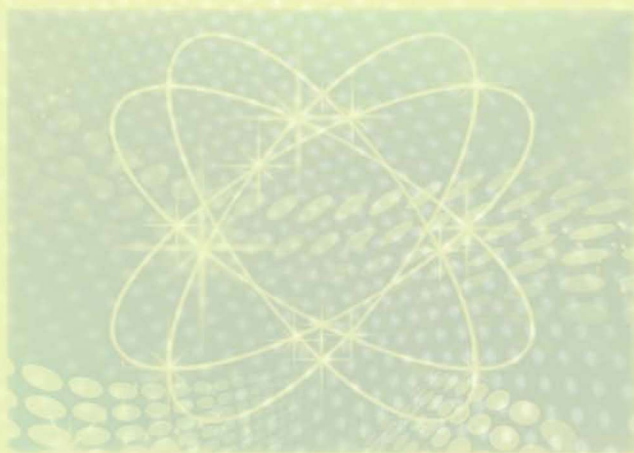


激光制造技术

刘顺洪 等 编著



华中科技大学出版社

研究生教学用书
专 业 课 系 列

激光制造技术

刘顺洪 等 编著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书共分 8 章,对激光产生的基本原理、特性以及各种工业激光器进行了介绍;较详细论述了各种激光制造的原理、方法以及实际应用,同时也介绍了各种激光制造方法的最新研究进展。

本书适用于从事激光加工方向研究的专业人员,大专院校材料加工以及机械类本科生、研究生作为教科书使用,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光制造技术/刘顺洪 等 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2011.6
ISBN 978-7-5609-6954-1

I. 激… II. 刘… III. 激光加工-研究生-教学参考资料 IV. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 035658 号

激光制造技术

刘顺洪 等 编著

策划编辑:徐正达

责任编辑:邵 勇

封面设计:潘 群

责任校对:周 娟

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:湖北通山金地印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:22.5

字 数:478 千字

版 次:2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:36.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

《研究生教学用书》序

“接天莲叶无穷碧，映日荷花别样红。”今天，我国的教育正处在一个大发展的崭新时期，而高等教育即将跨入“大众化”的阶段，蓬蓬勃勃，生机无限。在高等教育中，研究生教育的发展尤为迅速。在盛夏已临，面对池塘中亭亭玉立的荷花，风来舞举的莲叶，我深深感到，我国研究生教育就似夏季映日的红莲，别样多姿。

科教兴国，教育先行。教育在社会主义现代化建设中处于优先发展的战略地位。我们可以清楚看到，高等教育不仅被赋予重大的历史任务，而且明确提出，要培养一大批拔尖创新人才。不言而喻，培养一大批拔尖创新人才的历史任务主要落在研究生教育肩上。“百年大计，教育为本；国家兴亡，人才为基。”国家之间的激烈竞争，在今天，归根结底，最关键的就是高级专门人才，特别是拔尖创新人才的竞争。由此观之，研究生教育的任务可谓重矣！重如泰山！

前事不忘，后事之师。历史经验已一而再、再而三地证明：一个国家的富强，一个民族的繁荣，最根本的是要依靠自己，要以“自力更生”为主。《国际歌》讲得十分深刻，世界上从来就没有什么救世主，只有靠自己救自己。寄希望于别人，期美好于外力，只能是一种幼稚的幻想。内因是发展的决定性的因素。当然，我们决不应该也决不可能采取“闭关锁国”、自我封闭、故步自封的方式来谋求发展，重犯历史错误。外因始终是发展的必要条件。正因为如此，我们清醒看到了，“自助者人助”，只有“自信、自尊、自主、自强”，只有独立自主，自强不息，走以“自力更生”为主的发展道路，才有可能在向世界开放中，争取到更多的朋友，争取到更多的支持，充分利用好外部的各种有利条件，来扎扎实实地而又尽可能快地发展自己。这一切的关键就在于，我们要有数量与质量足够的高级专门人才，特别是拔尖创新人才。何况，在科技高速发展与高度发达，而知识经济已初见端倪的今天，更加如此。人才，高级专门人才，拔尖创新人才，是我们一切事业发展的基础。基础不牢，地动山摇；基础坚牢，大厦凌霄；基础不固，木凋树枯；基础深固，硕茂葱绿！

“工欲善其事，必先利其器。”自古凡事皆然，教育也不例外。教学用书是“传道授业解惑”培育人才的基本条件之一。“巧妇难为无米之炊。”特别是在今天，学科的交叉及其发展越来越多及越快，人才的知识基础及其要求越来越广及越高，因此，我一贯赞成与支持出版“研究生教学用书”，供研究生自己主动地选用。早在1990年，本套用书中的第一本即《机械工程测试·信息·信号分析》出版时，

