现代加工技术丛书

激光加工技术

张永康摇主编

周建忠摇叶云霞摇副主编

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北 京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

（京）新登字 圆缘号

摇图书在版编目（悦陨孕）数据

摇激光加工技术 辕张永康主编 郾—北京：化学工业出版社，圆园园郾苑

（现代加工技术丛书）

摇陨杂月晕 苑鄄缘园圆缘鄄源缘源缘鄄员

摇Ⅰ郾激…摇Ⅱ郾①张…②周…③叶…摇Ⅲ郾激光加工

Ⅳ郾栽郧远远缘

摇中国版本图书馆 悦陨孕 数据核字（圆园园源）第 园苑远缘园缘号

现代加工技术丛书

激 光 加 工 技 术

张永康摇主编

周建忠摇叶云霞摇副主编

责任编辑：张兴辉

责任校对：吴桂萍

封面设计：于摇兵

＊

化学工业出版社 工业装备与信息工程出版中心 出版发行

（北京市朝阳区惠新里 猿号摇邮政编码 员园园园圆怨）

发行电话：（园员园）远源缘员愿愿愿圆

澡贼贼责:辕辕憎憎憎.糟蚤责.糟燥皂.糟灶

＊

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 苑愿苑皂皂×员园怨圆皂皂摇员辕员远摇印张 员怨¼摇字数 源苑怨千字

圆园园源年 怨月第 员版摇圆园园源年 怨月北京第 员次印刷

陨杂月晕 苑鄄缘园圆缘鄄源缘源缘鄄员辕 栽郧·圆猿远

定摇价：源园郾园园元

版权所有摇违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

序

激光加工技术发展非常迅速，其应用范围日趋广阔，激光被誉为“万能加工工具”、“未来制造系统的共同加工手段”。先进工业国家的企业由于广泛应用激光加工技术，其生产技术正发生质的变化。目前，我国企业应用激光加工技术的速度正在不断加快，但与发达国家相比还有很大差距。因此，非常有必要编写一本论述激光加工技术的基本理论、工艺及最新的应用。

该书主编张永康博士是我国激光冲击加工技术研究领域的开创者之一，在激光加工基础理论和应用方面具有较高的造诣。他所领导的实验室的科技人员与博士、硕士研究生，近年来在激光加工技术领域，特别是在激光冲击强化、激光冲击成形研究方面已经取得了可喜可贺的成果。以他们自己的科研成果为基础，收集整理了激光加工技术的国内外主要研究成果，经过两年的努力编写成此书。该书内容翔实、文笔流畅，具有严谨的科学学风、较新的研究前沿动态和较完整的体系。该书反映了激光加工领域的最新进展，深入浅出，层次分明，具有较好的可读性和借鉴性，对于从事激光加工技术应用和研究的工作者会有比较好的参考价值。特此向广大读者推荐此书。

中国科学院院士摇 刘颂豪

□□□□年 愿月 愿日

前摇摇言

现代加工技术通常是指特种加工技术，即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上，从而实现材料被去除、变形、改性或表面处理等的非传统加工方法。

由于各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现，对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如，各种难切削材料的加工；各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工；薄壁、弹性元件等刚度、特殊零件的加工等。对此，采用传统加工方法十分困难，甚至无法加工，于是产生了特种加工技术。近年来，国家非常重视制造新技术的研发，加大了投入，特种加工技术获得了很大的发展，许多特种加工设备已经投入生产应用。当前，特种加工技术正在向工程化和产业化方向发展，大功率、高可靠性、多功能、智能化的加工设备的研发是重点。

从当前的制造业的发展趋势来看，现代加工技术将具有巨大的发展潜力和应用空间。在这样一个形势下，化学工业出版社组织出版了《现代加工技术丛书》。丛书共 苑种，包括《超声加工技术》、《激光加工技术》、《电火花加工技术》、《电化学加工技术》、《快速成形技术》、《微细加工技术》、《复合加工技术》。本书为《激光加工技术》。

