



中国激光 史录

雷仕湛 邵兰星 闫海生 薛慧彬 / 编著



復旦大學出版社

中国激光 史录

雷仕湛 邵兰星 闫海生 薛慧彬 / 编著

 复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国激光史录/雷仕湛、邵兰星、闫海生、薛慧彬编著. —上海:复旦大学出版社, 2016. 10
ISBN 978-7-309-12548-1

I. 中… II. ①雷…②邵…③闫…④薛… III. 激光技术-技术史-中国 IV. TN24-092

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 214179 号

中国激光史录

雷仕湛 邵兰星 闫海生 薛慧彬 编著

责任编辑/张志军

复旦大学出版社有限公司出版发行

上海市国权路 579 号 邮编:200433

网址:fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

门市零售:86-21-65642857 团体订购:86-21-65118853

外埠邮购:86-21-65109143

上海市崇明县裕安印刷厂

开本 890 × 1240 1/32 印张 14.625 字数 386 千

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 978-7-309-12548-1/T · 584

定价: 38.00 元

如有印装质量问题, 请向复旦大学出版社有限公司发行部调换。

版权所有 侵权必究

内容提要

本书详实记录了我国激光科学技术发展的历史概貌，介绍了我国科学家在激光器件、激光技术、激光应用各个领域率先提出的设想，以及实验装置和实验观察结果。全书分4章，第一章中国激光史第一页，第二章拓展激光器，第三章开拓激光新技术，第四章开发激光应用。本书供广大激光科学技术工作者、科学史研究者、大专院校师生以及科普爱好者阅读。

本书记载了我国激光科学工作者的智慧、创新能力、艰苦创业精神以及获得的成就，让大众了解我国激光技术的历史，在享受激光技术给生产建设、科学技术发展和生活带来财富、便利的时候，不忘前人曾经的付出，并接过他们的接力棒继续科技创新，进一步发展我国的激光事业。

谨以此书祝贺中国激光器问世 55 周年

序 言

激光技术是 20 世纪最重大的发明之一,它为经典的光学技术注入了全新的活力,开拓了一系列新技术和新学科,创造了新的产业,提高了生产力,为人类创造了巨大财富,丰富了人类的物质文明生活,促进了全球经济发展。

这书记载了我国激光科学工作者的智慧、创新能力、艰苦创业精神以及获得的成就。本书让大众了解激光发展的历史,不忘前人曾经的付出,并接过他们的接力棒,继续科技创新,进一步发展我国激光事业。我国曾经出版过两本激光史书,一本是在 1991 年科学出版社出版的《中国激光史概要》,另外一本是 2013 年国防工业出版社出版的《激光发展史概论》。本书更加完整记录了国内激光发展的历史。

这本书也将是一本内容比较丰富的激光科普著作,表述了激光技术领域各个方向的科学知识,包括基本原理、主要技术、经济效益和社会效益,给予我们整体的清晰认识。

这本书也将是一本科学创新教育教材。本书记载了科学工作者每项激光技术开发研究的设想和实验,向青少年揭示:科学创新来源于实践,来源于科学知识的积累。这本书也记载了科学工作者不畏困难,敢于冲破旧观念,摒弃旧技术,敢于采用新技术的勇气;向科技工作者特别是青少年科学工作者提示:创新还需要勇气,敢冒风险。

这本书也将是激光技术创新项目指南。这本书罗列了各种已经

成功的激光器、激光技术和激光应用项目,通过纵向和横向对比,可以从中找到那些还没有实现的、可以研究开发的内容,构想自己的创新项目。

希望这本书获得大众喜欢。

原上海交通大学校长
原上海市激光学会理事长
上海市科协副主席

谢绳武
二〇一六年六月廿日

前 言

2015年上海激光学会召开激光先进工作者表彰大会上,有些学会理事提议写一本我国激光史,记载我国激光科学工作者在激光技术发展历程中的工作和成就,让大众了解我国激光发展的历史,不忘前人曾经的付出,并接过他们的接力棒,继续科技创新,进一步发展我国激光事业。在后来召开的理事会上,大家认为写这本书很有意义,上海作为我国激光发展的一个重要基地,有条件,也有责任做好这项工作。经过一年多时间的努力,这本书今天终于与读者见面了。