我就为此书写了个“代序”，其中提出：一个研究生应该博览群书，博采百家，思路开阔，有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此，有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在某一特定方面，他也可选择一本有关这一特定方面的书作为了解与学习这方面知识的参考；如果一个研究生的主要兴趣与工作在这一特定方面，他更应选择一本有关的书作为主要的学习用书，寻觅主要学习线索，并缘此展开，博览群书。这就是我赞成要编写系列的“研究生教学用书”的原因。今天，我仍然如此来看。

还应提及一点，在教育界有人讲，要教学生“做中学”，这有道理；但须补充一句，“学中做”。既要在实践中学习，又要在学习中实践，学习与实践紧密结合，方为全面；重要的是，结合的关键在于引导学生思考，学生积极主动思考。当然，学生的层次不同，结合的方式与程度就应不同，思考的深度也应不同。对研究生特别是对博士研究生，就必须是而且也应该是“研中学，学中研”，在研究这一实践中，开动脑筋，努力学习，在学习这一过程中，开动脑筋，努力研究；甚至可以讲，研与学通过思考就是一回事情了。正因为如此，“研究生教学用书”就大有英雄用武之地，供学习之用，供研究之用，供思考之用。

在此，还应进一步讲明一点。作为一个研究生，来读“研究生教学用书”中的某书或其他有关的书，有的书要精读，有的书可泛读。记住了书上的知识，明白了书上的知识，当然重要；如果能照着用，当然更重要。因为知识是基础。有知识不一定有力量，没有知识就一定没有力量，千万千万不要轻视知识。对研究生特别是博士研究生而言，最为重要的还不是知识本身这个形而下，而是以知识作为基础，努力通过某种实践，同时深入独立思考而体悟到的形而上，即《老子》所讲的不可道的“常道”，即思维能力的提高，即精神境界的升华。《周易·系辞》讲了：“形而上谓之道，形而下谓之器。”我们的研究生要有器，要有具体的知识，要读书，这是基础；但更要有“道”，更要一般，要体悟出的形而上。《庄子·天道》讲得多么好：“书不过语。语之所贵者意也，意有所随。意之所随者，不可以言传也。”这个“意”，就是孔子所讲的“一以贯之”的“一”，就是“道”，就是形而上。它比语、比书，重要多了。要能体悟出形而上，一定要有足够数量的知识作为必不可少的基础，一定要在读书去获得知识时，整体地读，重点地读，反复地读；整体地想，重点地想，反复地想。如同韩愈在《进学解》中所讲的那样，能“提其要”，“钩其玄”，以达到南宋张孝祥所讲的“悠然心会，妙处难与君说”的体悟，化知识为己之素质，为“活水源头”。这样，就可驾驭知识，发展知识，创新知识，而不是为知识所驾驭，为知识所奴役，成为计算机的存储装置。

这套“研究生教学用书”从第一本于1990年问世至今，在蓬勃发展已形成了一定规模。“逝者如斯夫，不舍昼夜。”它们中间，有的获得了国家级、省部级教材奖、图书奖，有的为教育部列入向全国推荐的研究生教材。采用此书的一些兄

弟院校教师纷纷来信,称赞此书为研究生培养与学科建设作出了贡献。我们深深感激这些鼓励,“中心藏之,何日忘之?!”没有读者与专家的关爱,就没有我们“研究生教学用书”的发展。

唐代大文豪李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,物无足纯,人无完人,文无完文,书无完书。“完”全了,就没有发展了,也就“完”蛋了。这套“研究生教学用书”更不会例外。这套书如何?某本书如何?这样的或那样的错误、不妥、疏忽或不足,必然会有。但是,我们又必须积极、及时、认真而不断地加以改进,与时俱进,奋发前进。我们衷心希望与真挚感谢读者与专家不吝指教,及时批评。当局者迷,兼听则明;“嚶其鸣矣,求其友声。”这就是我们肺腑之言。当然,在这里,还应该深深感谢“研究生教学用书”的作者、审阅者、组织者(华中科技大学研究生院的有关领导和工作人员)与出版者(华中科技大学出版社的编辑、校对及其全体同志);深深感谢对“研究生教学用书”的一切关心者与支持者,没有他们,就决不会有今天的“研究生教学用书”。

我们真挚祝愿,在我们举国上下,万众一心,深入贯彻落实科学发展观,努力全面建设小康社会,加速推进社会主义现代化,为实现中华民族伟大复兴,“芙蓉国里尽朝晖”这一壮丽事业中,让我们共同努力,为培养数以千万计高级专门人才,特别是一大批拔尖创新人才,完成历史赋予研究生教育的重大任务而作出应有的贡献。

