

走进未知世界丛书

人类希望之光

——激光

董克 编

上海交通大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

人类希望之光:激光/董克编. —上海:上海交通大学出版社,2004

(走进未知世界丛书)

ISBN 7-313-03743-0

I. 人... II. 董... III. 激光—普及读物
IV. TN24-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 047979 号

人类希望之光

——激光

董克 编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市文化印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:880mm×1230mm 1/32 印张:7.125 字数:212千字

2004年7月第1版 2004年7月第1次印刷

印数:1-4050

ISBN7-313-03743-0/TN·103 定价:13.00元

我们今天生活的世界是由已知和未知两个领域组成。我们已知的越多,未知的领域就越大。广大的未知领域构成了我们渴望探知的未知世界,未知世界有种魅力,它总是吸引着我们在未知领域发现真理中有所突破,而不是墨守成规。牛顿的万有引力定律、达尔文的进化论正是在这种魅力吸引下探索出来的。

科学是一项伟大的冒险活动,它充满了刺激与振奋。它使人类的求知欲和好奇心得到了满足,并且激发人们的想像力,去欣赏和理解科学技术所带来的种种美妙与神奇。

《走进未知世界》丛书,就是向中国广大青少年提供一条通往未知世界的途径,引导他们大胆走进未知世界,并能在人类未知领域有新的更重大的发现。同时引导他们树立对真理、对科学的求真精神和对天文、物理、原子、生命等未知领域的刻苦追求精神,培养起创新意识和创新能力。

这套丛书从自然科学的角度,向广大青少年展示一个全新的视野——宇宙的奥秘、海洋的神奇、环境的变化、生命的奇幻、物质世界的多彩、微观领域的裂变……弘扬科教兴国的精神。

该丛书以精品意识为导向,面向广大青少年读者精心创作;注重知识性、趣味性和实用性的统一,图文并茂;写作中始终贯彻丛书的主题思想,注意引导读者发现未知世界,培养创新能力;语言通俗易懂,雅俗共赏。

在编写丛书的过程中,所有参编者遵照“应用价值、文化价值、精神价值”相结合的原则精心写作,努力把最能体现人类创造力与想像力的科学成果介绍给广大读者。WTO把中国深深地卷入到了全球化



浪潮中,作为链接科学技术纽带的——《走进未知世界》丛书把我们和科学紧紧地连在了一起,它为广大读者打造了一个再次提升自己的知识平台。如果本书的出版发行确能使读者有所收获,那就是对我们所有编写者莫大的鼓励。

给广大读者出版最好的书,这是所有出版者最大的心愿。《走进未知世界》丛书得以顺利出版,除了我们所有编写者共同努力外,也显示了上海交通大学出版社决策者的创新意识和与时俱进的精神,渗透了本书责任编辑的辛勤汗水。

由于我们的水平有限,书中可能存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2004年3月



激光的发展历程	1
受激辐射理论	3
负色散的研究	3
磁共振中集居数反转的实现	5
微波激射放大器的发明	6
激光的设想	9
激光器的诞生	11
四能级激光器	12
氦氖激光器的诞生	13
激光的基本原理	15
激光产生的简单原理	17
激光的性质	24
激光的特点	42
激光器的分类	44
典型激光器介绍	51
激光器的基本结构	53
气体激光器	57
液体激光器	64
固体激光器	68
自由电子激光器	76
半导体激光器	77
X射线激光器	82
激光的各种应用	89
激光通信及信息处理	91
激光在材料加工中的应用	96
激光在化学中的应用	99
激光在计量学中的应用	104
激光在土木、建筑中的应用	110
激光在医学中的应用	114





激光在军事中的应用.....	121
全息照相.....	206
激光在印刷工业中的应用.....	209
激光技术的未来.....	221
探求无穷的绿色能源——激光核聚 变.....	223
探求宇宙的起源.....	229
激光带来的产业革命.....	235

【目
录】



激光的发展历程

受激辐射理论

1916年,为解释普朗克黑体辐射公式这一当时的难题,物理学家爱因斯坦发表了一篇题为《辐射的量子理论》的论文,他在文章中提出一种崭新的观点,即受激发射的思想。论文写道:

