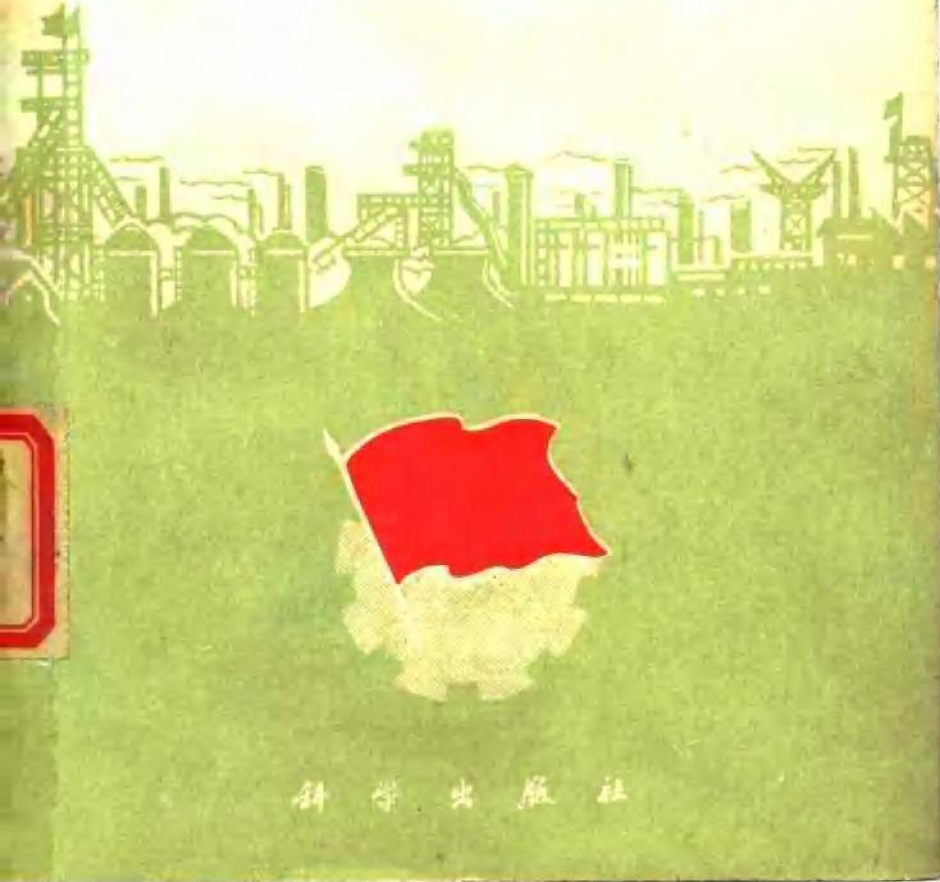


新技术简介丛书

# 激光器



科学出版社

新技术简介丛书

# 激 光 器

《激光器简介》编写小组

科 学 出 版 社

# 激 光 器

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1971 年 12 月第一版 1971 年 12 月第一次印刷

定 价： 0.20 元

# 目 录

一、激光器的基本原理·····	( 1 )
1. 什么是激光器? ·····	( 1 )
2. 关于光的本性的一些说明·····	( 3 )
3. 原子结构浅说·····	(10)
4. 光和原子之间的作用·····	(14)
5. 谐振腔·····	(18)
6. 激光器的由来·····	(21)
二、激光器的种类·····	(23)
1. 气体激光器·····	(26)
2. 固体激光器·····	(37)
3. 半导体激光器·····	(42)
4. 染料激光器·····	(46)
5. Q 开关激光器·····	(50)
6. 超短脉冲激光器·····	(53)
三、激光器的应用·····	(57)
1. 光电子学·····	(58)
2. 激光器在工业上的用处·····	(63)
3. 全息术·····	(66)
4. 非线性光学·····	(71)

## 一、激光器的基本原理

### 1. 什么是激光器？

在我们日常的生产中，可以用到各种各样的灯。所有这些灯的共同性质是能够发射出光来。从光学的意义来讲，凡是能够发光的物体都叫做光源。在光学中，光这一名词的含义比我们寻常所了解的要广，它不仅包括着人的眼睛能直接看到的可见光，而且也包括着人的眼睛不能直接看到的紫外线与红外线。激光器也是一种光源，它能发射出紫外线、可见光或红外线来。