谨为之序。

中国科学院院士
华中科技大学学术委员会主任
杨叔子

前 言

激光于 20 世纪 60 年代问世,现已成为广泛应用于工业生产、通信、信息处理、医疗卫生、军事、文化教育及科学研究等各个领域的通用技术,对于促进科学技术的发展,提高生产率,形成新的产业,作出了很大贡献。

本书是编者在给硕士研究生讲述激光加工技术十几年课程的讲义基础上,结合从事激光制造科研过程中的成果进行编撰的。作为研究生选修课程的教学用书,主要介绍激光加工理论和工艺等基本知识,激光产生的基本原理,激光器和光学传输系统,使读者了解激光的特点和原理。同时较详细介绍了各种激光加工的原理、方法及应用。本书由激光的产生及特点,工业激光器及激光加工系统,激光与物质相互作用,激光焊接技术,激光弯曲成形技术,激光切割技术,激光表面改性技术和激光快速成形技术共 8 章内容组成。

本书适用于大专院校的机械、材料和材料成形与控制专业的激光制造技术课程的教学用书,也可作为从事激光加工的科技人员的参考用书。本书第 1 章的 1.6~1.7 节和第 2 章由唐霞辉和邓前松编写;第 8 章由莫建华编写;其余各章由刘顺洪编写。全书由刘顺洪统稿。书中参考、引用了一些文献资料,这里向文献资料的作者表示感谢。

本书的出版获得华中科技大学研究生教改基金的资助,一并表示感谢。

激光制造技术涉及多学科,综合集成了激光技术、新材料、计算机与数控等现代制造技术。不断出现新问题和新的研究课题,在激光领域促使人们不断探索研究。

由于编者水平有限,书中难免出现错误,恳请读者批评指正。

编 者

2010.10

目 录

绪论	(1)
第 1 章 激光的产生及其特点	(5)
1.1 激光产生的基本原理	(5)
1.2 光学谐振腔	(10)
1.3 激活介质	(16)
1.4 激励(泵浦)系统	(25)
1.5 激光光束特性	(25)
1.6 光束传输特性	(28)
1.7 激光束的聚焦特性	(29)
第 2 章 工业激光器及其激光加工系统	(33)
2.1 高功率 CO ₂ 气体激光器	(33)
2.2 高功率固体激光器	(44)
2.3 高功率激光加工系统	(52)
第 3 章 激光与物质的相互作用	(61)
3.1 激光对材料的加热效应	(61)
3.2 金属表面对激光的吸收与反射	(65)
3.3 激光致等离子体效应	(74)
3.4 激光对材料的加热模型	(87)
3.5 激光加工的解析解热源模型	(89)
3.6 激光深熔焊接的数值解热源模型	(90)
3.7 激光焊接热源模型的选取	(96)
第 4 章 激光焊接技术	(98)
4.1 激光焊接机理	(98)
4.2 激光焊接的工艺特性	(104)
4.3 激光焊接新方法	(114)
4.4 激光焊接过程监测与质量控制	(137)
第 5 章 激光弯曲成形技术	(143)
5.1 激光弯曲成形机理	(143)
5.2 激光弯曲数学模型	(146)
5.3 激光弯曲的工艺特性	(163)
5.4 激光弯曲的自动控制系统	(177)

5.5	激光弯曲的应用	(178)
第 6 章	激光切割技术	(186)
6.1	概述	(186)
6.2	激光切割机理	(189)
6.3	激光切割的影响因素	(191)
6.4	质量评价	(200)
6.5	各种材料的激光切割	(205)
6.6	激光切割的新发展	(210)
第 7 章	激光表面改性技术	(224)
7.1	激光相变及熔凝相变强化	(224)
7.2	激光熔覆改性技术	(237)
7.3	激光表面合金化	(260)
7.4	激光冲击处理	(265)
7.5	激光快速制造技术	(267)
第 8 章	激光快速成形技术	(284)
8.1	液态树脂激光固化成形	(284)
8.2	选择性激光烧结成形	(302)
8.3	薄材叠层快速成形技术	(343)

绪 论

激光加工分为激光热加工和激光光化学反应加工两类。激光热加工是指激光束射入物体所引起的快速热效应的各种加工过程。激光光化学反应加工是借助高密度高能光子引发或控制光化学反应的各种加工过程。

激光经聚焦后,功率密度可达 $10^4 \sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 。加工工件置于激光焦点附近进行加热,激光加热过程实际上是激光束与金属表面相互作用的过程。

