

# 激光器的“意外发明”

陈敬全

激光的发明，是现代物理学的发展取得的重要成果之一。从激光的基础理论提出到激光器的发现，经历了将近半个世纪。激光的发明过程颇具曲折性：本世纪初已经提出了激光的基础理论——受激辐射及其相干性，然而激光器的发明却是 60 年代初的事情。基本概念最初是针对光波段提出的，但人们却是先在微波波段利用受激辐射制成了微波激光器，而后才发展了激光器，即走过了光波—微波—光波这样的曲折道路(图 1)。激光的发明又颇具“意外”性，激光的发明者之一，1964 年诺贝尔物理学奖获得者汤斯(C. M. Townes, 1915—)曾经把激光称为是“意外的发明”，确实，在激光的发明过程中，不乏所谓的“意外”事件，它们对激光的发明起到了关键作用。

### 基础理论的提出和受激辐射的意外实现

激光的基础理论早在 1916 年就由著名物理学家爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955)所奠定，同年他在《关于辐射的量子理论》一文里，借助“光子说”明确了在已知的辐射场与物质的两种相互作用——吸收和自发辐射之间，还存在着第三种过程——受激辐射，即在频率合适的辐射场作用下，分子从高能级跃迁到低能级并释放出能量。爱因斯坦还论及了关于分子和辐射之间的动量交换问题，得到了受激辐射所具有的最重要的性质：分子在受激辐射时释放的光量子与辐射光量子具有相同的频率、传播方向和偏振，即受激

辐射具有相干性。

受激辐射概念刚提出时并没有受到重视。1924 年才有人用以研究光的吸收和色散问题。1928 年，德国的拉登伯格(R. W. Ladenberg, 1885—1952)在对氦气进行的色散实验中，发现当放电激励电流超过一定数值时，高能级的氦分子布居数随电流增大而增多，从而使负色散现象显著增强。拉登伯格实际上是间接证实了受激辐射的存在。苏联的法布里康特(В. Фабрикант)比拉登伯格走得更远，他在 1939 年提出了以实验方法直接验证受激辐射的思想。他指出，得到受激辐射的条件是实现粒子数反转，即使处于高能级上的粒子数低于低能级上的粒子数，在这样的条件下，还可使入射光得到放大。法布里康特没能在实验中证实自己的思想，这是因为在热平衡条件下，低能级的粒子数总要比高能级上粒子数多，要实现粒子数反转，这意味着要破坏热平衡！这在当时是不可思议的。法布里康特的思想没能引起人们的重视。二次大战期间，这方面的研究被搁置起了。战后，日臻完善的微波技术被迅速应用于军事和各科研领域，微波波谱学的发展尤为令人瞩目，人们利用它深入研究原子、分子和原子核的精细和超精细结构，取得了一系列重要成果。1951 年，美国的珀塞尔(E. Purcell, 1922—)以微波波谱学的方法精确测定核磁矩，为使得到的微波信号增强，他用所谓的“突然倒转场”的方法，即设想外磁场极性之改

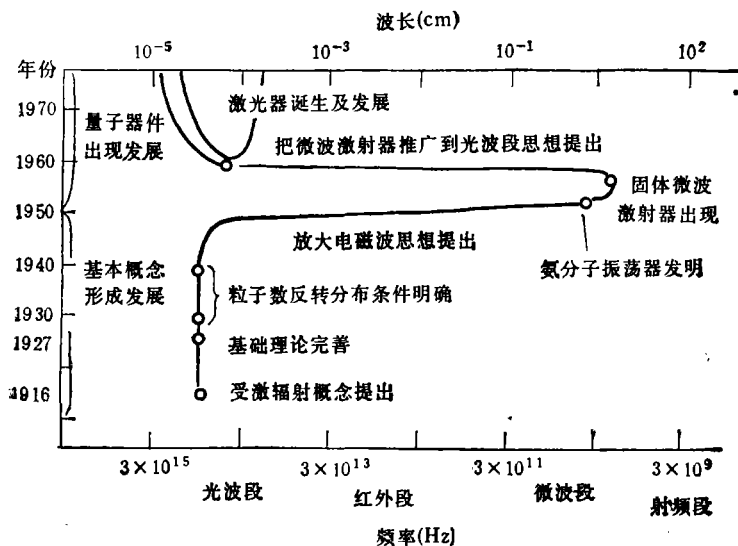


图 1 激光器的发明经过

变比核自旋的响应更快,在氟化锂(LiF)晶体中实现了核自旋体的反转分布,颇为意外地观察到了辐射频率为50kHz的受激辐射。珀塞尔第一次明确提出了所谓的“负温度”的概念,指出粒子数反转分布只能与玻耳兹曼分布律里的负温度相应\*。