……我们引入下述量子理论假设。在频率为 ν 的辐射密度 ρ 的作用下,一个分子可以吸收辐射能量 $\epsilon_m - \epsilon_n$ 并按几率定律

$$dW = B_{nm}^m \rho dt \quad (1.1)$$

从态 Z_n 跃迁到态 Z_m 。我们同样假定,在辐射作用下,与辐射能释放相联系的跃迁 $Z_m - Z_n$ 是可能的。这一过程满足如下几率定律:

$$dW = B_{nm}^n \rho dt \quad (1.2)$$

这两种过程我们称之为“辐照引起的状态改变”。

在上述第二个假设,即方程 1.2 中,爱因斯坦就提出了我们今天称之为受激发射的概念,只是当时他并未使用这一名词。不久,凡·弗立克(J. Van Vleck)把这一过程称为“感应发射”。

爱因斯坦预言的受激发射现象,是微波量子放大器和激光器运转的主要物理基础,然而他本人从未想到用来构造这样的器件。直到他去世前不久,才发明了第一台受激放大器件即氨分子量子放大器。

负色散的研究

爱因斯坦受激发射理论发表后好几年内,它只在理论物理学家建立光的散射、折射、色散和吸收的量子理论时派上了用场。对色散问题的研究,使一些科学家认识到有可能出现负吸收。但囿于人们对非平衡态认识的局限性,也由于对相干辐射源的需要远不如 20 世纪 50 年代那么迫切,几乎没有人想到负吸收可以用在相平放大电磁波的工作器件上。



经典色散理论主要由特鲁德(P. Drudo)、弗格特(W. Voigt)等建立,并由洛仑兹(H. A. Lorentz)阐明。按照这一理论,原子被看成是一系列阻尼振子的集合,它们的固有频率与光谱的吸收频率相等。在外来电磁波作用下,介质产生极化。在引入复数极比率后,可求得复数折射率的实部和虚部,分别描述光在介质传播时的色散和吸收。从经典色散理论得出的结果虽然部分地与实验相吻合,但这一理论与玻尔的稳态原子模型是完全矛盾的。为了利用量子理论说明色散和吸收,一些著名物理学家,如德拜、索末菲、喇登堡等做了许多工作,尤其是德国光谱学家喇登堡作出了重要贡献。

20世纪20~30年代,喇登堡一直致力于用玻尔模型和爱因斯坦受激发射理论来说明光的色散,得到了一个折射率 n 随波长 λ 变化的量子理论公式:

$$n - 1 = \frac{e^2}{4\pi mc^2} \frac{\lambda_{21}^3}{\lambda - \lambda_{21}} F$$

$$F = N_1 f_{21} \frac{1 - N_2}{N_1} \frac{g_1}{g_2}$$

式中: e 和 m 表示电子的电荷与质量; N_2 与 N_1 分别是高能级2与低能级1的原子数; g_1 与 g_2 表示相应能级的统计权重; λ_{21} 是2→1跃迁的辐射波长; f_{21} 是一系数,称为负色散项,表示由于高能级2有一定的原子数而作的修正; F 叫做色散系数。

喇登堡和其合作者做了一系列实验,研究氖气的色散,观测色散随放电电流密度变化的情况。实验中,放电电流可在0.1~700mA之间变化。实验结果表明,放电电流在100mA以下时,色散系数 F 会随着电流的增加而增加,这说明负色散项中的 $\frac{N_2 g_1}{N_1 g_2}$ 可忽略不计。但当电流超过100mA时,该系数开始下降,这表示高能级的 N_2 值不能忽略。

如果喇登堡继续增加氖的放电电流,可能会发现 F 不断减少并出现 $F < 0$,即 $\frac{N_2 g_1}{N_1 g_2} > 1$,或 $\frac{N_2}{g_2} > \frac{N_1}{g_1}$ 。这意味着在20世纪30年代就可能研制出第一台氖激光器。但正如激光器的奠基者之一肖洛指出的:人们不再继续喇登堡关于反常色散的实验,是因为他们对平衡态如此坚



信不疑,以至认为不可能偏离太远而形成负吸收。

磁共振中集居数反转的实现

在 20 世纪 30~50 年代初长达 20 多年的时间里,受激辐射的概念几乎被人们遗忘。然而这一时期在科学和技术上取得的很多成就对量子放大器的发明有很大影响,其中最重要的是磁共振和光泵,尽管发明这两项技术的科学家本意并非研究受激辐射器件,但他们发展的一些概念和方法对量子电子学是基本的。

