为破坏性武器，需要有两个决定因素：一个是光源的亮度，另一个是聚光系统的会聚能力。前面说过，太阳光的功率太低，跟光武器的要求相差太远，于是促使人们向第二条出路上下功夫，所以类似于十九世纪的“永动机热”那样，设计出了“平行光线”、“聚光圆锥腔”等种种方案，尽管喧嚷的前景十分诱人，实际上都是违反科学规律的空想。从原理上讲，光束的亮度不能通过光学系统来提高。因此立足于光学系统的改进来实现光武器的一些作法，不过是历史上的一场误会而已。唯一的出路在于探索提高光源本身亮度的途径。

根据物理学家的研究，普通光源发射的光，能量不是集中在很窄的频率（颜色）范围内，而是分散在很宽的频率范围内，即“颜色不纯”。拿它跟稳定地振荡在单一频率的无线电波振荡器相比，差异就异常鲜明了。因此早在十八世纪科学家们设想用光通信的愿望，被无线电波通讯首先实现了。然而无线电波段的通信容量受到限制，所以令人响往的还是想向光波波段发展。那么，这要满足什么条件呢？研究表明，必须要求光源在单位空间体积、单位立体角和单位波长间隔内有足够数量的光子。值得注意的是，不仅要求在单位空间体积内，同时还要求在单位波长间隔内。从爱因斯坦的光电效应

知道,光子的动量 $p = h\nu/c$ (h 是普朗克恒量, c 是光速, ν 是光波的频率)。光波波长 λ 和频率 ν 之间的关系为 $\lambda = c/\nu$ 。经过运算,单位空间体积、单位立体角以及单位波长间隔内的光子数目,可以想象是由三个空间坐标和三个动量坐标构成的六维空间(又叫相空间)中的单位体积内的光子数目,换成专用名词,叫作六维空间中光子的密度,也叫光子简并度(什么是简并度,在图 1 的说明中有解释)。普通热光源的光子简并度 δ 可以用下式表示①:

$$\delta = \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

此处的 T 为光源的绝对温度, k 是玻尔兹曼恒量, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦/开。由此可见,要光源的光子简并度高,必须提高光源的温度 T , 但即使温度达到太阳表面的温度 ($T \sim 6000$ K), 在可见光的范围内,光子简并度也只不过为 10^{-3} 量级。所以普通光源的光子简并度实在太低,因此迫切需要研究发光机理,以便另谋出路,于是激光器应运而生。

激光器的发光状况与普通光源不同,它定向发射,即它的全部光功率集中在一个很小的立体角内发射出去,不像普通光源那样向四面八方发射。这样就有可能在发射方向上获得巨大的功率密度。比如说,要是能够把朝 180° 范围内发射的光功率集中到 0.18° 范围内,那么光源在光发射方向上单位立体角内每秒钟通过的光子数就提高了百万倍。另外,激光器

① 式中的分母是指数函数。为书写方便, e^* 通常写作 $\exp$ 。所以, $\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1$ 即 $e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1$ 。

发光的颜色非常纯,例如一台频率高度稳定的氦氖激光器,它发射的 632.8 纳米(纳米的符号是 nm, 1 纳米 = 10^{-9} 米)的激光,其谱线宽度小于 10^{-17} 米,比 Kr86 灯发射的 605.7 纳米的红光谱线宽度还窄万倍。激光具有如此独特的性质,就使得它的光子简并度异常高。举例说,比较容易得到的一台单模输出 0.1 焦耳的激光器,它的光子简并度就高达 10^{17} ,比太阳的光子简并度高 10^{20} 倍哩!

由于激光器的光子简并度比普通光源高千百万倍,因此,很多普通光源办不到的事,激光器能办到。1985 年美国“发现”号航天飞机在太空中进行了激光反导弹技术的试验,取得了初步的进展。

在常规的光谱分析中,探测的灵敏度为 10^7 个原子/厘米³;而在激光光谱里灵敏度竟可达到 10^{-2} —1 个原子/厘米³。在常规光谱分析中,光谱分辨率为 10^7 ①;而在激光光谱里,光谱分辨率竟达 10^{14} ,分辨率提高了一千万倍。把非线性光学光谱术用于表面物理的研究可以灵敏地检测单层吸附分子。