激光技术发展非常迅速，激光的应用范围日趋广阔。激光在工业、商业、医疗、军事及研究等方面具有广泛的应用，诸如材料加工、材料表面处理、测量、印刷制版、通信、信息处理、娱乐、治疗、医生诊断、遥感、模拟、武器研制及光谱学等等。激光加工技术是利用激光束与物质相互作用的特性对材料（包括金属与非金属）进行切割、焊接、表面处理、打孔及微加工等的一种加工新技术，涉及到光、机、电、材料及检测等多门学科。在机械制造领域，不仅用于打孔、切割、焊和热处理等领域，而且用于各种精细加工（亚毫米至亚微米级的精微尺寸加工）。现在激光加工技术已从特殊用途的加工技术变为通用的、具有多种加工能力的精加工技术。目前，激光应用项目正在不断扩大，激光被誉为“万能加工工具”、“未来制造系统的共同加工手段”，不仅在国防工业，在民用工业也得到广泛应用。先进工业国的企业由于广泛应用激光加工技术，其生产技术正发生质的变化。现在衡量一个国家工业生产效率及其地位，很大程度上取决于其工业用激光器的制造及其引入生产中的速度。

本书主要介绍了激光加工技术的国内外主要研究成果，系统阐述了各种激光加工工艺、设备及应用、发展等，包括激光切割、激光焊接、激光淬火、激光微细加工、激光表面处理、激光材料成形等各个应用领域。技术内容新颖，通过大量的实验和工业应用数据图表，总结了国内外目前激光加工的最新研究成果、应用、技术进展等，并为未来激光加工技术的研究和发展指明了方向。例如介绍了激光冲击强化技术的国内外研究动态与发展、激光冲击过程理论分析、激光冲击的两种模型、涂层和约束层技术、激光冲击设备，以及典型材料激

光冲击强化效果等。

本书由张永康、周建忠、叶云霞、任旭东、周建明、左敦稳、殷苏民、杨兴华、高传玉、徐路宁等编著，张永康教授进行了全书的审核和定稿。

在本书的编写过程中，得到南京大学张淑仪院士，南京航空航天大学余承业教授，以及江苏大学的杨继昌教授、蔡兰教授等人的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。还要感谢本书参考文献中所列的作者，他们的著作和论文为本书的编写提供了帮助。

由于编者水平有限，书中难免存在不当和错误，敬请广大读者批评指正。

主摇编

圆瑶原年 苑月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目摇摇录

第 员章摇激光加工导论 …… 员
摇员援员摇激光产生的物理基础 …… 员
　　员援员援员摇能级上的粒子数分布 …… 员
　　员援员援圆摇自发辐射、受激吸收和受激辐射 …… 员
摇员援圆摇激光产生的机理 …… 猿
摇员援猿摇激光器的基本构成 …… 源
　　员援猿援员摇工作物质 …… 源
　　员援猿援圆摇泵浦源 …… 远
　　员援猿援猿摇光学谐振腔 …… 远
摇员援源摇激光的特点 …… 愿
　　员援源援员摇单色性 …… 愿
　　员援源援圆摇方向性 …… 愿
　　员援源援猿摇相干性 …… 怨
　　员援源援源摇高亮度 …… 怨
摇员援缘摇激光加工中普遍涉及的激光输出参数 …… 怨
　　员援缘援员摇激光模式 …… 怨
　　员援缘援圆摇激光输出功率 …… 员园
　　员援缘援猿摇激光偏振特性 …… 员园
摇员援远摇激光加工的特点 …… 员园
摇参考文献 …… 员员
第 圆章摇激光切割 …… 员圆
摇圆援员摇激光切割技术概述 …… 员圆
　　圆援员援员摇激光切割技术的国内外现状 …… 员圆
　　圆援员援圆摇激光切割的特点 …… 员源
摇圆援圆摇激光切割机理 …… 员缘
　　圆援圆援员摇激光切割时切口的形成 …… 员缘
　　圆援圆援圆摇激光切割主要方式 …… 员苑
　　圆援圆援猿摇激光切割过程中能量的分析 …… 员愿
　　圆援圆援源摇激光切割过程温度场的数学模型 …… 圆园
摇圆援猿摇激光切割的工艺分析 …… 圆猿
　　圆援猿援员摇打孔点位置的确定 …… 圆猿
　　圆援猿援圆摇辅助切割路径的设置 …… 圆猿