高功率激光光束作用于靶材时,靶材表面吸收大量激光能量,引起温度升高、熔融、汽化、喷溅等现象。具体过程依赖于激光参数(能量、波长及脉宽等)、材料特征和环境条件。

激光脉宽为 10 ms 左右时,聚焦功率密度为 10^4 W/cm^2 ,作用于金属表面时,主要产生温升相变现象,用做激光相变硬化。

激光作用时间在 4~10 s 之间时,聚焦功率密度将在 $10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ 的范围内,金属材料除了产生温升、熔化现象之外,还有气化,也会产生激波和弦波,用于熔化、焊接、合金化和熔覆。

激光作用时间在 10^{-4} s 时,聚焦功率密度将在 $10^7 \sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 的范围内,金属材料除了产生温升、熔化现象之外,主要是汽化,同时还存在激波和弦波的冲击,主要用于打孔、切割、划线和微调等。

激光作用时间小于 10^{-6} s 时,聚焦功率密度将增加到 10^{11} W/cm^2 ,除了产生上述现象外,金属内热压缩激波和金属表面上产生的弦波冲击效应成为主要现象,主要用于冲击硬化。

激光作为一种受激辐射放大的光,具备高亮度、高方向性、高单色性、高相干性,以及特殊的空间分布特性、时间控制特性、偏振特性等,可以获得高达 10^{11} W/cm^2 的聚焦功率密度,其巨大的能量集中在非常小的范围内,能迅速使材料局部温度升到上万摄氏度的高温,并能以 10^{12} K/s 的冷却速度进行冷却,激光加工是一种无与伦比的材料加工方法。激光加工具有高精度、高质量、高效率、非接触性、洁净无污染、参数精密控制和高度自动化等特性。这些特性为先进制造技术提供了新的生长点、强有力的深层次研究工具和新技术的突破点。激光加工技术综合集成了光学、激光、数控、计算机、材料科学、凝固理论、物理冶金及化学冶金学、机电及传感监测和控制等现代科学技术,其自身的开放性和适应性又使其渗透到其他学科,是目前国际上极为活跃并富有成果的高新前沿研究领域,世界各国均投入大量的资金和人力对其深入开展了广泛的研究,得到了大量成果。当代激光加工已由一种具有特殊用途的加工技术发展成为较通用的、具有多种用途的加工技术。激光加工作为先进制造技术中

极为重要的组成部分,反映了当代科学与技术发展的趋势,是 21 世纪材料加工的主要方法之一,其在工业中所占比重已成为衡量一个国家工业加工水平高低的重要指标之一。

激光加工是一种具有高度柔性和智能化的先进制造技术,被誉为 21 世纪的“万能加工工具”、“未来制造系统的共同加工手段”。激光自从问世以来,以其独有的特点在很多领域获得广泛的应用,如图 0.1 所示。而激光制造技术只是激光应用的一个方面。

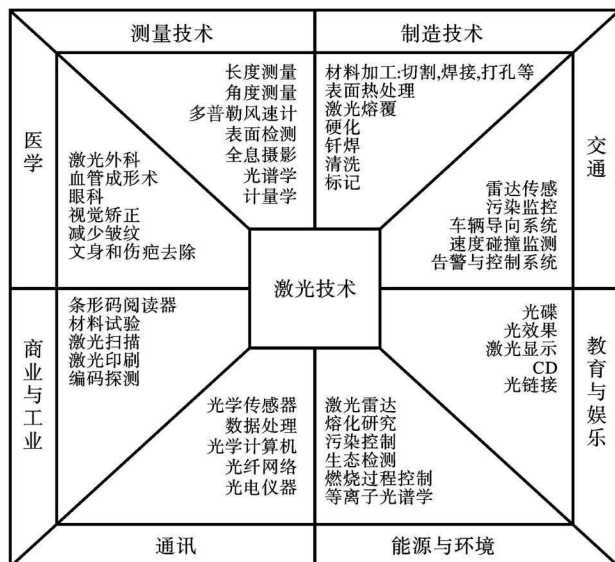


图 0.1 激光应用简图

激光制造的范畴包括以下几个加工领域:① 表面改性(硬化、熔覆、非晶化、润湿等);② 焊接(传热焊、深熔焊、软钎焊、硬钎焊等);③ 划线、打孔、切割;④ 电阻微调;⑤ 弯曲成形;⑥ 打标;⑦ 雕刻;⑧ 钢板毛化;⑨ 烧结,合成微粉;⑩ 快速制造;⑪ 辅助机械加工;⑫ 快速原型制造;⑬ 微加工与微成形。

除上述激光直接制造的技术外,激光还广泛作为制造行业的热源或光源(能量)。

随着激光工作物质的研究与开发、器件与单元技术的改进和创新,以高性能、宽波段、大功率为特征的激光技术取得了蓬勃的发展。尤其是光纤激光的出现,使激光制造的移动定位加工变得极为便利。激光制造技术与传统的制造技术相比,其突出的优势主要表现在对一些特种材料、特殊场合、特别要求的加工制造。