珀塞尔在测定核磁矩的实验中意外地实现了受激辐射这一事件具有重要的意义,它清楚地证明了,所谓“负温度”不是不可逾越的障碍!人们对玻耳兹曼分布律有了更全面和更深刻的认识,它表明,人们经过三十多年的探索,终于有了实现受激辐射的方法,这对于即将出现的微波激光器无疑有启示作用的,历史到了一个新的转折点。

#### “神的启示”和微波激光器的意外发明

1951年5月在美国伊里诺大学举行的亚毫米波讨论会上,哥伦比亚大学的与会者代表汤斯向大会报告了以氨分子束的受激辐射实现微波振荡的设想。二次大战期间,汤斯曾在贝尔电话实验室从事雷达导航系统的研制。战后,应军方邀请,致力于进一步缩短雷达所使用电磁波的波长的研究工作。由于波长极短的电磁波具有测量目标的精度高,分辨目标能力强,传输的信息容量大等优越性,格外受到军方的重视,缩短波长一时成为汤斯的主要课题。汤斯的研制工作屡遭失败,曾几度陷入困境,这使他十分苦恼。1951年春季,汤斯在华盛顿参加会议,在会议期间的一个早晨,意外地想到了可以用分子体系来达到目的。汤斯对此有过一段描述:“在华盛顿召开的一次会议上,我和我的同事及朋友肖洛住在同一套房间里,早晨我很早就醒了。为了不打扰他,我走了出去,坐在附近公园的长凳上,苦苦思索我们过去失败的基本原因所在。有一点是清楚的:即需要制造一种非常小的精密的振荡器的方法。……这意味着:任何现实的希望都必须建立在寻找利用分子的方法上!或者正是早晨的清新的空气使我豁然开朗:这样做是可能的!”汤斯在华盛顿的这天早晨所得到的灵感,被人戏称为“得到了神的启示”。

汤斯设想的分子振荡器包括有氨分子源,不均匀

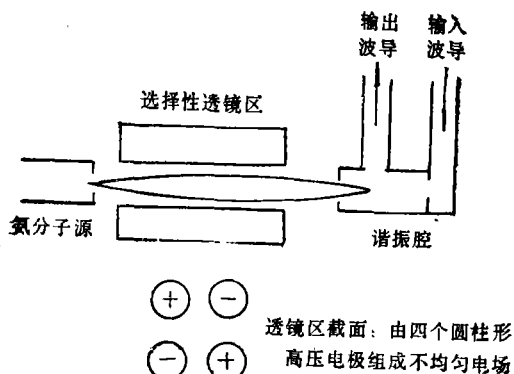


图2 氨分子振荡器示意

场分离系统和谐振腔(图2)。数根细管组成定向源,氨分子从定向源扩散出来,产生氨分子束。分子束通过一个由高度不均匀静电场形成的选择性透镜区,从而使高能态的分子聚焦,低能态的分子发散。高能态的氨分子进入谐振腔,与已有的微波场相互作用,产生附加辐射,于是形成受激发射放大作用。

1953年底,汤斯率领的小组实现了这一设想,氨分子振荡器运行成功。汤斯将其命名为Maser\*\*,其工作波长为1.25厘米,输出功率为 $10^{-7}$ 瓦,尽管功率极低,但却具有重要的意义:它证实并综合了已经明确的受激辐射、粒子数反转和放大电磁波等概念,第一次制成了实际可用的器件。氨分子振荡器的出现,使无线电电子学开始利用象分子一类的微观体系,并开始借用量子力学的概念和方法来处理这一类体系,“量子”概念的引入,使一门新的综合性学科——量子电子学应运而生。