这本书的出版得到了各方面的支持和协助。上海市科学技术协会、上海市激光学会给予了出版资助;上海市激光学会理事长钱列加、中国科学院上海光学精密机械研究所所办主任屈炜和科学传媒主管沈力、福建师范大学谢树森教授等对本书内容选择提出了宝贵意见和建议;中国科学院上海光学精密机械研究所王晓峰、梁鑫、张敏和陶玲等为本书提供了有价值的资料、图片,并对一些图片进行了加工处理;复旦大学出版社对本书的出版提供了很多帮助和支持,使得本书能够顺利出版。在此向他们表示衷心感谢!同时也特别感谢上海交通大学谢绳武教授为本书作序!

目 录

第一章 中国激光史第一页	1
1-1 激光器基本要求	2
一、能级粒子数布居反转	3
二、光学共振腔	6
三、泵浦光源和光学照明系统	11
四、激光工作物质	11
1-2 我国第一台激光器	24
一、实验装置	24
二、实验观察和分析	28
三、命名“激光”	32
第二章 拓展激光器	33
2-1 新型晶体激光器	33
一、掺铀氟化钙($\text{CaF}_2 : \text{U}^{3+}$)激光器	34
二、掺镨氟化钙($\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$)晶体激光器	41
三、掺钕钨酸钙($\text{CaWO}_4 : \text{Nd}^{3+}$)晶体激光器	43
四、掺钕钇铝石榴石($\text{YAG} : \text{Nd}^{3+}$)晶体激光器	47
2-2 玻璃激光器	56
一、玻璃工作物质	56
二、钕玻璃激光器	58
三、钇玻璃激光器	72

2-3	气体激光器	75
	一、气体工作物质的特点	75
	二、激光发射机制	75
	三、第一台气体激光器	76
	四、发现激光新谱线	80
	五、分子气体激光器	82
	六、离子气体激光器	103
	七、金属铜蒸气原子激光器	112
2-4	半导体激光器	119
	一、半导体工作物质的特点	119
	二、实现受激光发射的可能方案	120
	三、砷化镓(GaAs)半导体激光器	122
	四、异质结半导体激光器	124
	五、量子阱半导体激光器	131
	六、垂直腔面发射激光器(VCSEL)	134
2-5	化学激光器	137
	一、光解 CH_3I 化学激光器	139
	二、氯化氢(HCl)化学激光器	140
	三、氟化氢(HF)化学激光器	142
	四、氧碘化学激光器	145
2-6	自由电子激光器	154
	一、工作原理	154
	二、拉曼型自由电子激光器	155
	三、康普顿型自由电子激光器	158
2-7	光纤激光器	161
	一、主要特点	162
	二、激光器结构	162
	三、激光器实验	169

第三章 开拓激光新技术 175

3-1	高激光功率(能量)技术	175
-----	-------------------	-----

一、共振腔 Q 突变技术	175
二、激光锁模技术	188
三、激光脉冲压缩技术	194
3-2 激光放大技术	200
一、激光放大器	200
二、激光放大实验	201
三、激光放大器技术性能指标	202
四、多程激光放大	208
五、再生激光放大器	210
六、啁啾激光脉冲放大	211
3-3 激光频率稳定技术	214
一、频率的稳定性和复现性	216
二、稳频方法	220
三、稳频激光器	222
3-4 非线性光学技术	232
一、光学倍频	233
二、受激散射	249
三、光学非常吸收	264
3-5 激光束控制技术	283
一、激光脉冲整形	283
二、激光焦斑光强均匀化	290
三、激光束调制	292
四、激光选模	302
第四章 开发激光应用	307
4-1 机械工业应用	307
一、激光打孔	307
二、激光切割	311
三、激光焊接	319
四、激光表面强化处理	325
五、激光成形	345