我国激光技术的研究开始于 20 世纪 60 年代。1963 年进行了红宝石激光打孔的研究;1965 年研究成功激光打孔机,应用于拉丝模和钟表轴承打孔;1974 年成功地用直管封离式 CO_2 激光对金属进行切割加工;1978 年研制成功了千瓦级横流 CO_2 激光器。通过国家“七五”、“八五”、“九五”攻关,激光技术已经获得了广泛的应用,已完成的项目:实用化大功率激光器及加工机研制;汽车缸体激光热处理中试线;硅钢

片激光焊接工艺;各类材料激光切割工艺;五轴三联动激光切割机研制;特种材料激光加工工艺及新型激光器的研究;厚板及齿轮激光深熔焊接;激光毛化轧辊;激光雕刻印染辊;轧辊激光熔覆;激光汽车板拼焊与切割关键技术的研究;激光数控技术的研究。现在,已经能生产成套的激光热处理设备和激光切割机,如图 0.2、图 0.3 所示。焊接设备如图 0.4 所示。激光毛化技术与装备在钢厂获得应用,如图 0.5 所示。激光焊接双联汽车齿轮用于生产制造,如图 0.6 所示。能够在大型机车用曲轴上进行激光熔覆,图 0.7 所示。由华中科技大学研制生产,应用于原北京吉普的发动