在汤斯他们成功之后不久,苏联列别捷夫物理研究所的普洛霍罗夫(A. Прохоров, 1916—)和巴索夫(H. Басов, 1922—)也试制成了他们的氨分子振荡器。氨分子振荡器从它一出现就得到了应用:它具有极高的频率稳定度,被用作频谱标准(即分子钟);它的噪声极低,可用作高灵敏度的放大器,氨分子振荡器成为量子电子学研究的第一个分支。在这以后,人们致力寻找其他物质作为激活介质(即能产生粒子数反转的物质),1956年以三能级方法实现连续运转的固体微波激光器研制成功,弥补了氨分子振荡器作为放大器感应频带窄,不能连续运转等缺陷。固体微波激光器由于能在极低温度下工作,其噪声近于零,因而成为超灵敏度的理想的前级接受机和放大器,在宇航、远距离通讯、传真方面接受微弱信号上都得到了极其广泛的应用。固体微波激光器成为量子电子学研究的第二个分支,并为激光器的诞生奠定了基础。

#### “直接跃到光波段”和激光器方案的意外提出

氨分子振荡器和固体微波激光器的试制成功及其广泛应用引起了人们极大的兴趣,当其他人还醉心于这方面的研究时,汤斯已经在朝着产生更短波长的方向努力。他认为“放大过程本身是有相互联系的,一种波长应该象另一种波长一样容易产生,一直可以达到短的紫外区”。他一开始的想法是“一步一步地缩短波长,例如由毫米波进入亚毫米波范围”。

汤斯的这个想法遇到了极大的困难,问题在于振

\* 由玻耳兹曼分布率  $\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$ ,  $N_2, N_1$  为上下能级  $E_2, E_1$  之粒子数分布,  $E_2 > E_1$  欲使  $N_2 < N_1$ , 则  $T < 0$ 。

\*\* Maser, 英文 Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写,意为微波受激辐射放大。

荡器的谐振腔：谐振腔的尺寸与波长相当，当波长比1厘米更短时，制造非常困难，即便制造出来了，里面也容纳不了足够多的被激励了的分子；如谐振腔过大，会引起许多复杂的和不必要的振荡模式。谐振腔的振荡模式问题成了向更短波长迈进的主要障碍。

谐振腔的困难迫使汤斯走另一条路。他以后回忆说：“正是因为这一点，使得我决定放弃一步一步地缩短波长的想法，而是直接地跳过去，进入到短得多的可见光区域”。在1957年9月，他草拟了一个方案，希望它是能在光波段工作的第一台激光器，然而他自己发现这不是一个理想的系统，问题仍出在振荡模式上。

就在汤斯深感困惑的时候，他发现贝尔实验室的肖洛(A. L. Schawlow, 1920—)也一直在考虑把微波激光器推广到更短波段的方法。肖洛是汤斯的朋友，他们曾合编写了《微波波谱学》专著。汤斯认为，肖洛是他在华盛顿那天早上得到“神的启示”，作出发明的不自觉的促进者。汤斯在微波激光器方面的研究工作吸引了肖洛，肖洛也开始了这方面的实验。固体微波激光器的成功对肖洛更是一个启示，他认为这可能是产生更短波长的途径，预感到“是认真考虑建立在远红外波段工作的激光器的时候了”，肖洛和汤斯再度合作。

汤斯的方案引起了肖洛的兴趣，他独具慧眼，认为这个方案尽管未能实施，却明确了在红外或可见光波段产生受激辐射要比亚毫米波段容易。对于谐振腔的难题，肖洛提出了一个设想，即把谐振腔的大部分壁去除，以两个相对的反射镜代替腔体，使得沿反射轴线传播的波起振，其余方向的波消失，这实际上是以光学中的F-P\*仪代替谐振腔，从而控制了不必要的振荡模式。肖洛把这一想法告诉汤斯，汤斯认为“这是关键性的建议”，并确信这样的装置，即以F-P仪作为谐振腔能起到选模作用和产生极窄的光束，他们认为“已经有了适当的结构，确信制造出光激光器(即激光器)是可能的”。1958年12月，肖洛和汤斯联名在《物理评论》上发表了《红外与光激光器》一文。

在这篇经典性的文章里，作者们明确指出，使用分子与原子受激辐射过程的放大器与振荡器，原理上可推广到红外和光波段，产生很好的单色辐射。他们详细讨论了在红外和光波段工作的这类激光器的理论问题，尤其讨论了以F-P仪代替微波共振腔减少过剩波型和自发辐射的问题，最后对以钾蒸气为工质，钾灯为泵浦源的红外激光器进行了具体设计。