但是激光器却与寻常的光源大不相同，它的性质是很奇特的。激光器发出来的光具有很高的方向性，它是沿着一定的方向来发光的，寻常的光源并不如此，而是向四面八方均匀地来发光。如果把激光器发射出来的光束射到月球上，则光束扩散的直径不足两公里，考虑到地球与月球的距离约有 38 万公里，这么一点扩散说明激光器的光束的平行度是很高的。这里还可以打个比喻，如果把探照灯的光束也射到月球上（这实际上是作不到的），则探照灯的光束扩散开来的直径将达几百公里。

激光器发射出来的光又是单一的颜色，这也是寻常光源所作不到的。寻常光源所发射出来的光，其成分十分复杂，它不仅包含着可见光，而且还包含着紫外线与红外线。激光器则不是这样，它所发射出来的光，颜色非常纯净。把现在所有的滤波技术都用于寻常光源上，也得不到象激光器那样的单色。

激光器发射出来的光束非常强，并且还能聚成极小的光点，这种光点所照射之处，在不到千分之一秒的时间内，就能产生几百万度的高温。

激光器的性质如此奇异，它就带来了许多重要的用途，其中许多是以前完全作不到的。因此激光器的研究在现代科学技术中占有十分重要的地位。

到目前，已经研制出多种多样的激光器。作为一个例子，在图 1 中绘出晶体激光器的略图，在这图中所用的晶体为红

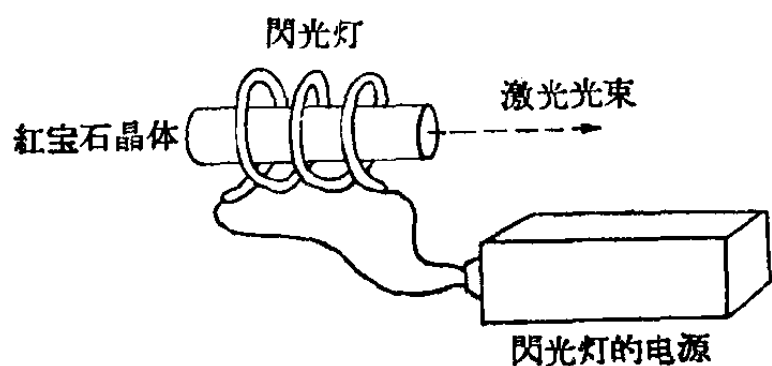


图 1 晶体激光器的略图

宝石，象一支纸烟那样的大小，它的两端都磨光并且互相平行。两个端面都镀上银膜，其中一端的银膜是全反射的，另一端则允许部分地透光。以

一螺旋形的闪光灯套在红宝石上。当闪光灯闪光时，红宝石晶体就从部分透光的一端发射出一束耀眼的红光。这是一具脉冲的器件。每一次脉冲的时间是很短的，大约为毫秒（千分之一秒）的数量级。但是很强，激光的峰值功率可达万瓦左右。这个器件也就是人们第一次制造出来的激光器，这是 1960 年的事。经过十一年的研究，激光器已发展成为内容十分广阔的新型技术领域。

在本章的以下几节，我们对于激光器的基本原理作一些必要的讨论。毛主席教导说：“马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。”我们学习激光器的工作原理，也就是为我们伟大的社会

主义祖国作出更多的贡献来。

## 2. 关于光的本性的一些说明

人们对于光的研究已有很长的历史了，古远的且不说，就是从牛顿时代算起，到现在已有三百年了。经过这么长久的研究，人们对于光的本性已有了一个比较清楚的认识。但这绝不是说我们对于光的本性的认识运动已经完成了。正如毛主席教导的：“**客观现实世界的变化运动永远没有完结，人们在实践中对于真理的认识也就永远没有完结。**”关于光的更为深刻的性质还有待于今后人们在不断地实践中来不断地揭露。这里所讨论的光的本性就是在目前的认识水平上说的。