第二次世界大战期间,由于发展雷达的需要,微波技术有很大进展。例如,发明了能够发射高功率微波信号的磁控管、用以探测雷达回波的灵敏的晶体探测器、用于弱信号探测的电子线路等,这些发明对磁共振技术的建立有很大帮助。

磁共振是利用物质磁矩在外磁场中分裂的塞曼支能级之间的跃迁来研究物质结构的一种方法。磁矩由原子核引起称为核磁共振。另一种是电子顺磁共振,它利用的是电子轨道和自旋磁矩在外磁场中的不同取向。核磁共振现象由美国科学家珀赛尔在哈佛大学和瑞士科学家布洛赫在斯坦福大学于 1946 年分别发现,而电子顺磁共振现象则由苏联科学家萨沃斯基发现。

用磁共振方法做实验时,常将样品置于两个磁场中,其中一个为静磁场,其作用是使能级分裂;另一个为交变磁场,其方向与静磁场垂直。当交变磁场的频率满足一定的关系时,样品从交变磁场中吸收能量,粒子从较低能级跃迁到较高能级。

1946 年,布洛赫和其合作者在用磁共振方法测量水的弛豫时间时,发现了一个崭新的有趣现象——这一现象对量子放大器的实现具有十分重要的意义。当将静磁场和共振场同时加工水样品时,在示波器上观察到正信号。在突然将磁场降低到显著偏离共振值时,正信号逐渐变小并且消失。出乎意料的是他们在示波器又观察到,在正信号消失之后出现了负信号,而且负信号不断增长,并在几秒钟后增加到最



大值。布洛赫把这一异乎寻常的信号逆转现象,归之于由于外磁场改变而引起质子自旋的重新取向。这一解释虽然是正确的,但他没有将这一现象引申到自旋能级集居数的反转,他的注意力集中在质子弛豫时间的精确测定及其意义上。直到1958年才有人重新研究,并将其应用于二能级固体微波激射器。

1948年,核磁共振的另一发现者珀塞尔有意识地研究了磁场中各子能级的集居数。1951年他和其合作者在实验中实现了粒子数反转,观察到了负吸收,并首次提出了负温度的概念。

1949年,法国物理学家卡斯特勒发展了光泵方法,为此他获得了1971年诺贝尔物理奖。所谓光泵,就是利用光辐照来改变能级粒子数集居的一种方法。卡斯特勒的本意是想利用“原子与辐射进行交换时,角动量必须守恒”这一原理来建立一种用光学方法探测磁共振的灵敏手段,他并未注意到用这种方法可以产生集居数反转,更未想到可通过这一途径进行光放大。10年后,光泵方法开始应用于激光器中。目前,光泵技术有了很大发展,已成为固体激光器的主要抽运手段。

微波激射放大器的发明

微波激射放大器的发明与雷达的深入研究和广泛应用密切相关。在第二次世界大战中,雷达得到了广泛应用,受到交战(或相关)各国的重视。因而,与雷达研制密切相关的微波技术和微波器件均得到了迅速发展,磁共振方法得到研究,这为微波激射放大器的发明奠定了坚实的基础。

1952年,韦伯在参加由著名光谱学家赫兹堡主持的受激辐射讨论会时受到启示,产生了利用受激辐射诱发原子或分子,从而放大电磁波的思想。他提出了微波激射器的原理。韦伯的工作当时并未受到重视,不过汤斯曾向他索取过论述该工作原理的论文。

微波激射器的更完整描述和实验上的实现是由著名的美国物理学家汤斯和其合作者完成的。汤斯是美国南卡罗林纳人,1939年在加州

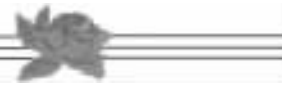
理工学院获博士学位后进入贝尔实验室，第二次世界大战期间被分派从事用于投弹定位的雷达的研制工作。他对此并不感兴趣，他酷爱理论物理研究。当时，美国空军希望提高雷达的工作频率以改善轰炸的定位精度，要求贝尔实验室研制一台频率为24 000MHz的雷达。实验室将这一任务交给了汤斯。汤斯当时指出，这一频率对于雷达是不适宜的，因为水蒸气对辐射会产生强烈的吸收。但空军还是坚持要他做下去。仪器做出来后，结果不出汤斯所料，在军事上毫无价值。不过汤斯非常聪明，他很快意识到这台在军事上一无用途的设备却可以成为研究微波和分子相互作用的有用手段，它的频率和分辨率是当时实验室从未具有的。汤斯用这台设备做了许多前人从未做过的微波波谱工作，并且很快成为这一领域的权威。