图 0.2 激光热处理设备

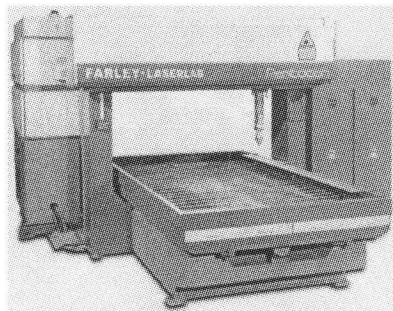


图 0.3 激光切割机

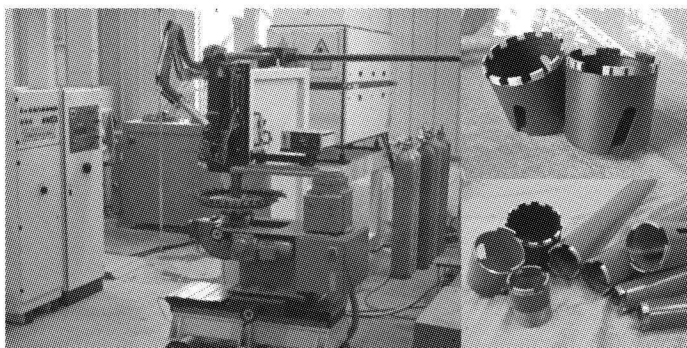


图 0.4 金刚石钻头激光焊接设备

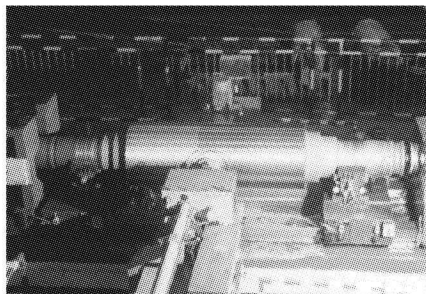


图 0.5 激光毛化设备

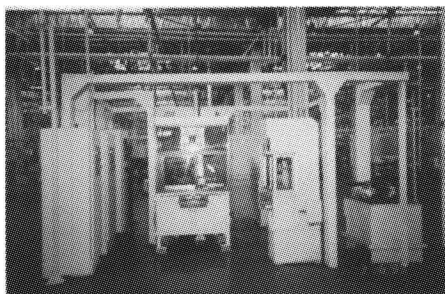


图 0.6 激光焊接汽车齿轮生产线设备

机气缸缸孔的激光热处理强化的生产线,是国内第一条将激光热处理用于发动机气缸的加工生产线,如图 0.8 所示。

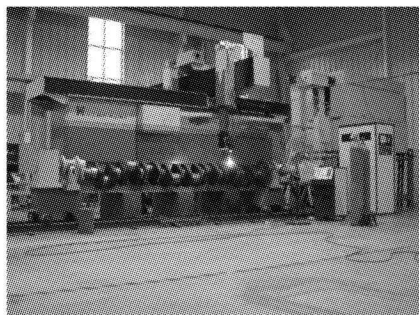


图 0.7 大型曲轴的激光熔覆设备

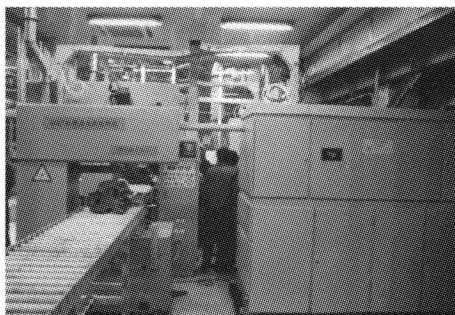


图 0.8 发动机缸体激光淬火生产线设备

激光制造技术已在汽车行业的汽车拼板和双联齿轮焊接以及发动机强化等方面得到应用;在冶金行业的轧辊强化、轧板焊接、轧辊毛化等方面进行应用。激光切割技术已成为常用的加工方式。激光器及其加工设备已实现横流万瓦级的商品化、系列化,轴流激光器也已商品化,激光加工设备已成套化。

参 考 文 献

- [1] 钟敏霖,刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008,11(35):1563-1659.
- [2] 左铁钊,陈继民. 进制造技术——现代光制造技术[J]. 电加工与模具,2003,2: 10-12.

第 1 章 激光的产生及其特点

激光的出现,一方面使电子学的概念、理论和技术推进到光频电磁波段,产生了光频电子学;另一方面使传统光学的面貌发生了革命性的变化,产生了量子光学、信息光学和非线性光学,统称现代光学。光频电子学和现代光学融为一体,称为光子学。

1.1 激光产生的基本原理

1.1.1 爱因斯坦关系

激光也是一种光源。爱因斯坦关系不仅表明了激光与普通光源的差别,而且奠定了激光发明的理论基础。爱因斯坦关系是指爱因斯坦重新研究黑体辐射定律时,所揭示的由发光物体特性决定的一组关系式,即

$$A_{21}/B_{21}=n_{\nu}h\nu \quad (1.1)$$

$$B_{12}=B_{21} \quad (1.2)$$

这组关系式给出了激光发射的可能性。描述普通热光源(视为黑体)发光特性的普朗克公式为

$$\rho(\nu, T)=n_{\nu}h\nu\bar{n} \quad (1.3)$$

式中: $\rho(\nu, T)$ 为黑体腔内在温度 T 下、频率 ν 处,单位频带中辐射的能量密度; $n_{\nu}=8\pi\nu^2/c^3$ 为频率 ν 处单位频带中,光波模式(或光子态)数的密度, c 是光速; $\bar{n}$ 为一个光波模式(或一个光子态)中平均分布的光子数目,亦称为光子简并度,且

$$\bar{n}=[\exp(h\nu/k_{\text{B}}T)-1]^{-1} \quad (1.4)$$

式中: $h\nu$ 为一个频率为 ν 的光子的能量; h 为普朗克常数; k_{B} 为玻尔兹曼常数。式(1.3)已被所有实验证实,但没有解析光场与黑体之间的相互作用是怎样进行的。

爱因斯坦提出这个相互作用是按照三个过程,即自发辐射、受激吸收和受激辐射过程进行的。光场用 $h\nu$ 表示,黑体腔用 E_1 、 E_2 两个能级及相应的粒子数 n_1 、 n_2 表示。相互作用结果用 n_1 、 n_2 随时间的变化——粒子数方程体现。

自发辐射是指处于上能级 E_2 上的粒子本能地或自发地以跃迁概率 A_{21} 向下能级 E_1 跃迁,同时发射一个光子, $h\nu=E_2-E_1$,称为自发辐射光子。其运动方向、偏振状态、初相位完全是随机的,无法人工控制,普通光源就是这种性质,所以自发辐射一定是一种非相干性光。

受激吸收是指在 $\rho(\nu, T)$ 作用下,只要 $h\nu=E_2-E_1$ 满足条件,粒子将吸收光子而

从 E_1 上跃到 E_2 中, 结果是 n_1 减少而 n_2 增加。对大量粒子而言, 任意一个粒子能发生这个上跃迁是完全随机的, 其上跃迁概率 $W_{12} = \rho(\nu, T) B_{12}$, 其中 B_{12} 为爱因斯坦上跃迁系数, 由物质性质决定。

受激辐射是指在 $\rho(\nu, T)$ 作用下, 只要 $h\nu = E_2 - E_1$ 条件满足, E_2 上的粒子在还来不及自发下跃迁时, 在外来光子的作用下受激地向 E_1 跃迁, 同时发射一个与外来光子全同的光子, 即频率、相位、偏振和运动方向完全相同的光子, 这是一个受控过程, 如图 1.1 所示。受激辐射概率 $W_{21} = \rho(\nu, T) B_{21}$, 其中, B_{21} 为爱因斯坦受激下跃迁系数。