自古以来，人们就追问，光到底走多快？经过长期的反复的测量，对于光的传播速度已经搞得很精确了，对于寻常的目的来说，在空间传播的速度大约是每秒 30 万公里。那么光到底是什么呢？牛顿说光是由微小的粒子所组成的，这些微粒子从光源发射出来就沿着直线向各个方向奔跑。但是牛顿的光的微粒学说漏洞很多，不能自圆其说。到了十九世纪初期，大多数人相信光是一种波动，有点类似于水面上的水波。经过一百年的争辩，这种观点占了上风，一直到现在也还没有被推翻。但是这种观点也是有局限性的。

表示光波的方法常常是利用正弦曲线来表示，就如图 2

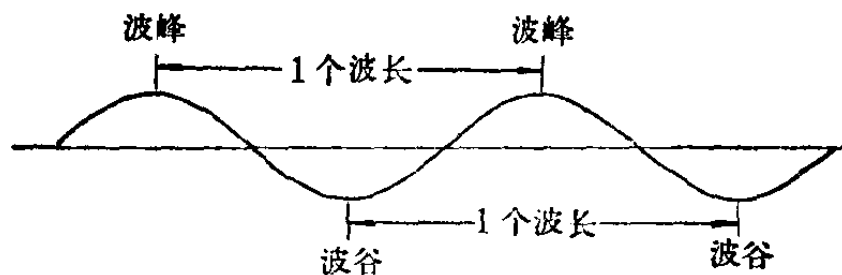


图 2 光的波动的示意图。一个光波代表一个周期

所画的那样。一个光波在空间传播时犹如水面上的水波向前传播那样。在这图中,曲线的最高点称为波峰,最低点称为波谷。两个相邻的波峰或者波谷的距离叫做一个波长。波长是描写波动现象的重要参量之一。任何波动都有它自己的波长的。光波的波长极短。以埃为单位,一埃为一厘米的一亿分之一,或者写成  $10^{-8}$  厘米,经常以 A 来表示;也可以微米为单位,一微米等于一毫米的千分之一,经常以字母  $\mu$  来表示。人们的眼睛所能直接看到的光,其波长大约从 3900A 到 7600A。这个波长的范围称为可见光区域。在可见光区域内包含着六种颜色,即红、橙、黄、绿、蓝、紫。每种颜色的波长范围表之于图 3 中。在这图中由箭号所标志的波长为该颜色的中心波长。把这些颜色混合在一起就成为白光。

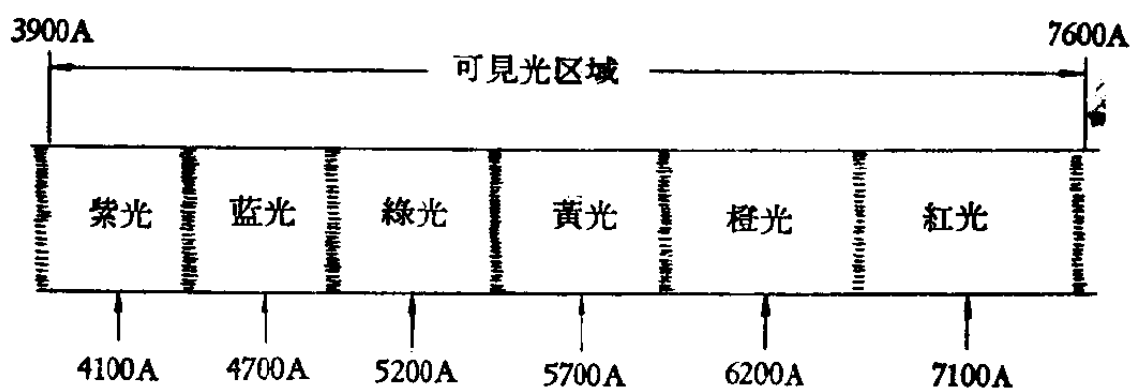


图 3 可见光的波长范围及各种颜色的分布

如果光波的波长短于 3900A,人的眼睛是看不见的,这就是紫外线。紫外线的区域从 3900A 可到几百个埃。如果光波的波长大于 7600A,人的眼睛也看不见它们,这就是红外线。红外线的区域从 7600A 可到几百个微米。

与波长有密切联系的一个参量是频率,频率的定义是:在一个单位的时间里通过一定点的波长的数目叫做频率。通常都是以每秒若干周来表示它,因为一个波长就是一周。由于各种颜色的光在自由空间传播的速度都是相同的,所以波长越