近年来用全息光学元件做太阳能聚集器。全息太阳能聚集器的主要优点是不需要转动机构就能自动跟踪太阳光,它能在原地收集从上午到下午约 100° 角范围内的太阳光线,聚集度为 4:1。美国飞机上已开始装备帮助驾驶员工作的全息光学元件,这种元件能将机内有关设备如仪器的面板,仪表指针等根据需要显示在飞行员的正前方。这样,飞行员不用扭

① 光谱分辨率是用 $\lambda/\Delta\lambda$ 的比值表示的,式中的 λ 是刚刚能分辨的两条相邻光谱线的平均波长, $\Delta\lambda$ 是这两条光谱线的波长差。比值 $\lambda/\Delta\lambda$ 越大,表示它的分辨率越大。

头就能随时了解机内各种设备的运行状况。计算机全息图还能用来会聚光束,用计算机全息元件聚焦半导体激光器的光束,可以读取“激光视盘”的信息。

据报道,美国科学家用氢离子激光照射老鼠的肾和前列腺的正常细胞和癌细胞,发现癌细胞在激光照射下的发光方式跟正常细胞有明显区别,所以他们预言,也许能通过向人体内插入一小束光导纤维,用激光照射来发现癌细胞。

1985年5月由我国经委主持召开的国家级鉴定会上正式通过了计算机-激光汉字编辑排版系统,该系统高倍率字模信息压缩和高速还原等多项核心技术具有我国特色,达到世界先进水平。其功能有:自动成行,自动实现标点符号的行末行首的禁排处理;自动成页、自动编排页码、安放书眉;实现下加着重点(线)、中外文混排、各行左右对齐等多种格式的排版;能处理各种有线或无线的表格;排方框图和简单公式;分栏或对照书刊。该系统可在终端机上印出小样,供校对文章使用;排版后由大样输出机在普通纸上输出大样,供校对、检查排版结果;排版完成后由激光照排机输出底片,供制版印刷。这些新手段为提高印刷行业的社会效益作出了很大贡献。

以上寥寥数端,只是激光的特性及其应用的几个侧面。那么,到底什么是激光?激光为什么有这些优越的特点?怎样才能获得激光?有哪些种类的激光器?激光有哪些应用?激光的前景怎样?我们下面将逐步介绍。考虑到受过中等教育的同学,今后可能处于不同的岗位,兴趣不同,愿望也不同,本书的内容并不希望每个人都通读到底,遇到一时不甚理解的

地方,或过细的地方,可以不必深究,甚至可以跳过去,继续读其他部分的内容,这并不会影响对全貌的了解;而愿意更多地了解激光的同学,又可以从中学到更多的激光原理。这就是写本书的出发点。

本书共分五章。第一章介绍激光的概况,第二章介绍激光的原理,第三章介绍激光的器件,第四章介绍激光的应用,第五章介绍激光的展望。本书力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材,也可供从事激光工作的工程技术人员参考。



二、激光原理

由于我们生活在宏观世界里，我们的感官得到的印象都是宏观现象的形象，因而对微观现象感到陌生，甚至难以想象。虽然在中学里学了一些原子物理的知识，也只是有些初步认识而已。要了解激光原理，还需要对微观现象的规律有进一步的认识，微观现象有些什么特殊的呢？首先，对微观粒子不像对宏观物体那样，可以用位置与速度来描述它的运动状态，而是用能量来描述。为了使我们的思想与语言适应研究微观现象的需要，让我们举一个身边事物的例子，用能量来表示它的状态，然后再介绍微观粒子(分子、原子)的能量状态及其表示方法。

(一) 用能级描述桌子的状态

任何物体处于一定的状态都具有一定的能量，这是熟知的现象。例如，日常生活用的方桌，正常放置时有一定势能，搬家时为了装载方便，也可能倒置着放，显然它的能量(势能)就不同了。可见，物体的结构一定时，在环境不变的情况下，(例如都处在地面上)，那么能量这个物理量就可以反映它的不同状态。为了讲清概念，我们可以多考虑几种稳定的放法(尽管日常生活中并不这样使用)，如下图所示，显然，可以找到六种稳定的放法。以其重心位置的高低表示它具有的不同

