

# 奇异的 激光世界

上卷 激光及应用

新疆人民出版社



少年百科知识文库

# 奇异的激光世界

上卷：激光及应用

新疆人民出版社

(新)新登字 01 号

少年百科知识文库

奇异的激光世界

上卷:激光及应用

☆

新疆人民出版社出版发行

各地新华书店经销 新疆大学出版社印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/32 117 2 印张 2350 千字

1995 年 3 月第 1 版 1997 年 9 月第 2 次印刷

ISBN7—228—03509—7/C·34

全套(24 册) 总定价:132.00 元

# 目 录

第一章	激光之源	1
第二章	激光之战	17
第三章	超常规工艺	32
第四章	“咔嚓”中的特异功能	41
第五章	艺术辐射	51
第六章	绿色·生命	62
第七章	郎中奇术	74
第八章	警官的“保镖”	84
第九章	激光·高新科技	98
第十章	光学前沿	109
结束语	:21世纪光学世界前景展望	119

## 第一章 激光之源

### 一 激光之父

爱因斯坦(1879—1955年)的相对论使人们改变了对整个世界的看法。简单讲来,相对论认为,宇宙的最高速度的光速;质量随速度增加;时钟在空间转动的速率随速度的加快而减少;能量和质量遵从下述关系:能量=质量 $\times$ 光速<sup>2</sup>。这从后来原子裂变的过程中得到证实。

然而,激光与爱因斯坦之间的关系如何?并不是每一个人都很了解的。

关于微波激射器与激光器的基础理论,早在1917年,爱因斯坦就对物质的发光机制作了深入研究,在研究原子系统与辐射场相互作用的微观过程时,提出了受激发射的概念。受激发射是微波激射器和激光器得以发明的理论依据,为40年后的“光源革命”开了先河。

爱因斯坦受激发射理论的基本内容是,假设某微观粒子(原子、分子或离子)有两个分立能级,高能级能量为 $E_2$ ,低能级能量为 $E_1$ ,能级上的粒子数密度分别为 $N_2$ 或 $N_1$ ,考虑到粒子与电磁场相互作用时,爱因斯坦指出,存在三种类型能级跃迁:a)自

发发射。处于高能级上粒子在不受外界电磁场作用下，自发地跃迁到低能级并发射能量为  $h\nu = E_2 - E_1$  的光子；b) 受激吸收。如果频率为  $\nu = (E_2 - E_1)/h$  的电磁波与处在  $E_1$  上的粒子相互作用，则粒子可吸收入射电磁波而跃迁到高能级  $E_2$  上；c) 受激发射。如果频率为  $\nu$  的电磁波与处于高能级  $E_2$  上的粒子相互作用，粒子将从高能级跃迁到低能级  $E_1$  上而发射一个与入射电磁波频率相同的光子。受激发射的光子与入射电磁波具有相同的频率、位相、偏振和传播方向，它们是相干的。爱因斯坦又指出，受激发射和受激吸收过程是同时存在的，并且跃迁几率相等。按照玻耳兹曼分布规律，在热平衡条件下，处于低能级上的粒子数  $N_1$  多于高能级上的粒子数  $N_2$ ，这时受激吸收总是大于受激发射，所以通常只能观察到受激吸收而观察不到受激发射现象。由于那时的客观条件限制，人们还看不到受激发射理论在实践中的应用，爱因斯坦的这一颇具建树的首创性激光理论，未能引起人们重视。

后来的实践证明，爱因斯坦提出的激光理论具有划时代的先驱业绩，因而功不可灭。爱因斯坦被人们誉为“激光之父”，乃当之无愧，受之有理！

## 二 后学助威

第二次世界大战后，日臻成熟的微波电子技术促进了微波谱学的发展，同时人们对物质微观结构也有了较深入的了解，而一些实验与理论上的问题，如在光谱学的研究中所观察到的许多超精细结构也急待加以解释，这些都促成了微波量子电子学的诞生。几年时间里，人们发现了一系列磁共振现象。