#### 激烈的竞争和梅曼的意外胜利

肖洛和汤斯的文章使许多人集中到研制激光器上来。在谐振腔这个最主要的难题被解决之后，人们致力寻找合适而又具体的体系和方案实现反转分布，竞相提出许多设计方案。汤斯深信最先可能在钾蒸气中得到成功，认为在那篇论文里提出的设计方案是合理

的，事实上他早就着手试验了；肖洛则转向对红宝石(掺铬的氧化铝晶体)的研究，期待着红宝石能产生激光；苏联列别捷夫物理研究所的巴索夫则提出了以半导体材料来建造激光器的方案。除光泵法外，不少人提出了其他泵浦方法，贝尔实验室的贾万(A. Javan, 1926—)提出可以用放电的方法使氖气得到反转分布，制成可以连续运转的氦氖混合气体激光器。在1959年9月在纽约举行的首届国际量子电子学会议上，提交的有关激光器的设计方案有数十个之多。设计者们都加快了试验的步伐，人人都想摘取第一台激光器发明者的桂冠，一场激烈的竞争正在展开！

出乎人们意料，首先得到成功的是名不见经传的美国休斯飞机公司研究所的梅曼(G. H. Maiman, 1927—)。他最先在红宝石晶体中得到了激光。1960年7月7日纽约时报以《激光器发生的新的原子辐射光》为题作了简单的报道，8月6日英国《自然》杂志发表了梅曼《红宝石的光激射作用》一文，作了较纽约时报略为详细的报道。

然而对于梅曼是否真的得到激光，持怀疑态度的大有人在。人们普遍认为最先可能在气体中获得成功：微波激光器首先是在氨气中成功的，而肖洛和汤斯提出的第一个激光器设计方案又是利用钾蒸气。对于固体，人们并不乐观，尤其是红宝石晶体，肖洛经过一番研究后作出结论，认为它用来产生激光不合适，但梅曼利用的恰是红宝石，这不能不引起怀疑。肖洛等人立即重复了梅曼的实验，证实了他所得到的光具有受激辐射的特点：荧光持续时间缩短，谱线宽度变窄，光具有相干性，梅曼果真得到了激光，他获得了激光器发明的优先权！

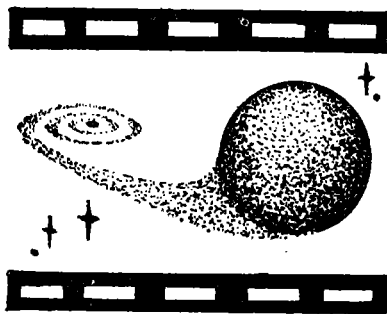
其实，少有名气的梅曼最先获得成功并非偶然，早年他曾在拉姆(W. E. Lamb, 1913—)因在1947年成功地测得氢原子的精细结构而获1955年诺贝尔物理学奖指导下从事原子光谱的研究，受到了熏陶，这使他在以后从事激光研究时受益匪浅。1956年他到休斯研究所后致力于红宝石微波激光器的研究，他成功地做了几项改进，这使他对红宝石的研究深有造诣。梅曼一开始并没打算用红宝石，因为肖洛有过结论，并且有人证明红宝石只有1%的量子效应\*\*。然而红宝石的其他性能吸引了他，经过反复试验，尤其在证实了红宝石的量子效应可高达75%左右，他深信含铬量适当的红宝石晶体是合适的材料，并预料到最先成功的不大可能是气体，因为“它涉及的过程太复杂了”。梅曼确信若用很强的光激励红宝石可能得到激光振荡，1960

\* F-P 仪，即法布里—珀罗仪，它由平行放置的、镀有高反射率的膜层的两平面玻璃板组成，是光学中实现多光束干涉的仪器。

\*\* 量子效应，激光工作物质的重要参数，指发光体发射的光子数与激发时吸收的光子数之比。

# 黑洞的吸积过程

卢炬甫



黑洞是由一个被称为视界的闭合边界所规定的时空区域。这个区域内的引力场是如此之强，以至于没有任何物质能从中逃逸，连光也不例外。也就是说，外部观测者不可能获得视界以内的任何信息。这使得黑洞成为宇宙中最神秘的天体。