4-2	化学工业应用	358
	一、激光提纯化学原料	358
	二、浓缩铀-235	360
	三、制造纳米材料	362
4-3	通信新应用	366
	一、大气光通信	366
	二、空间激光通信	370
	三、光纤通信	372
4-4	医疗诊断应用	380
	一、激光治疗眼科疾病	380
	二、激光矫正视力缺陷	386
	三、激光手术刀	388
	四、激光针灸	391
	五、激光光动力学治疗(PDT)	394
	六、激光诊断	397
4-5	检测计量应用	403
	一、激光测距	403
	二、激光准直	411
4-6	信息存贮应用	417
	一、激光全息信息存贮技术	417
	二、光盘信息存贮	420
4-7	开创学科新领域	426
	一、激光惯性约束核反应	426
	二、激光深冷原子	431
	三、激光推进	435
	四、激光加速粒子	438
	五、激光光谱学	443

附录	激光技术和应用交流	450
----	-----------------	-----

第一章 中国激光史第一页

电光源自 1879 年发明后便获得了迅速发展,先后制造出的电光源有 5 万多个品种,最小的灯泡比谷粒还小,功率只有零点几瓦;大的电灯灯管有几米长,发光功率几百千瓦。有色温很低的灯泡,如远红外灯泡的色温只有约 650 K;也有色温很高的灯泡,如紫外线灯泡,它的色温就有几万度;有发射单种色光色性的灯泡,也有显色指数接近太阳光的灯泡。不过,尽管种类繁多,但它们的亮度、相干性都不够好,而生产发展、科学实验和国防建设则需要高亮度、高相干性光源。要制造出高亮度、高相干性光源,还得再次变革光源的发光机制。

爱因斯坦在 1917 年发表的“关于辐射的量子理论”的论文中指出,原子吸收外来能量后会从基态或者较低能态跃迁到激发态,这个过程称为激发,或者受激吸收跃迁;激发态的原子可以自行回到能量较低的能态或者基态,并发射光子,这个过程称为自发发射跃迁,发射的光辐射称自发辐射;在激发态的原子也可以在别的光子引诱下返回较低的能态或者基态,并发射光子,这个过程称为受激辐射跃迁,发射的光辐射称受激辐射。受激辐射跃迁发射的光子,与诱导这一跃迁行动的光子性能完全相同。比如,两者的光频率相同,传播方向相同,光电场位相相同。

光源发射的光辐射实际上并不是单个原子提供的,而是大量原子集体提供的。激发态原子做自发辐射跃迁时,每一个在激发态的原子彼此独立地发射光辐射,发射的光波相位没有关联,即发射的光

波没有相干性;每个激发态原子发射的光波频率以及其传播方向可以完全不相同,因此,光源所发射光辐射的亮度和相干性都不会好。如果光源的发光过程是以受激跃迁过程为主,各个原子的辐射行动受到了约束,它们将同步发射,并且朝一个方向发射相同波长的电磁波辐射,显然,这将成为亮度和相干性都很好的光源。

美国科学家汤斯(Charles Townes)在1957年7月提出研究光学波段的受激发射放大器 light amplification by stimulated emission of radiation,简称 laser(激光)。他与同在贝尔实验室的研究员肖洛(Arthur Schawlow)合作,对光激光器工作条件和性能进行细致的研究分析,1958年,他们把研究结果发表在《物理学评论》(*The Phys. Rev.*)杂志上,该论文论证了激光器的可行性,给出了光学振荡条件以及理论计算结果。论文发表后,科学家们便着手研制激光器,经过两年时间的努力,1960年7月美国科学家梅曼(T. Maiman)终于获得成功。