1946年，布洛赫在做核感应实验时，观察到微波辐射和工

作物质间的共振信号,并首次观察到粒子数反转(即  $N_2 > N_1$ ) 的实验现象。

1951年,一些科学家在美国华盛顿讨论如何发展比微波频率高的辐射的应用于通信及其他领域的问题,汤斯对此十分感兴趣。他设想用某种方法破坏热平衡分布,使多数分子处于较高能级,然后用微波照射这些分子使其受激而辐射能量,这就可以起到放大电磁波作用,最后再把一部分发射的电磁波反馈到仪器中去激发处于高能级的分子,便可能形成振荡。他与另两位助手经过三年试验,终于研制成功了最早的微波激光器——氨分子量子振荡器。苏联的巴索夫和普罗霍洛夫几乎与汤斯同时也独立研制出氨分子微波激光器。

从微波激光器到光激光器有许多新的问题需要解决,其中一个重要的问题是光谐振腔的设计与制造。根据电磁学原理,为了在谐振腔内保持单一模式振荡,腔的尺寸应与电磁波波长具有相同数量级。光波波长比微波波长小四、五个数量级,制造尺寸与光波波长( $\lambda$  即  $10^{-8}$  厘米的数量级)相当的谐振腔在技术上几乎是不可能的,因此,必须寻找一种新的解决办法和途径。1958年,科学家肖洛和汤斯在一篇著名文章中讨论了由微波激光器到激光器所存在的问题,指出了使光源转变成的受激发射为主的可能性,给出了应该满足的条件,并提出了解决问题的建议。他们建议,使用一种叫法布里—珀罗干涉仪形式的两个平行平面镜作光谐振腔,使振荡维持一个或少数几个模式。这是从微波激光器到激光器发展过程中关键的一步。汤斯和肖洛在最初的考虑中,建议用钾蒸气作激光工作物质,用钾光谱灯作激励光源。当时,他们也分析了红宝石的几条荧光谱线,认为红宝石的 R1 线很难实现受激发射,因为这条线终止于基态,不易实现能级间粒子数反转分布。

尽管如此，他们的这一重要启示，很快在科技领域内激起了一股研究激光器的狂潮，相继出现了各种各样的实验方案。

无疑，汤斯等人的研究成果，已将激光技术的研究与实验向前大大地推进了一步。

### 三 世界首台激光器的诞生

美国休斯顿实验室的梅曼教授，在研究激光技术的进程中，提出了利用掺铬的红宝石晶体作为发光工作物质，用发光强度很高的氙灯作为泵浦源的方案，冲破禁区，经过约两年的时间，终于在1960年5月成功地获得了激光，制成世界上第一台红宝石激光器。

梅曼的红宝石激光器由三部份组成：工作物质——红宝石晶体；步频谐振腔和泵浦光源——脉冲氙灯；梅曼将红宝石做成长4.5厘米，直径0.6厘米的圆棒，把它的两端抛光成光学平面并镀银的形成法布里——珀罗光频谐振腔，其中一端膜中央有一透光小孔，使产生的激光由小孔射出。红宝石固定于螺旋形闪光灯管中央，闪光灯每闪光一次，小孔或半透膜中便射出深红色（波长6943埃）的激光。

汤斯、巴索夫和普罗霍洛夫因对微波激励器和激光器发展做出卓越贡献，而荣获1964年诺贝尔奖金。可是，最早提出实现光频能级间粒子数反转分布方法并申请过专利的是加里福尼亚大学辐射实验室（汤斯当时是该实验室主任）的研究生古尔德，只是由于他没有认识到需要选择适当的振荡模式而未能成为激光技术的开拓者。



## 四 中国红宝石激光器

世界上第一台激光器研制成功不久,1961年9月,我国第一台红宝石激光器也相继研制成功。

我国第一台红宝石激光器在长春研制成功的。当时,能够获取有关的激光器科技情报非常有限,为了我国经济建设与国防建设的需要,科技工作者们毅然决定依靠自己,自力更生,克服了重重困难,立即投入研制。我国科技工作者提出的新光源研制方案,是利用掺铬的红宝石作工作物质,用脉冲氙灯作泵浦源(激励源),两块互相平行的反光镜组成共振腔。这个方案,与世界上第一台激光器是相类似的。我国自行设计的工作方案中,做泵浦源的氙灯不是螺旋状的,而是直管式的;作为工作物质的红宝石棒也不是像梅曼教授的那台红宝石激光器那样插在氙灯的螺旋圈内,而是把红宝石棒和氙灯置于一只球形聚光器的球心附近,这样便能通过聚光器的聚光作用,来提高氙灯泵浦红宝石受激发射的效率。