对于只能研究视界以外的时空结构和物质运动的物理学家来说，黑洞又是一种最简单的物质形态。一个黑洞比一颗恒星、一块方糖或一个氢原子都要简单得多。任何物质一旦进入视界，就不可能再从外部区分它们原来的形状或成份，不可能再知道所进入的是重子、轻子、光子，亦或暗物质。组成黑洞的物质只保留三个物理参量，即质量、角动量和电荷。这就是所谓“黑洞无毛”定理。

实际上，黑洞的电荷又是不重要的。这是因为，电

磁作用比引力作用要强得多，而黑洞的周围又并非真空。一个带电黑洞就会迅速地吸引带异种电荷的物质而排斥同种电荷，从而达到或非常接近于电中性。所以，宇宙中的黑洞基本上只有两种：角动量为零即不转动的黑洞和角动量不为零即转动的黑洞。它们分别叫做 Schwarzschild 黑洞和 Kerr 黑洞（以下分别简称为 S 黑洞和 K 黑洞）。

黑洞的强大引力必然会不断吸引和捕获周围的物质。这个过程叫做吸积。吸积物质可能是星际气体与尘埃，或是近邻恒星的表层物质，或是恒星被黑洞的潮汐力整个地撕裂后的碎片。这些物质在向黑洞坠落的途中会不断地释放引力势能。对于 S 黑洞，释能效率（即物质落入视界之前所释放的引力能与其总质量能量之比）约为 6%；对于 K 黑洞，更高到约 40%。而作

年 4 月，他做了如下的试验：在边长为 1 厘米的红宝石立方体的两个相对的面上镀上银，以氙闪光灯的强光照射，观察到荧光光谱的线宽变窄，荧光寿命发生了变化，这可能是受激辐射在一定程度上的影响造成的。这个实验使梅曼大受鼓舞。他对红宝石样品和光学谐振腔做了进一步改善：把长约 1.9 厘米，半径为 0.95 厘米的红宝石圆柱体两端面磨平镀上银，置于螺旋形氙闪光灯中心，逐步增强闪光强度，发现荧光增强，谱线宽度变窄，方向性得到改善，梅曼相信他得到了激光振荡（图 3），这已是 1960 年夏天的事了，梅曼借记者招待会公布他的实验结果，这便是纽约时报上最初的

那篇报道的由来。

在梅曼首次成功以后不久，其他人也试制成功几种固体激光器，它们都与梅曼的相类似。人们翘首以待的气体激光器也在这一年年底宣告成功，12 月中旬，贾万等人利用放电在氦氖混合气体中得到了波长为  $1.15\mu\text{m}$  的激光振荡，这是第一台能连续运转的气体激光器。

1960 年是不平凡的一年，现代科学技术的一个宠儿——激光器经过半个世纪的孕育，终于在这一年诞生了。这以后，各种激光器不断出现，其性能不断完善，应用越来越广泛，对现代科学技术的发展发生越来越深刻的影响。

“意外”事件的发生使激光器的发明走过了颇为曲折的道路。在科技史上重大的发现或发明大多不是一帆风顺的，这是因为科学发现和技术发明是一个探索性的认识过程，这个认识过程是曲折复杂的，不可能完全遵循一条预定的路程达到预期的目的，它既有目的性，又有意外性，而这种意外性有时恰恰给出了机遇，提供了重要的线索，导致了新发现、新发明乃至重大突破。此外，我们还可以从激光器的“意外发明”得到有益的启示：守株待兔的懒汉决不能得到这种机遇，只有锲而不舍的人才能获得它。

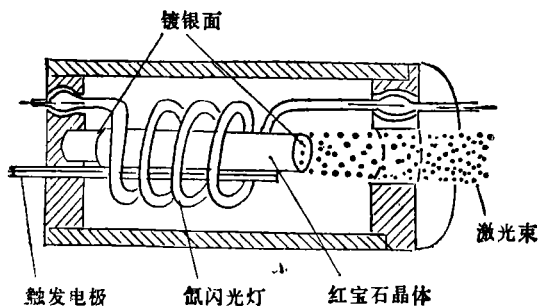


图 3 第一台红宝石激光器