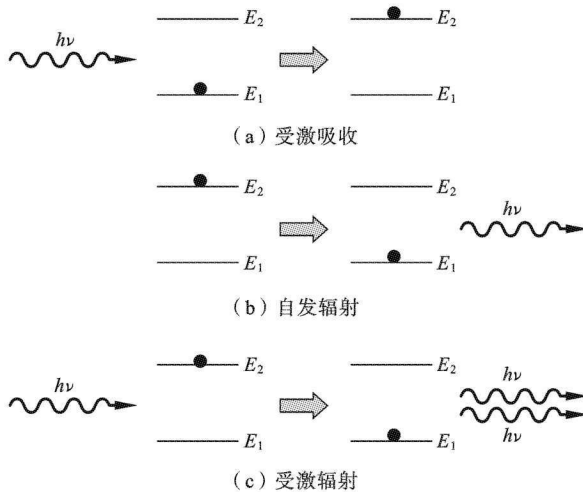


图 1.1 辐射与物质的相互作用

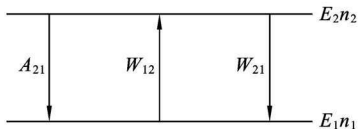


图 1.2 三种过程同时发生

实际上, 在 $\rho(\nu, T)$ 作用下, 三个过程是同时发生的, 如图 1.2 所示。在热平衡 (T 一定) 下, E_1 、 E_2 上的粒子数应保持不变, 而且满足玻尔兹曼定律

$$n_1/n_2 = \exp(h\nu/k_B T) \quad (1.5)$$

由此, 得到了一个 $\rho(\nu, T)$ 的表示式为

$$\rho(\nu, T) = (A_{21}/B_{21})(B_{12}/B_{21}) \exp(h\nu/k_B T) - 1 \quad (1.6)$$

比较式(1.3)和式(1.6), 得到爱因斯坦关系式(1.1)和式(1.2)。下面讨论它的意义。将注意力集中到光子简并度上, 将式(1.1)代入式(1.3)得

$$\bar{n} = B_{21}\rho(\nu, T)/A_{21} = W_{21}/A_{12} = 1/[\exp(h\nu/k_B T) - 1] \quad (1.7)$$

在光频区, $h\nu \gg k_B T$, 式(1.7)简化为

$$\bar{n} = W_{21}/A_{12} = \exp(-h\nu/k_B T) \ll 1 \quad (1.8)$$

得到第一个结论: 光频区自发辐射过程占优势, $A_{21} \gg W_{21}$, $\bar{n} \ll 1$ 。

从式(1.3)又得

$$\rho(\nu, T)/h\nu n_\nu = \text{光子数目/模式数目} \quad (1.9)$$

$\bar{n} \ll 1$, 表明模式数目远大于光子总数。这就是普通光源发光的重要特性——有限的光子分配在大量的模式(或光子态)中。因为同模的光波才相干, 所以普通光源所发出的光是非相干性光。

在低频区(微波频率以下), $h\nu \ll k_B T$, 式(1.7)可简化为

$$\bar{n} = W_{21}/A_{21} = k_B T/h\nu \gg 1 \quad (1.10)$$

得到第二个结论: 在低频区总是受激辐射占优势, $W_{21} \gg A_{21}$, $\bar{n} \gg 1$ 。同样, 从式(1.9)可知, $\bar{n} \gg 1$, 表明光子数目远大于模式数目。这是在电子学中对电磁辐射性质的深刻认识, 有加速度的电子运动才能辐射电磁波。利用谐振回路或封闭谐振就能实现少数个模式工作, 甚至是单一模式工作, 从而可人为控制大量电子运动产生出相干的电磁波辐射。当按这一思路发展到光频时, 封闭腔变成微米数量级, 没有任何意义了。这就是爱因斯坦关系表明的电子学和光子学之间, 存在不可逾越的鸿沟的物理原因。爱因斯坦关系不仅告诉我们如何认识发光过程的物理本质, 还表明了激光产生的物理途径。

1.1.2 激光产生的必要条件

在光频条件下, 可以寻找到光子简并度 $\bar{n}$ 大于 1, 即激光产生的必要条件。为此将式(1.5)代入式(1.8)得

$$\bar{n} = W_{21}/A_{21} = n_2/n_1 = \exp(-h\nu/k_B T) \quad (1.11)$$

式(1.11)表明, 热平衡过程使光频能级间的粒子数分布成为上少下多的状态, 如图 1.3(a)所示, 即 $n_2 < n_1$ 。热平衡过程限制了光频区受激发射的发挥, 那么把 T 变成 $-T$, 即 $n_2 > n_1$, 如图 1.3(b)所示, 就一定能使受激发射占优势, 使 $\bar{n}$ 大于 1, 激光产生的第一个条件是设法达到原子集居数的反转分布状态。