采用脉冲氙灯作泵浦源的依据是,根据理论计算,对泵浦源的要求为它照射到红宝石棒表面每平方厘米的光功率,至少要达到15万瓦,可一般的电光源则无法达到这个要求。氙气是一种稀有的惰性气体,在每100升空气中大约只有0.0087毫升的含量,而制作氙灯的氙气还必须达到极高的纯度,直接从市场购买的氙灯只在国外有售,而国内却是一个空白。经过上下各方的努力,很不容易才在上海一家灯泡厂找到所需的氙气。可放电管吹制出来后,做好的灯管放不了两天,便出现炸裂。因为氙灯的电极用的是钨材料,放电管用的是石英玻璃,二者的膨胀系数不相匹配。试验中,发现派勒克斯玻璃倒是能与钨电极匹配,但它

的机械强度却不如石英玻璃，灯管制成后，管内通过强大电流时，同样会发生炸裂。后来经过反复试验，制出一种新品种玻璃，这种玻璃的膨胀系数是渐变的，一头的膨胀系数与石英玻璃相同，另一头的膨胀系数与派勒克斯玻璃相接近，这既使灯管与钨电极相匹配，又有足够的机械强度。

在制作掺铬红宝石棒的工作中，同样也遇到不少难题。红宝石是一种晶体，它的化学成分为三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )，掺进一定浓度的三氧化二铬( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )后，经精密光学加工，便成了新光源所需的工作物质。他本身要有极好的光学均匀性，在它的两个端面还要用光学研磨的方法磨成光学质量相当高的光学平面，表面的不平整程度要小于红宝石棒所发射的光波波长的  $1/20$ ，而且两个端面彼此平行的偏差度小于  $5''$ ，两个端面镀上银膜之后，一端的反射率要达到  $99\%$  以上，另一端要求透过率则为  $2\%—5\%$ 。这种高精度的晶体光学加工以及与之相应的检验技术，在我国尚属一个全新的课题。我们的科技工作者，夜以继日，通力合作，在无数次试验与探索中，硬是攻克了一道道难关。各种元件都已配备齐了，一台新的光源装置按照设计方案安装起来了，万事齐备，只欠东风。

受激光射的光究竟是什么样子，人们心中无底，毕竟在此之前，谁也没有亲自见过啊！根据理论分析与计算，我国的这一台新光源装置所发射的光束呈鲜红色，光束发散角应当很小，集中在一个方向上。用一种叫做法布里—珀罗干涉仪测量，光束应有极好的相干性，光谱线宽度较窄，光的方向性、相干性、谱线宽度等都应表现出阈值特性。给泵浦源（氙灯）加的电压只有达到某个数值后，光的方向性、相干性、谱线宽度等才能与理论分析相符合，低于这个数值，光束的这些性质会很差，光辐射强度也会急剧下降。

可是,实验中人们所期待的那束呈鲜红色,并没有如期而至。把储能器的电容增大了,加上氙灯的电压提高了,依然不见红光斑的出现。有人提出:是不是红宝石掺入的铬离子浓度不够?于是,又准备了几根掺入  $\text{Rr}_2\text{O}_3$  浓度不同的红宝石棒,棒的端面也进行了十分精细的光学加工。终于,红光斑出现了!重复几次的出现红光斑,闪闪烁烁,格外娇艳。可好景不长,不久由于涉仪拍摄的干涉图片冲洗出来后,人们又一次陷入失望,这束红光并不是受激辐射所致。科技工作者怀着一线希望,认为也许这台新光源已调度到接近受激辐射的临界点了吧?加大氙灯的输入能量试试,又如何呢?氙灯的电压一次又一次提高,达到 1500 伏,随着氙灯的闪光,从红宝石棒的一端射出的一束鲜红的光束,在屏幕上投入一个圆圆的光斑。多次试验,结果一样。干涉仪测量结果显示出发束的发散角很小,全部光辐射的能量集中到了 0.01 弧度的圆锥角内,光束有很高的相干性,光谱线宽度在 0.01 纳米(1 纳米=10<sup>-9</sup> 米)以下。受激发射的光源,终于在中国大陆的科研实验室里闪烁着鲜红的光束!