中国科学家也很关注现代光学的发展。1958年汤斯和肖洛的论文发表后,中国科学家随即也积极开展研究这种新型光源,并终于在1961年9月份在中国科学院长春光学精密机械研究所(简称长春光机所)研制成功,开创了中国的激光技术历史。^①1964年,中国科学院上海光学精密机械研究所在上海市成立,这是中国第一所激光专业研究所。

1-1 激光器基本要求

1961年,中国科学院上海光学精密机械研究所王之江院士发表论文,论述了能级粒子数布居反转和容易到达能级粒子数布居反转的原子体系,即激光工作物质;输入能量将原子体系激发到高能态的方法;保持光子不散失而形成振荡(共振腔和感应辐射的发生);输出

① 王之江,光量子放大器的实验方案[J],中国科学院光学精密机械研究所集刊,第一集,1963,1—8。

光功率的性质以及应用等。

王之江(1930—), 1930年10月15日出生于江苏常州, 1952年毕业于大连大学工学院物理系。中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 1991年当选为中国科学院院士(学部委员)。发展了像差理论和像质评价理论, 形成了新的理论体系, 完成了大批光学系统设计, 如照相物镜系统、平面光栅单色仪、长工作距反射显微镜、非球面特大视场目镜、105#大型电影经纬仪物镜等。领导研制成中国第一台激光器, 在技术和原理上有创新。20世纪70年代领导完成了高能量、高亮度钕玻璃激光系统, 在这项工作中解决了一系列理论、技术及工艺问题。其关于某些激光重大应用对亮度要求的判断, 使激光器研究工作避免了盲目性, 对于中国激光科学技术起了积极作用。倡议并具体领导了中国“七五”攻关中激光浓缩铀项目; 倡导中国光信息处理和光计算。

一、能级粒子数布居反转

1. 自发辐射和受激辐射

激光器运转的必要条件是分子(或原子, 统称为粒子)能级布居处于反转状态, 或者说是建立了负温度状态。光源发射的光辐射实际上不是单个原子、分子提供的, 而是大量原子、分子集体提供的。在通常状态下, 集体中的每一个“成员”都是彼此独立地发射光辐射, 它们发射的光波频率、传播方向完全不相同。因此, 光源所发射的光辐射不是单一波长, 而是混杂着许许多多不同的波长, 即光辐射的单色性很差; 其次, 输出的光辐射是朝四面八方传播, 没有定向发射性能。1917年, 著名科学家爱因斯坦(Albert Einstein)在研究光辐射与原子、分子相互作用时指出, 处于激发态的原子、分子可以有两种方式返回能量较低的能态或者基态, 并同时以辐射的形式释放出能态变化的能量, 如图1-1-1所示。一种是由于原子、分子内部原因

自发地返回,即自发辐射过程,在能级 E_2 的原子自发跃迁到能级 E_1 ,发射能量为 $h\nu$ 的光子;另外一种方式是在外来的辐射诱导下发生的,即受激辐射过程,在能级 E_2 的原子受能量为 $h\nu$ 的光子诱导跃迁到能级 E_1 ,并发射能量相同的光子。