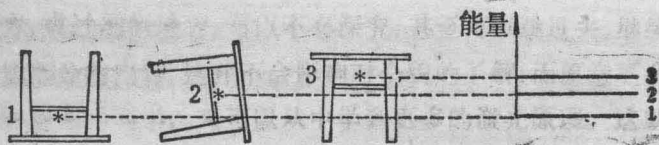


图1 方桌不同状态的能量不同

能量，绘在图的右侧。一共有三种能量值。这里纵坐标表示能量，不同的能量值用一水平线表示。这些能量状态叫做它的能级。桌子在地面上倒放时，能量最低，这种状态叫做它的基态；桌子在地面上侧放时（这种放法可有四种），重心就向上移了，所以桌子的势能就大了，如图中的第二条水平线所示，这个较高能级叫做它的第一激发态；桌子正放时，重心最高，这时桌子具有更高的能量，如图中第三条线所示，叫做它的第二激发态。在这个例子中，方桌有六种可能的稳定放法，但只有三个能级，因为其中有四种可能的放法都对应着同一能量值，即图中的第一激发态，就说这个能级是四重简并的，或者说其简并度为4，也可以说成这个能级的统计权重为4。

为什么第一激发态能级发生简并呢？为什么是四重简并呢？原来发生简并的原因来源于对称性，因为上述的桌子是方桌，侧放的四种方式所具有的能量是相同的。如果把方桌换成长方书桌，其对称性减小了，那么侧放时便出现两种能量值，各对应着两种摆放法，如图2所示。这就是说侧放对应着

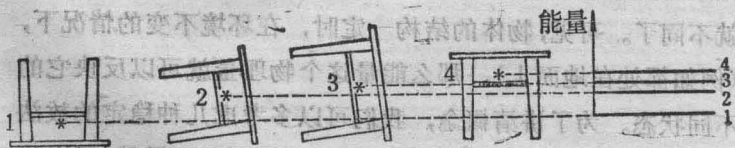


图2 长方桌不同状态的能量

能级 2 与 3, 每个能级的简并度为 2。所以, 对称性降低以后, 简并度也变小了。换句话说, 能级 2 与 3 的统计权重全都为 2, 这说明由于对称性变低, 原来的四重简并能级 2 分裂为两个二重简并能级 2 和 3。假如人们使用的长方书桌为了使坐人一侧的桌面耐磨损, 在这侧长边钉上了一条薄铁皮, 则对应于能级 2 的两种侧摆法, 其能量也略有不同了, 即能级 2 也分裂成两个能级 2_a 及 2_b 了, 如图 3 所示。总之, 采用了外加手段, 使对称性降低, 可使能级简并度变小。



我们以上所讲的是针对桌子的稳定放法而说的, 实际上桌子也还有着一些不稳定的平衡状态, 各自对应着一些不稳定能级, 或者说这些能级的寿命短, 不像前述的六种稳定放法对应着无限长的寿命。举例说: 用离得近的两条桌腿为支点把桌子侧歪着放, 用离得远的两条桌腿为支点把桌子侧歪着放, 或者用一条桌腿为支点把桌子立起来, 都可得到一种不稳定平衡, 其能级高低不同, 但都比前面的能级高。它们分别受环境影响, 只能维持一个短暂的平衡时间, 因此说这些状态是短寿命状态。由于不稳定, 所以等不及测量, 这时如果用电影胶片给桌子拍照, 然后按照片进行测量, 由于电影机对摆动的桌子拍照的时间不同, 测出的能量值略有不同, 即能量处于一定宽度范围 ΔE 内。这个 ΔE 叫做能级宽度, 如图 4 所示。由此可见, 短寿命状态的能级是加宽的。长寿命状态的能级宽