## 五、“激光”——中国的专利

激光的英文全称为:Light Amplification of Stimulated Emission of Radiato in,缩写为 LASER,愿意为受激辐射光放大。而我国制成这种新光源之初,人们称它为“光的受激辐射放大器”。一来这个名字太长,二来念起也有点别扭,书写也不太方便。便有人把它压缩为光激射,也有按基本意思称它为“光量子放大器”的,有人干脆按 Laser 的译音,称为“莱塞”或“镭射”。可较为麻烦的是,只要一提到莱塞,随后还得加注一长串的解释:也叫光受激辐射放大器,光量子放大器,光激射器,镭射等

等，总让人感到不太理想。

在此基础上，《光受激发射情报》杂志社（即现在的《国外激光》杂志）编辑部给我国著名科学家钱学森写了一封信，请他给 Laser 取一个中国的名字。钱学森给编辑部回信，建议命名为“激光”。1964 年冬天，在上海召开的全国第三届光量子放大器学术报告会上，提交了钱学森的这个具有中国特色，属于中国专利的建议，受到与会者的一致赞同，从此统一了命名，以“激光”风行天下。

“激光”这个名称，显然比“光受激辐射放大器”、“光量子放大器”、“光激励器”等来得简短，而比起“莱塞”、“镭射”等纯属音译的名称，“激光”更具中国风味。更重要的是很确切地表达了这个概念的基本意思。“光”字的意义本身十分清楚，“激”则很容易使人联想到“激发”，“激励”的一类概念。“激光”是汉语中的缩写，Laser 则是英语中的缩写，前者可望文生义，后者即连那“光”的影儿也见不到。

世界上第一台红宝石激光器，只能输出单一的波长波光，它输出的波长为 6943 埃（1 埃 =  $10^{-10}$  米）的红光，激光输出为间歇式脉冲输出。我国的科技工作者大胆设想，勇于创新，希望自己研制的激光器能像收音机那样根据人们的需要自由调谐。

我国科技工作者选定的下一个目标是，以氦——氖混合气体作工作物质氦——氖激光器。这种激光器打到屏幕上的红光斑应连续发光，调整反射镜时，红光斑变换出各式花样——激光模式花样。它随着激光器工作条件变化而发生变化。

激光器的种类按工作物质划分，有固体激光器（如红宝石激光器）、气体激光器（如氦——氖激光器）、半导体激光器如染料激光器等。固体激光器中，特别引人重视的是钕玻璃激光器，它的工作物质是将稀土元素钕掺入到硅酸盐或磷酸盐玻璃中制成

的,造价低输出能量高。我国在研制钕玻璃激光器方面,令举世瞩目。半导体激光器具有小型化与用途广泛的特点。染料激光器输出的波长可调谐,有着极为特殊的应用价值。

研究工作中发现,单靠加大工作物质的体积,既受到技术上的限制,又不很实用,而靠提高泵浦源的功率,也有一定限度,超过了限度,激光器输出功率不再同步提高,反面使激光的性能减弱。我们的科研人员在激光器共振腔上打主意,于是产生了调Q、锁模等特殊技术。采用调Q技术,同样一台红宝石激光器,输出功率猛然提高100倍,后来发明的更为先进的调Q开关,使激光器的峰值功率达到亿瓦至10亿瓦,光脉冲闪光时间缩短至亿分之一秒。而利用锁模技术,可产生闪光的时间只有万亿分之一秒的光脉冲,峰值功率达到百万亿瓦。