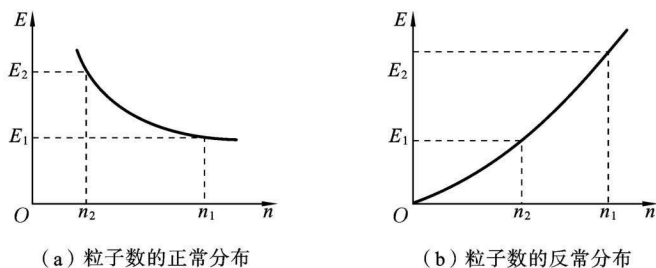


图 1.3 粒子数按能级的正常和反常分布

激光工作物质的原子或分子系统, 分为固态(包括晶体和半导体材料)、液态(包括染料物质)、气态物质。产生激光的粒子可以是掺杂粒子或基质粒子。虽然激光粒子的能级结构一般都比较复杂, 但总可以用一个三能级或四能级模型等效表示, 如图 1.4 所示。三能级和四能级系统的主要区别: 前者的激光能级是 E_1 和 E_2 , 且 E_1 的能级是基态; 后者的激光能级是 E_2 和 E_3 , 都是激发态。图 1.4 中“抽运”表示激光能量系统把基态粒子抽运到泵浦能级的受激吸收过程。泵浦过程通

过光抽运、气体放电激励或化学反应等方式来实现。图中曲线箭头表示非辐射的快速弛豫过程,其作用是使抽运到 E_3 (三能级) 或 E_4 (四能级) 上的粒子几乎不停留地弛豫到激光上能级 E_2 或 E_3 上。如果激光上能级有较长的寿命(称为亚稳态能级),则可以在激光上能级上积累更多的粒子,从而实现激光能级间的粒子数反转。三能级实现反转要比四能级实现反转困难,但世界上第一台红宝石激光器是三能级系统。

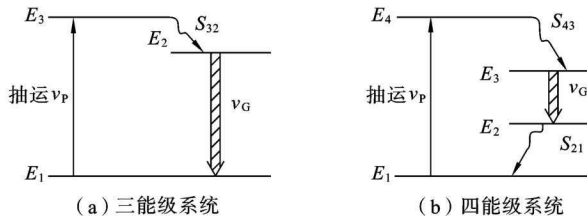


图 1.4 激光的三、四能级模型

综上所述,粒子数反转状态的内部条件是激光工作物质必须具有丰富的泵浦吸收带(且 $\nu_P > \nu_G$) 和寿命较长的亚稳态激光上能级;外部条件则是要求泵浦速率大于激光上能级向下自发跃迁的速率。

从光与物质相互作用的三个过程同时发生的观点看,反转条件 n_2 大于 n_1 的意义:当一束外来光入射后,受激辐射光将放大由于受激吸收而减少的光,总效果使入射光得到放大,称为光的受激辐射放大。放大的能力用增益系数表示,即

$$G^0(\nu) = A(n_2 - n_1) \quad (1.12)$$

式中: A 为相关常数。

从式(1.9)可知,要求光子总数大于模式数目, $\bar{n}$ 大于 1,光子总数一定,必须减少模式数目,这就是激光产生的第二个条件。办法是把低频使用的封闭腔打开,将两个反射镜面对面放置起来构成光学谐振腔。镜面的反射起反馈作用,使光波振荡只能在镜轴方向进行。侧面是打开的,只起损耗作用。封闭腔打开后,由于振荡被限制在很小的立体角 Ω 以内,能在腔中独立存在的模式数目 M 将大为减少,即

$$M = n_\nu \cdot \frac{\Delta\nu_G V \Omega}{2\pi} \quad (1.13)$$

式中: $\Delta\nu_G$ 为振荡带宽(由激光物质和损耗大小决定); $V = SL$ 为开腔体积, L 为腔长, S 为腔镜面积。考虑到腔镜面积 S 的衍射极限角 $\Omega_d = \lambda^2/S$ 和腔轴方向相邻振荡模的频差 $\Delta\nu_q = c/(2L)$, 不难证明式(1.13)变为

$$M = 2 \cdot \frac{\Delta\nu_G}{\Delta\nu_q} \cdot \frac{\Omega}{\Omega_d} = 2 \times \text{纵模数目} \times \text{横模数目} \quad (1.14)$$

式中:因子 2 代表两个独立的偏振态。因此,控制腔长 L 、镜面面积 S 和偏振抑制,可使 $M=1$,只有一个模存在,称为基模腔或 TEM_{001} 模。

综上所述,要想 $\bar{n}$ 大于 1,必须使大量光子进入一个或少数几个光波模式。条件