长,频率就越低;波长越短,频率就越高。频率乘上波长就等于光传播的速度。如以字母  $\lambda$  表示波长,  $\nu$  表示频率,  $v$  表示光速,则它们之间的关系为  $v = \lambda\nu$ 。如果在这三个量中知道了两个,则从这个简单的公式可以计算出第三个量来。例如红光的中心波长为 7100Å,光速为每秒  $3 \times 10^{10}$  厘米(这种写法代表在 3 以后跟着 10 个圈),则它的频率大约等于每秒  $4.24 \times 10^{14}$  周。同样的道理可以计算出可见光区域中的短波边缘的频率为每秒  $7.7 \times 10^{14}$  周,可见光区域的长波边缘的频率为每秒  $3.94 \times 10^{14}$  周。在这里我们也可以看出,它们之间有一个巨大的频率差别,这个差别等于  $3.76 \times 10^{14}$  周。这种差别通常叫做带宽,带宽在无线电电子学中是一个很重要的概念。

我们在这里把光看成是一种波动现象,在光的传播过程中,非常规律地在作起伏运动,那么是什么东西在作这种运动呢?在水波中,是水表面的水分子在那里作上下起伏的振动,水分子连续不断地把这种起伏运动传递给相邻的水分子,从而水波就逐渐扩散出去。那么在光波中作这种起伏运动的又是什么呢?毛主席教导说:**“判定认识或理论之是否真理,不是依主观上觉得如何而定,而是依客观上社会实践的结果如何而定。”**许多实验事实都证明:在光波中作起伏振动的乃是电力与磁力,或者说是电场与磁场。更具体一点说,在光的传播中,电场在垂直于光的传播方向上作周期性地振动,而磁场的振动不但垂直于光的传播方向并且同时还垂直于电场振动的方向。而且这两者的振动完全是同步调的。如以这种概念来表示光波的话,就应象图 4 中所表示的那样。在这图中,在光沿着箭号的方向传播中,电场是在纸面上垂直于光的传播方向作振动,并以字母  $E$  来表示这种振动,这就是以实线来表示的正弦曲线。而磁场则在垂直于纸面的方向同时并垂直于光的传播方向来作振动,由字母  $M$  来表示这种振动,这就是以

虚线所表示的正弦曲线。可以看出,这两种振动是同步调的,并且彼此互相垂直而又垂直于光的传播方向。

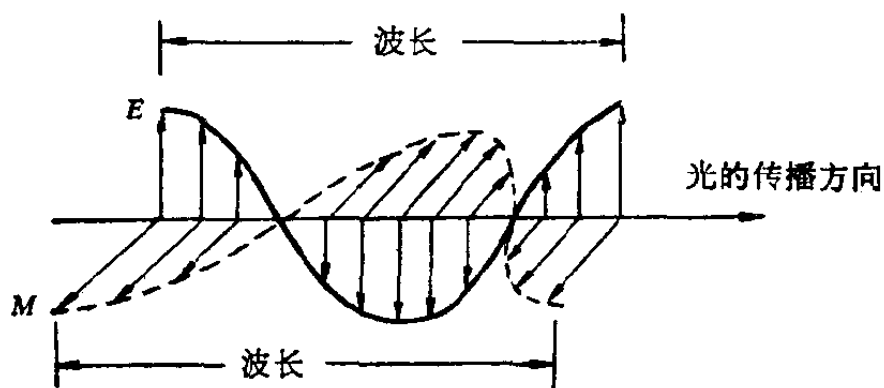


图4 单个光波的示意图。 $E$ 表示电场振动的样式,  
 $M$ 表示磁场振动的样式

由于光波是电磁场的振动,所以我们把光波叫做电磁波。现在我们知道,不仅光波是电磁波,比光波长的微波、无线电波,比光波短的伦琴射线等都是电磁波。但不论是那种形式的电磁波,它们在空间传播的速度都是相同的。我们从日常的现象中知道,电场和磁场都是力的表现,这就是电力与磁力,有力就会有能量,所以各种电磁波都携带着能量。电磁波的能量的大小完全由它们的电场的强弱与磁场的强弱来决定,并可以精确地计算出来。

在物理学中,许多的物理现象都是由光波的电场所引起的,光波的磁场并不起什么作用。所以在用图形来表示光波时,通常都是略去磁场不画,只画出电场来,就象图2所表示的那样。在以后,我们也是采用这种比较简单的方式来表示光波。