## 六 光之单色

太阳光的波长连续地分布在从红外光的很宽的波长上,因此,太阳的辐射能量就分布得很散,落到苟一个很小的波长的间隔能量就很小。根据计算得知,它的波长650纳米(红光)附近的亮度是 $1560 \text{ 尔格} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{纳米}^{-1}$ 。

激光与普通光源都不尽相同。它的方向性极强,光束的发散角极小,而且辐射能量集中在非常窄的波长间隔内。这样,便产生了其他光源不可比拟的一个特性——亮度高,辐射能量高度集中。输出功率只有千分之一瓦的氦——氖激光器,光束的发散角仅千分之一弧度,能量集中在波长632.8纳米(红光)附近,波长间隔只有亿分之一纳米的范围内。由此便可以算出氦——氖激光器产生的激光亮度为 $1014 \text{ 尔格} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{纳米}^{-1}$ ,比太阳光的红光附近的亮度高600亿倍!

1666年，牛顿做了一个实验，他让一束太阳光射入暗室，用一块三棱镜投射到白色屏幕上，发现屏幕上映出的是一条红橙黄绿青蓝紫的七色光带。牛顿研究这种现象后得出结论：白色的阳光由红橙黄绿青蓝紫七种光混合而成。而这七种光分别都是单色光，这七种混合而成的白光叫复色光。复色光能分解为七种单色，是因为它在经过三棱镜时发生了折射，而各种单色光对同一种透明材料的折身率各不相同，于是在经过棱镜折射后就发生了实验显示的色散现象。

七种单色光中，红光的波长最长，折射率最小，在白光折射成的七色光带上总处在最外圈，橙光的波长仅短于红光，折射率则稍大于红光，在七色光带总处于第二圈，其余类推，紫外光波长最短，折射率最大，在七光带上总处于最内圈。

比红光的波长更长的光叫红外光，比紫光的波长更短的叫紫外光。我们把红外光与紫外光称为不可见光，而相应地把红橙黄绿青蓝紫七色光称为可见光。

光波是整个电磁波大家族中的一个小家庭，这个小家族的“家谱”仅是整个大家族“族谱”的一部份。而整个电磁波大家族的“族谱”叫电磁波谱。电磁波谱中，波长更长的无线电波，微波排在光波的前面，波长更短的X射线及 $\gamma$ 射线排在光波的后而。它们分别占据一定波长范围(波段)，依次为邻，但并无十分严格的界限。可见在电磁波谱中占据大约是从7000埃到4000埃很小的一个波段，这个小波段可依红橙黄绿青蓝紫分为更小的波段，还可作更进一步细分。其实，光波段的每一种细分的小波段，都可对应某一种色光，可有无穷多种不同的色光。

一束单色光通过一条狭缝后，经过棱镜射到屏幕上，会显示出有一条有一定宽度的亮线，这就是光谱线。光谱线亮度并不均匀，中间最亮，两边逐渐减弱。最大亮度对应的波长为这束单色

光的中心波长,将亮度为最大亮度一半的两个波长间的密度,称为这束单色光的谱线宽度。谱线宽度大,这束光波长范围则大,包含不同波长的光少,因此单色性较差,谱线宽度小,这束波长范围则小包含不同波长的光少,因此单色性较好。谱线宽度为零,而具有唯一波长的光,才是真正的单色光。但纯而又纯的单色光并不存在,任何光源都有一定的谱线宽度。

普通光源单色性一般比较差。太阳光中红光的波长,覆盖了电磁波谱中的全部红光波段。单色性最好的普通光源要数用同位素氪——86制成氪灯,它发出的橙红色光,中心波长为6057埃,谱线宽度仅千分之五埃左右。1960年第十一届国际计量会议决定采用氪——86在真空中发射的橙红色的波长6057埃作为国际长度标准,长度单位“米”即由此定义为这种光波长的165076.73倍。

不久,激光器问世了。这种崭新的光源,才真正摘取了单色光之冠的桂冠。如氦——氖激光器发射的红光中心波长为63.28埃,谱宽度仅有千万分之一埃,将氪——86创造的单色性世界纪录一下子提高了10万倍。