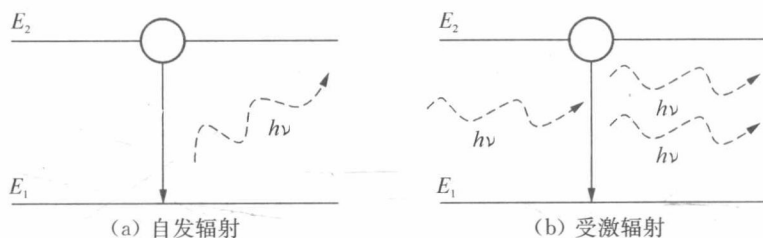


图 1-1-1 自发辐射跃迁和受激辐射跃迁

受激辐射有一个显著的特点,它的频率、传播方向都与诱导其发生跃迁的光子相同。显然,如果粒子集体内每个处于激发态的“成员”都做受激辐射,便等同于把众多粒子的发射行动联合成整体,此时的光源便可以输出单一波长、朝一个方向传播的光波,这种光源便是激光器。在实际光源里,属于受激辐射的成分的确太少,实际得到的几乎全是自发辐射。光辐射在通过原子或者分子集体时,其能量总是减少而不是增强。因为光辐射与物质相互作用时,除了发生自发辐射、受激辐射这两个过程外,还同时发生第三种过程,即受激吸收过程:粒子吸收在其中通过的光辐射能量,并从基态或者能量较低的能态跃迁到高能态。正是这个受激吸收过程,使得光辐射总是被物质吸收而导致其强度下降。不过,根据爱因斯坦的辐射理论,粒子发生受激发射和受激吸收的几率是相同的。如果处于高能态的粒子数比处于低能态或者基态的数量多,这种状态称为能级粒子数布居反转,那么粒子系统内发生受激发射过程的几率将胜过受激吸收过程,光辐射通过粒子系统时便被放大。

2. 能级粒子数布居反转

图 1-1-2 所示是原子的 4 个能级,其中 E_b 是基态,其余 3 个是激发态。 E_1 、 E_2 、 E_a 和 E_b 分别代表它们所处能态的能量,而且

$E_a > E_2 > E_1$ 。外来的能量把原子从基态 E_b 激发到能级 E_a ，然后原子从这个能级转移到能级 E_2 。假如能级 E_b 与能级 E_a 之间的光学跃迁几率很大，使得能级 E_a 能够获得很高的激发速率；同时假定能级 E_a 向能级 E_2 的弛豫（自发辐射及无辐射跃迁）速率比能级 E_a 向能级 E_b 的弛豫速率大，再假定能级 E_2 与能级 E_1 之间的光学跃迁几率比较小（即能级 E_2 是亚稳态）。那么，这就保证了能级 E_2 有比较高的增长速率。原子在满足这些要求时，在能级 E_2 与能级 E_1 之间便可以实现能级粒子数布居反转状态。

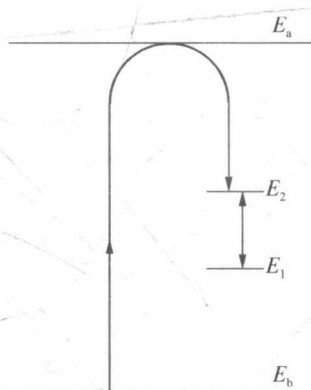


图 1-1-2 建立原子能级粒子数分布反转的分析简图

若能级 E_1 与能级 E_b 重合（这就是三能级系统），这种情况也可以实现能级粒子数布层反转；若能级 E_1 与能级 E_b 不重合，而能级 E_a 与能级 E_2 重合，那么获得能级粒子数布层反转状态的可能性很小。因为能级 E_a 与能级 E_1 之间的光学跃迁几率小，在能级 E_a 的粒子将通过其他途径转移出去，如向能级 E_b 转移。而如果能级 E_a 与能级 E_1 的光学跃迁几率大，要维持在这个能态很高的粒子数流出率，便必须给予它很高的泵浦功率。假如能级 E_a 与能级 E_2 重合，能级 E_1 与能级 E_b 重合，即二能级系统，则不大可能实现能级粒子数布居反转状态，起码使用光学泵浦的方式是这样。

因此，使用光学泵浦方法实现能级粒子数布居反转状态，对激光工作物质的基本要求是：首先能够尽可能多地吸收泵浦光源所发出的光功率，即应该有宽的光谱吸收带，因为光源发射的光功率总是分布在较宽的光谱带；其次是要有亚稳态，因为在光频区域，非亚稳态的自发辐射几率很高，使得高能态粒子数不易积累、增加；第三是吸收带的粒子能以尽可能高的效率转移到亚稳态，很少通过自发辐射回到基态。最好在基态和亚稳态之间具有另外一个底部能级，由亚