要想完善的描写一个光波时,除了波长和频率以外,还需引入一些别的概念。这就是振幅和位相。振幅指的是在光波中振动着的电场的最大值,如图5中的 $B$ 与 $D$ 等都表示光波的振幅。振幅的大小就决定了光的强弱,也就是光波的能量的大小。光波的位相是在一个波长的范围内决定各点的电场

的大小的。位相都是以角度来表示之。例如在图 5 中， $A$  点的位相角为零度， $B$  点的位相角为 90 度， $C$  点的位相角为 180 度， $D$  点的位相角为 270 度（或 -90 度）， $E$  点的位相角为 360 度。在这波长范围内，其他各点也都有相应的位相角。知道了某一点的位相角，就可求出那一点的电场的大小。但是光波的位相的更为重要的意义却反映在光的干涉效应中。关于这一点在下面来说明之。

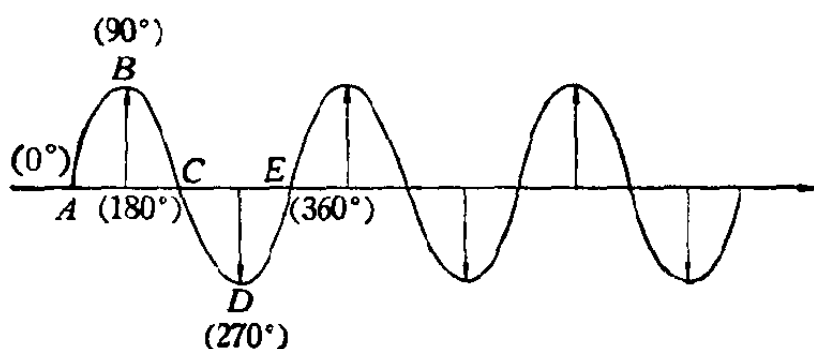


图 5 光波的振幅与位相角

设想有两个光波，它们的频率与振幅都相同。这两个光波迭加在一起后，会发生什么现象呢？如果这两个光波也是同位相的，也就是说一个波的波峰和波谷与另一个波的波峰和波谷是一一对应的，有如图 6 中(a)图所表示的那样。当它们迭加在一起后，则合成的波的振幅就为原来的波的振幅的两倍，光变得更强了。但如果这两个波的位相是异位相的，也就是说，它们的位相角差 180 度，在这时，一个波的波峰和

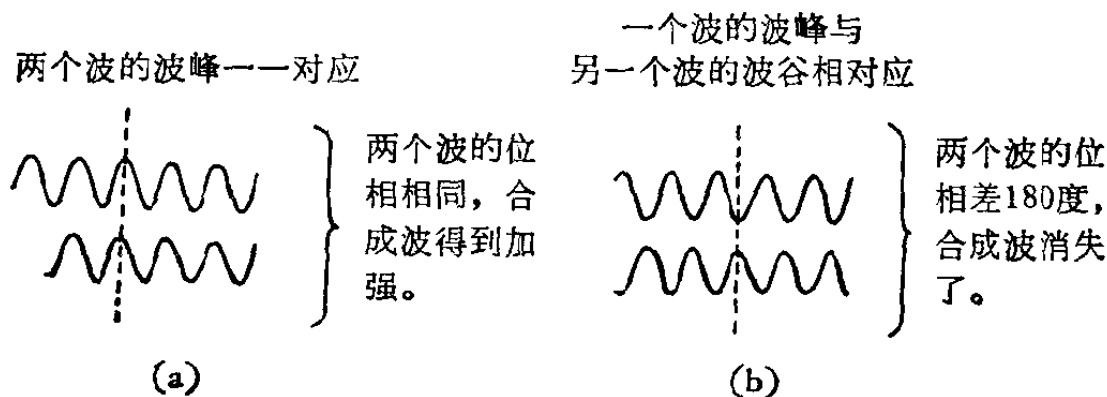


图 6 光的干涉效应

另一个波的波谷相对应,有如图6中(b)图所示,当它们迭加在一起后,合成波消失了,两个光波的电振动互相抵消掉了,因而变得无光。因此,根据两个光波的位相是相同的还是相差180度,合成后的光波或者得到加强或者消失。这种现象就叫做光的干涉效应。光的干涉效应乃是光的波动理论的重要基础之一。