## 七 步调一致的光源

19世纪初,牛顿的一位同胞,英国医生兼物理学家托马斯·杨曾经做了一个著名实验,后来麦克斯韦的电磁理论又揭示光也是电磁波,“波动说”终于为科学界广为接受,因此,人们将托马斯·杨的实验称为“波动说的判决性实验”,这一实验的重要性在于它显示了光的干涉现象。

这个实验是这样的:实验中设置了两块平行的遮光板,第一块上开有一小孔S,第二块上开有两个小孔S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>,他用强烈

的单色光照到第一块遮光板，通过小孔 S 后成为一束细小的光，再照到第二块光屏上（遮光板又称为光屏），通过小孔 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 后，在前方的屏幕上就显示出一列明暗相间的条纹（称为干涉条纹）。这种现象用“微粒说”无法解释，而干涉现象恰恰是波动所独具的一个重要特征。杨氏干涉实验千真万确地显示了光的波动性。

普通光源发出的波光，杂乱无章。象白炽灯泡发光的是钨丝中的原子，每立方厘米钨丝中约包含 1023 个原子，每个原子均发出一列光波。假如其中只有 100 亿分之一的原子发光，也呆发出 1013 列光波，它们的波长长短不一，发射方向不尽相同，发光时间也有先后之分，同时，延续时间也非常短。显然，这样的光波，不能满足相干条件。两个普通光源发出的光在空间相遇后叠加的结果，使光的强度到处都加强了，却不能显示出时强时弱，有规则变化的干涉花样。

普通光源要获得相干光，必须采取特殊的装置。杨氏的实验，正是巧妙地设计出了特殊的装置，才率先获得了两列相干光。很遗憾，这样的相干光，强度已减弱到实际上不能利用的地步。激光器的问世，为我们找到了号令统一，训练有素，步调一致的相干光源。杨氏的实验装置中拿走第一个光屏，直接让激光通过第二个光屏的两个孔 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub>，也同样获得清晰而稳定的干涉条纹。

## 八 光与激光

西方的《圣经》中说，太初之时，宇宙一片混浊，暗淡无光。上帝告诉人们：“要有光！”于是，光明与黑暗便分开了。光明就是白天，黑暗就是夜晚。夜尽昼始，这便是世界的第一天。第二天上



帝分出了天与地，第三天上帝分出了陆地与海洋，第四天上帝造就了日月星辰，第五天上帝造就了飞禽走兽，第六天上帝造就了万物，第七天上帝累了，开始歇息。后来又有“万物生产靠太阳”的说法，可见光对于我们这个世界是多么的重要啊！

激光也是一种光，但它的发射方式以及许多特性与普通光却不一样。了解激光产生和性质之前，我们有必要了解一下光的产生以及性质。

原子是由原子核和核外电子所组成，电子总是在一些可能的轨道上绕核运动，由于运动轨道不同，原子具有的能量状态也不同。这个能量状态叫能态，最低的那个能态称基态，其他的称为高能态。电子总是力图处于低能态上，处于不同能态轨道上的电子，能够在这些轨道上跳来跳去，叫做“跃迁”。电子从低能态向高能态跃迁时，要吸收一个光量子（光量子又叫光子），从高能态往低能态跃迁时，要发射一个光子，这就是发光。如果从高能态往低能态跃迁时是电子自发进行的，这时发出的光叫“自发发射”，就是人们常见的那种普通光。如果电子是被别的光子“推到”低能态去而发射的光，这种发射叫“受激发射”，入射一个光子，射出的变成了两个，光显然是被放大的了，这就叫“受激发射光放大”。

光既是粒子又是波，由于光的粒子性，它能直线传播，光的传播速度为每秒钟 30 万公里。光又是一种波，一种在本质上与电磁波一样的波。光的波性又使光具有衍射，干涉等性质。光由于光波波长的不同而显示不同的颜色，红光的波长最长，紫光的波长最短。激光也同普通光一样具有上述性质。

当然，激光还具有普通光所不具备的一些特殊性质。所以，我们可以这样认为：激光是原子受激发射产生的，具有特殊性质的光。可以毫不夸张地说，在今天看来，激光已并不神秘，只不过