这时珀塞尔等在哈佛大学已经实现了粒子数反转，只是信号太弱，还无法加以应用。“并不是人们认为不能实现粒子数反转，而是没有办法放大，无法利用这一效应”。汤斯回忆说。他与别的物理学家一样，正在苦思这个问题。他设想如果将介质置于谐振腔内，利用振荡和反馈，就可以放大。汤斯熟悉无线电工程，所以别人没有想到的他先想到了。关于他是如何构思出第一台微波激光器的，汤斯回忆他于1951年春天在华盛顿参加一个毫米波会议时的情景：

“凑巧，我在旅馆中与我的朋友和同事肖洛同住一房间。清晨我早醒来，为了不致打扰他的睡眠，我出去了，并在附近公园的一个长凳上坐下来，思索(制作毫米波发生器)失败的主要原因。很清楚，需要解决的是找到一种制作统一线度很小的精密谐振腔的方法，这种谐振腔中应具有可以与电磁场耦合的某种能量。可是这是类似于分子的东西，人们要制作这样小的谐振腔并对其提供能量将会遇到技术困难。这意味着要实现这样的结构必须找到一种能够利用分子的途径！或许是清晨新鲜的空气使我茅塞顿开，感到这是可以实现的。几分钟内我拟好了大致方案，并对下列过程进行了计算：将分子束系统中高能态分子从低能态分开，并使其馈入腔内，在腔内存在着电磁辐射以激励分子产生受激发射，于是提供了反馈而保持持续振荡。”

汤斯在会上没有透露任何想法，立即返回哥伦比亚，着手他的研






究。他领导的研究小组成员包括博士后齐格和博士生戈登,后来齐格离开了这个小组,位置由中国学者王天眷接替。日本学者霜田光一参加了工作。汤斯小组选择氨分子气体作为激活介质。氨分子是由三个氢原子和一个氮原子组成的一个三角锥体,其中三个氢原子位于底平面,氮原子则位于顶点。这些原子在各自的平衡位置附近振动,同时分子还绕两个分别位于或垂直于氨平面的轴线转动,由此构成了氨分子的一系列振动和转动能级。此外,位于顶点的氮原子还会越过氨平面来到平面底下,称为反演。反演的结果使氨分子的振转能级分裂为二个能级。对于具有角动量轴向分量为三个单位的转动态,这二个能级之间的跃迁频率为23 870MHz。汤斯决定利用这一对能级间的跃迁实现受激辐射。由于处于这二个能级分子的电矩不同,因此在非均匀电场中将沿不同路径运动。他们设想利用一个强静电场来获得激发态氨分子,并使其聚焦后进入谐振腔,而谐振腔则调谐到对于24 000MHz共振。经过两年的努力,花费了约30 000美元的经费,1953年的一天,戈登兴匆匆冲进汤斯正在出席的一个波谱学会议会场,大叫:“它运转啦!”这就是第一台微波激光器。汤斯和大家商议,给这种新器件取了一个名字,叫做“微波激射放大器”。英文名为“Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation”,简称 MASER(脉塞)。

在汤斯小组进行工作的同时,苏联科学家普洛霍洛夫和巴索夫也进行了类似的研究,探索利用微波波谱方法建立频率和时间的标准。他们认定,只要人为地改变能级的集居数就可以大大增加波谱仪的灵敏度,并且预言,利用受激辐射有可能实现这一目标。他们也用非均匀电场使不同能态的分子分离,不过他们的装置比汤斯小组的晚了几个月才运转。

微波量子放大器的进一步发展,与美国学者布隆姆贝根的工作很有关系。他原是荷兰人,第二次世界大战后到美国,曾参加珀塞尔小组的核磁共振研究。1956年,他提出利用顺磁材料中的塞曼能级做成可调谐的微波激射器。特别值得提出的是,他和前述两位苏联科学家提出了利用三能级系统的思想,这种思想为后来微波激射器和激光器的发展指明了方向。



不久,贾万提出用非线性双光子过程进行微波放大。斯柯雄尔等人在1957年实现了固体顺磁微波激光器,布隆姆贝根等人在1958年也做成了红宝石微波激光器。

至此,激光的出现已是指日可待了。人们经过各方面的努力为激光的诞生做好了各种准备。1958年,许多物理学家活跃在分子束微波波谱学和微波激光器的领域里,他们自然会想到,既然微波可以实现量子放大,可见光的放大也应能实现。