在讨论波动的现象中,我们还需区分两种极不相同的波动。一种波动可由近代无线电发射机所发出来的载波来代表。这种波在频率上、在振幅上都是均匀的,并且是连续不断的,就如图7所表示的那样。这样的波动叫做相干的波。另一种是除了激光器以外的几乎所有的光源发射出来的光波。

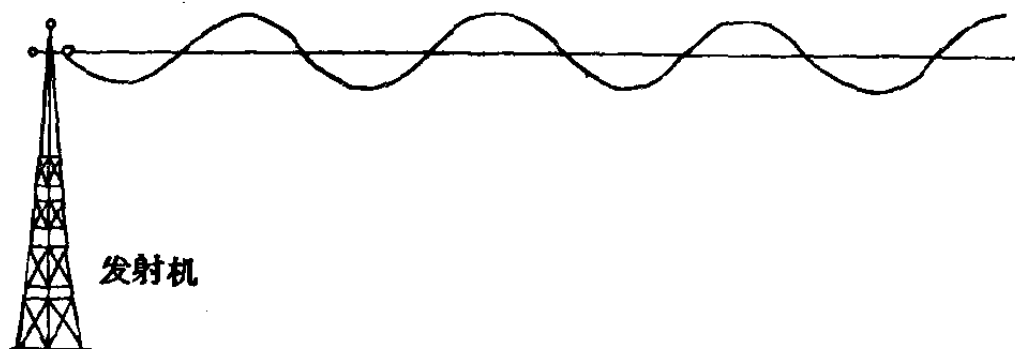


图7 相干的辐射

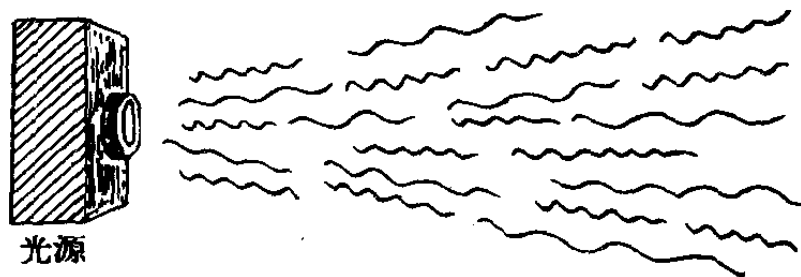


图8 非相干的辐射

这种光波包括着各种各样的频率,各种不同的振幅,向各个方向发射,并且是不连续的而是一小段一小段的,总之,它是无规律的,混杂的光波。这样的光波叫做非相干的波。非相干的波是不能在通讯中用作讯息的载波的。此外,我们也不能

把非相干的波的能量聚积在极小的区域内。

只有相干的光在它的传播中才能保持平行，而避免很大的扩散。也只有相干的光才能够在两个光束之间发生干涉效应。事实上，这种干涉效应就是相干性的最好的证明。

在以上的叙述中，我们把光看成是一种波动——电磁波。但是这种观点是有片面性的。毛主席教导说：“**马克思主义者认为人类社会的生产活动，是一步又一步地由低级向高级发展，因此，人们的认识，不论对于自然界方面，对于社会方面，也都是一步一步地由低级向高级发展，即由浅入深，由片面到更多的方面。**”人们对于光的认识就是遵循这一伟大教导的。随着人们对于光的实践不断地加深加广，人们就感到必须对于光赋予新的特性才能更为完善地来解释所观察到的诸种自然现象。也就是说必须把光看成是永远运动着的微粒子。这种微粒子在光学中叫做光子。光子完全不同于我们寻常所理解的粒子那样，它既具有粒子的性质，同时还具有波的性质，粒子的概念与波的概念同时在光子身上体现出来。光子完全是个矛盾的事物。“**没有什么事物是不包含矛盾的，没有矛盾就没有世界。**”事实上，光子所显示出来的矛盾乃是自然界的普遍现象。