图4 寿命短的能级，能级加宽

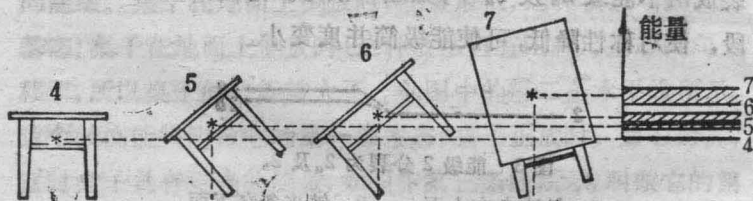


图5 各种能级宽度的比较示意图

度是窄的。基态是稳定的，其能级将窄成一条线。我们形象地利用示意图把稳定与不稳定状态的能级宽度加以比较，绘在图5中供参考。

在有了上述可供想象的形象后，我们再转而用这种语言来描述不能直观看到的原子的行为，就会感到比较容易理解了。下面让我们看看最简单的原子——氢原子吧。

(二) 氢原子的能级

玻尔在卢瑟福研究的基础上，认为氢原子和类氢原子是由质量为 m 、带有负电荷 e 的单个电子与质量为 M 、带有电荷正 Ze 的原子核所组成(Z 为原子序数)，电子围绕着原子核做圆周运动，如图6所示。对氢原子来说， $Z=1$ 。电子与原子

核之间存在着静电引力,即库仑力,此库仑力 $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ ①提供电子绕核转动的向心力,按牛顿第二定律 $f=ma$,这里的 a 为向心加速度 v^2/r ,因此

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

式中 r 为电子与原子核间的距离,即原子半径, v 为电子绕核运动的线速率:

$$v = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m r}} \quad (2)$$

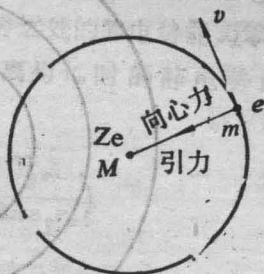


图6 氢原子模型

电子做圆周运动的动量 mv 跟轨道半径 r 的乘积叫做它的轨道角动量,用 L 表示,即

$$L = r \cdot (mv) \quad (3)$$

玻尔提出了一个电子轨道可能存在的条件,叫做轨道角动量子化条件。这个条件是:只有电子绕核做圆周运动的轨道角动量为

$$L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad (4)$$

的状态才是稳定态(即定态)。式中 n 是不为零的正整数,即 $n=1, 2, 3, \dots$ n 称为主量子数, h 为普朗克恒量, $h=6.626 \times 10^{-34}$ 焦·秒。

玻尔提出的轨道角动量子化条件意味着电子的轨道不

① 这里用 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 表示静电力恒量 k ,其中 ϵ_0 叫做真空介电常数, $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ 库 2 /牛·米 2 。

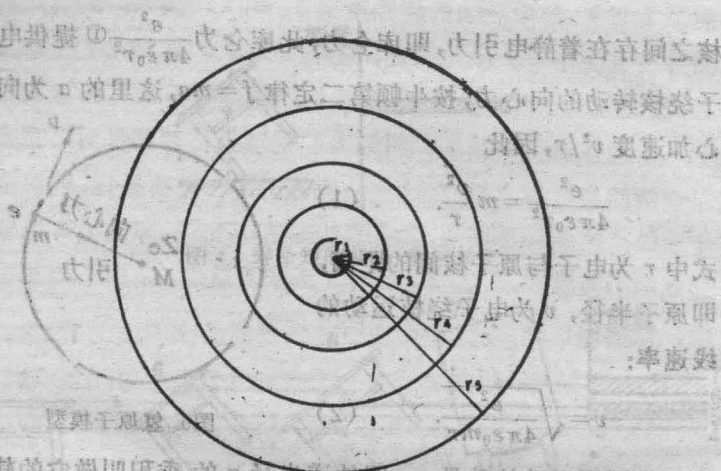


图7 玻尔氢原子轨道

是任意的,只能取一些不连续的圆周轨道,如图7所示。由(1)式及(3)式解得第 n 条轨道半径

$$r_n = n^2 \left(\frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \right) \quad (5)$$

上式说明,电子轨道半径 r_n 跟量子数 n 的平方成正比。代入(2)式可得电子的轨道线速率为

$$v_n = \frac{2\pi e^2}{4\pi \epsilon_0 n h} \quad (6)$$

取 $n=1$ 得

$$r_1 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} = 5.29 \times 10^{-11} \text{ 米}.$$

这是氢原子中电子绕核旋转的最小轨道半径,叫做玻尔半径。这个数据跟利用其他方法测得的氢原子半径的值是吻合的。

下面我们进一步求出原子处在这些定态上的能量。当氢