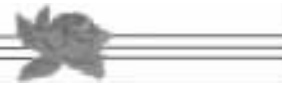
激光的设想

在微波量子放大器发明后,汤斯开始考虑下一阶段他应该做什么。他认为微波波谱学尽管对化学家还有很多工作可做,但对物理学家来说几乎接近完成,该做的差不多都做了。汤斯对射电天文学一直很感兴趣,他甚至想过这时是否应该放弃微波波谱学而转向这一领域。15个月后,他确定应该继续从事的领域还是量子电子学,并且决定与他的朋友肖洛进一步合作。

肖洛于1921年生于美国纽约,在加拿大多伦多大学获博士学位。第二次世界大战后,肖洛听从物理学家拉比的建议,到汤斯手下做博士后,研究微波波谱在有机化学方面的应用。肖洛与汤斯原本不认识,但很快他们成了好朋友。后来肖洛还与汤斯的妹妹结了婚。1951年汤斯到贝尔实验室工作,研究固体中的超导问题。1955年,他们合作写了一本微波波谱学著作。当时,肖洛是贝尔实验室的研究员,汤斯则是那里的顾问。

1957年10月,汤斯作为顾问到贝尔实验室访问,在与肖洛共进午餐时,透露了他正在思考越过远红外波段制作近红外甚至可见光范围的光学激光器的可能性,因为在这一波段范围,不像远红外,光谱的谱线和特征是相当清楚的。正好肖洛当时也在思考是否可以获得更短波长的辐射,于是他们决定合作。汤斯把他记有关于光学激光器的构思和计算笔记本的复本送给肖洛。当时汤斯已经设想了一个光学激光器






的锥型；谐振腔是一个由四面反射镜构成的玻璃盒，内充以铷作为激活介质，并且打算用铷灯的紫外光去激发基态($6p$)铷原子到高能态($6d$ 或 $8s$)。他还对这一方案作了若干计算。不过肖洛很快论证了用铷原子是不适宜的，问题是它的下能级空竭速率要比抽运到上能级慢得多。肖洛认识到，为了激发足够数量的原子或分子进入高能级，必须寻找其他合适振子强度的材料。他查阅了载有有关数据的表格，由于当时碱金属元素的数据相当齐全，最后肖洛选择了其中的钾元素。据肖洛回忆，这种选择并非完全出自技术上的考虑：在他的实验室内唯一的光学仪器是一台海尔格公司的可见光摄谱仪，而钾的第一、二条谱线正好位于可见范围。不过后来发现，由于其他原因，钾并不适宜作为激光介质。

汤斯和肖洛接着考虑光学波段的谐振腔问题。他们一开始就考虑使用尺寸比光波波长大很多的谐振腔。为了实现模式的选择，肖洛设想了多种方案，其中包括利用衍射光栅作为谐振腔腔壁。肖洛最后选择的方案是：除了留下两小块端面外，将谐振腔其余部分都去掉，并且留下的两块中的一块是可以透光的。这就是光学中的法布里-泊罗谐振腔。

1958年春天，肖洛和汤斯决定将他们的研究成果公开发表。在发表之前，他们向贝尔实验室的专利办公室送交了一份复印件，请求他们审查一下是否值得申请专利。但遭到专利办公室的拒绝，理由是“光波对于通信从未有过任何重大影响，因此该项发明对贝尔系统的利益几乎没有意义”。具有讽刺意义的是，在激光器特别是低损耗光纤出现以后，光通信却成了贝尔实验室最重要的研究内容之一。不过在汤斯的坚持下，该项专利还是进行了申请，并于1960年3月获得批准。

肖洛和汤斯的论文在1958年12月《物理学评论》杂志上发表，题目是“红外和光学激射器”。文中具体报道了肖洛用钾做的初步实验。他们提出还可利用铯作工作介质，靠氦谱线进行激发。他们也考虑到了固体器件，然而并不十分乐观，因为固态谱线一般较宽，选模会更困难。他们表示：“可能还有更美妙的解答。也许可以抽运到亚稳态以上的一个态，然后原子会降到亚稳态并且积累起来，直到足以产生激射作用。”尽管第一台运转的激光器并不是论文中预言的工作物质，但这是