一个光子的能量与它所结合的电磁波的频率成正比。在前面我们曾谈到，在可见光区域的紫光短波边缘的频率差不多为红光长波边缘的频率的两倍，所以紫光光子的能量差不多为红光光子的两倍。这一情况就暴露出光子具有波的性质了。但是光子同时还具有动量，这又是光子显示出粒子特性的地方。一个粒子的动量等于它的质量乘上它的速度，只有粒子才具有这种性质。并且光子的动量也与它本身所结合的电磁波的频率成正比，频率加倍，光子的动量也加倍。由此可见，光的性质是颇为复杂的，它既具有波的性质也具有粒子

的性质。

### 3. 原子结构浅说

激光是由原子发射出来的,为了弄清激光器的工作原理,需要对于原子的结构作一简单的说明。

原子结构的研究到现在已经有半个多世纪了。经过这么长久地反复实践与认识的过程,人们对于原子的结构大体上是清楚的。原子是由两种不同的带电的粒子所组成。这就是电子和原子核。原子核带有正电,电子带有负电,而电子则围绕原子核永远不停地运动着。

在不同元素的原子中,它们的电子数目是不同的,在最简单的氢原子中只有一个电子,氦原子有两个电子,锂原子有三个电子,而铀原子则有 92 个电子。不论那一种原子,电子所带的总的负电与原子核所带的正电,在数量上是相等的。因此,整个原子对于外界的观察者来说,是呈中性的。但如果由于某种原因,原子丢失一个或几个电子的话,就是说原子被离化了,原子变成了离子,这时离子就显示出电学性质来。原子丢失一个电子所形成的离子叫做一次离化的离子,原子丢失二个电子所形成的离子叫做二次离化的离子。如此类推。

电子在原子中的分布可以分为很多层,最靠近原子核的电子与原子核之间的结合力是很强的。越靠外层,则电子与原子核之间的结合力就越小。最外层的电子与原子核之间的结合是很松散的,因之,不大的能量就可使它们逸出原子的范围以外,从而使原子变成离子。这些最外层的电子,在化学反应中就参与反应,所以在化学中把这些最外层的电子叫做价电子。在光学中,最外层的电子就参与光学过程,例如光的吸收,光的发射等。所以在光学中,把最外层的电子又叫做光学

电子。光学电子与价电子实际上指的是相同的电子。在以后的讨论中，我们谈到电子的各种过程时，都是指的光学电子。

在图 9 中表示出电子在原子中的分布的示意图。

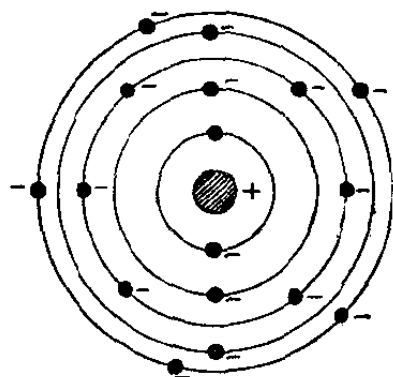


图 9 原子中的电子的分布的示意图

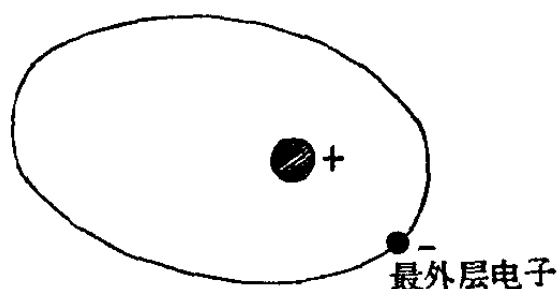


图 10 电子的轨道

原子中的电子并不是静止不动的，而是永远不停地围绕着原子核运动。粗浅的说来，电子在原子中的运动轨道可以看成是椭圆的，就象图 10 所表示的那样。为了简便，在这图中只画出一个电子的轨道。

但是，电子在原子中的运动性质却是很特别的，不可按常理来对待它们。普通的物理理论是不能说明它们的运动性质的。毛主席教导说：“**每一物质的运动形式所具有的特殊本质，为它自己的特殊的矛盾所规定。**”在原子世界中，我们所遇到的都是极其微小的，性质特别的粒子，所以它们的运动形式也很特殊。如果要求不是很严格的话，我们可以对原子中的电子运动作如下的解释：电子在原子中的运动不是可以有任意的轨道的，而是有严格的法则来限制的。也就是说，电子在原子中的运动只能有某些允许的轨道，除了这些所允许的轨道之外，就再没有别的轨道了。由于每一个轨道运动就相应于一定的电子能量，因此电子的运动能量也就不能具有任意