一篇公认的激光领域的划时代文献。

激光器的诞生

在肖洛和汤斯的理论指引下,包括肖洛和汤斯在内的许多科学家开始研究如何实现光学激光器。但由于各方面的原因,肖洛和汤斯都未能率先实现光学激光器即激光器。

第一台运转的激光器是以红宝石作为激活介质的固体激光器,它由年轻的美国科学家梅曼于1960年7月在休斯实验室研制成功。梅曼是美国休斯研究实验室量子电子部的负责人。1960年,梅曼才33岁,他于1955年在斯坦福大学获博士学位,研究的正是微波波谱学。在休斯实验室的头五年,他研究微波激光的工作,制作了第一台用液氮冷却的红宝石微波激光器,后来又发展为干冰冷却。1959年秋,梅曼开始研制激光器。由于肖洛和汤斯论文的影响,当时大部分科学家集中于气体介质,特别是用光学方法去激发碱金属蒸气,因此梅曼的发明多少使他们感到意外。梅曼由于在红宝石微波激光器方面的工作,使他预感到红宝石可能会是一种良好的激光材料。例如,红宝石有比较简单的能级结构,较好的机械强度,做成器件后体积很紧凑及运转时不需要低温冷却等。但据有关文献报道,其量子荧光效率只有1%。梅曼起初也相信这一说法,他想进行一些测量来找出红宝石量子效率低的原因,以便作为线索去寻找一些其他材料。使这些材料既具有红宝石的优良性质,又有比较高的量子效率。但测量结果表明红宝石的量子效率较高,可达75%,于是梅曼决定利用红宝石来构成激光器。经过计算,他认识到最重要的是要有高色温(5000K)的泵浦源。起初他设想用汞灯在椭圆柱聚光腔中进行泵实现连续运转,后来发现这种方案比较勉强。他决定利用氙闪光灯来实现脉冲运转。查询了有关商品的技术数据后,他选择了通用电气公司的用于航空摄影的GEFT506闪光灯。这种灯具有螺旋状结构,因此不适合于椭圆柱聚光腔的焦点泵浦方案。梅曼想出了一个巧妙的办法:将红宝石棒插入螺旋圈内部,



并在螺旋灯外部以聚光腔收集射向外部的射线,这样就能使红宝石棒获得足够照明。当时多层介质膜还不很成熟,于是他在红宝石两端蒸镀了银膜。为了提供输出耦合,梅曼利用了研制激射器的经验,在红宝石中央开一小孔,并且通过实验,求出了孔的最佳孔径。

经过几个月的努力,花了近50 000美元,梅曼研制出了世界上第一台激光器。梅曼将其研究成果写成论文,投寄给《物理学评论快报》,不料竟遭拒绝!该刊主编没有搞清楚激光器和微波激射器的区别,误认这是一篇微波激射器方面的文章,而微波激射器发展至今,它的任何进展都不值得很快发表。梅曼只好在《纽约时报》上宣布了这一消息。稍后,梅曼的研究成果在英国《自然》杂志上以简短形式发表。第二年,《物理学评论》杂志才发表了他的详细论文。

四能级激光器

梅曼发明红宝石激光器后才几个月,用掺有三价铈的氟化钙作激活介质的激光器也诞生了。这种激光器按照四能级系统原理工作,这个原理在梅曼的论文中已有详细讨论。它的优点是阈值较低,容易形成振荡。发明者是IBM公司的两位年轻科学家,一位叫索洛金,是布隆姆贝根的研究生;另一位叫史蒂文森,是汤斯的研究生。两人获得博士学位后进入IBM公司从事固体的微波共振研究。肖洛和汤斯的论文发表后,他们决心转向光学激射器的研制,希望找到一种更理想的固体材料,用普通的灯进行抽运。他们先是想把固体的工作介质做成长方形块,表面抛光。光线在固体块中来回往返,最后从切去的一个角输出。只要介质的折射率稍大,光线就可以经全反射几乎无损耗地在里面多次往返,他们选择氟化钙作为基质材料,因为这种材料的折射率正好符合要求。激活离子则考虑稀土元素,因为这类元素具有 $4f$ 壳层。他们在文献中查找资料,最后从前苏联人费阿菲洛夫的论文中找到了两种材料可以掺进氟化钙。一种是与稀土族非常相近的三价铈,在 $2.5\mu\text{m}$ 处产生荧光;另一种是二价钐。这两种结构都属于四能级系统,