的数值，只能具有某些所允许的数值。这些所允许的能量数值因轨道之不同都是一个一个地分开来的，而不是连续性的。这一运动特点乃是原子世界所特有的，在寻常的生活中是遇不到这种情况的。在日常现象中，我们所遇到的物体的运动，它们的运动能量可以有任何的数值，也就是说它们的运动能量的数值是连续性的，并没有什么选择，可以有任一能量数值。而原子世界的运动则完全不同于此，它们的运动能量只能有某些所允许的数值，而不能具有任意的数值。

当电子在原子中的运动从一个所允许的轨道变到另一个所允许的轨道上时，电子的能量就发生变化，这个能量的变化就反映为整个原子的能量的变化。所以在讨论电子在原子中的运动时，通常都不说电子的能量，而只说原子的能量，在以后我们也是采用这一说法。

表示原子能量的方法，一般都是按着能量的大小有比例地画出一些横线条来，如图 11 所示。在这图中，每一条横线

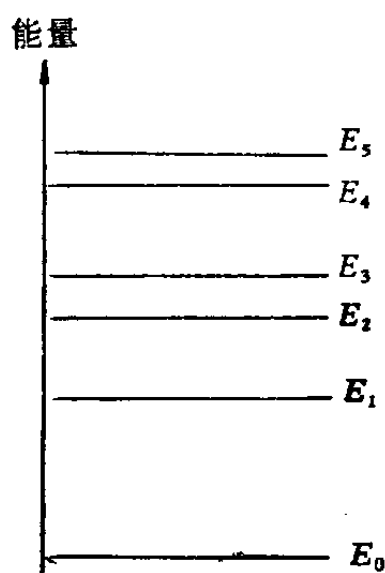


图 11 原子的能级图

的位置就代表一个能量。原子能量的不连续性就在于只有这些横线的位置所代表的能量才是原子可能有的能量，在横线之间的各种能量的数值则不允许为原子所具有。这一说法是与原子中的电子运动只能具有某些特定的轨道的说法是一致的。每一横线叫做原子的一个能级，这个图就叫做原子的能级图。实际的原子能级图远比图 11 复杂得多，能级的数目是极多的，这里只表明其概念而已。

在正常的条件下，绝大多数原子所具有的能量是所有可允许的能量中的最小值。也就是说，它们处于图 11 中的  $E_0$  能



级上。这个最低的能级叫做基能级。处于这个能级上的原子的能量状态叫做原子的基态。这相应于电子在最小的轨道上的运动。基能级以上的各个高的能级，如  $E_1, E_2, E_3$  等都叫做激发能级，处于这些能级上的原子的能量状态叫做激发态。这相应于电子在各个较大的轨道上的运动。在正常条件下，只有极少数的原子处于激发能级上，而且激发能级越高，处于这个能级上的原子数目就越少。原子在能级上的这种分布是遵从玻耳兹曼法则的。这种分布是原子在能级上的正常分布。如果利用某种方法使原子在能级上的分布倒过来，就是说使处于高能级的原子数目多于处于低能级上的数目，这一情况正好与正常的分布相反。这样的分布叫做原子在能级上的反分布。原子在能级上的反分布是产生激光的必要条件之一。

基态的原子，由于受到外界的刺激，例如受到别的原子或电子的撞击，或者吸收了光子，从而它的能量增多了，就可以从基态变为激发态。反之，激发态的原子由于某种原因把它的能量释放出一部分，从而它的能量减少了，原子就可以变为基态或者其他较低的激发态。原子的这种能态的变化称为跃迁过程。不论原子从基态跃迁到激发态，还是从激发态跃迁到基态（或者其他较低的激发态上），原子所得的能量或者所失掉的能量都必须等于有关的两个能级之间的能量差，而不能是别的什么数值。这也就是原子只能具有所允许的能量之外而不能具有别的能量的自然结果。

当原子从激发能级跃迁到其他较低的能级上时，它所释放出来的能量或者变为光或者变为热。如果变为光的话，则所发射出来的光的频率（或者波长）就由两个能级之间的能量差来决定之。能级的差别越大，频率就越高，能级的差别越小，频率就越低。