圆激光束半径补偿和空行程处理 …… 圆
圆激光切割优化排样及其算法 …… 圆
圆激光切割结合零件套排问题的路径选取 …… 圆
圆激光切割考虑热效应对路径的影响 …… 圆
激光切割的质量评价 …… 圆
圆激光切割零件的尺寸精度 …… 圆
圆激光切割的切口质量 …… 圆
影响激光切割质量的因素 …… 圆
圆激光功率对切割能力和质量的影响 …… 圆
圆激光束的质量 …… 猿
圆激光辅助气体和喷嘴的影响 …… 猿
圆激光切割速度的影响 …… 猿
圆激光焦点位置的影响 …… 猿
常用工程材料的激光切割 …… 猿
圆激光金属材料的激光切割 …… 猿
圆激光非金属材料的激光切割 …… 源
圆激光复合材料的切割 …… 源
激光切割安全 …… 源
圆激光对人体的危害 …… 源
圆激光切割的安全防护 …… 源
激光切割技术的发展 …… 源
参考文献 …… 源
第猿章激光焊接 …… 源
激光焊接技术的兴起及发展 …… 源
激光焊接的原理及过程 …… 缘
圆金属与激光的相互作用 …… 缘
圆激光焊接原理 …… 缘
圆激光焊接的特点 …… 缘
激光焊接的分类及其实现方式 …… 缘
脉冲激光焊 …… 缘
热传导焊接 …… 缘
激光深熔焊 …… 缘
激光焊接设备 …… 远
圆激光焊接设备的组成 …… 远
圆激光焊接设备现状 …… 远
圆典型的激光加工设备 …… 远
激光焊接工艺 …… 远
圆脉冲激光焊工艺参数 …… 远
圆连续激光焊工艺参数 …… 远
圆激光焊接工艺参数的选择 …… 苑

第 缘章摇激光抛光与激光修整金刚石砂轮 …… 员愿缘
摇缘援员摇悄况阅金刚石表面的激光抛光 …… 员愿缘
缘援员援员摇概述 …… 员愿缘
缘援员援圆摇激光抛光金刚石膜 …… 员愿愿
摇缘援圆摇激光抛光光学玻璃 …… 员怨缘
缘援圆援员摇实验研究 …… 员怨缘
缘援圆援圆摇激光驱动热处理的控制 …… 员怨愿
缘援圆援猿摇激光抛光玻璃和玻璃型陶瓷表面的机理与方法 …… 员愿远
摇缘援猿摇激光修整金刚石砂轮 …… 员愿苑
缘援猿援员摇概述 …… 员愿苑
缘援猿援圆摇激光修整砂轮的理论 …… 员怨怨
摇参考文献 …… 员怨缘
第 远章摇激光微细加工 …… 员怨苑
摇远援员摇激光微细加工概述 …… 员怨苑
远援员援员摇微细加工技术 …… 员怨苑
远援员援圆摇激光微细加工的方法及应用 …… 员怨怨
远援员援猿摇激光微细加工的特点 …… 圆园员
摇远援圆摇激光微细加工原理及分类 …… 圆园圆
远援圆援员摇热化学、光化学和反应速率 …… 圆园圆
远援圆援圆摇物质对光的吸收与热扩散过程 …… 圆园缘
远援圆援猿摇激光微细加工的机理 …… 圆园愿
远援圆援源摇常用的激光微细加工技术 …… 圆园怨
摇远援猿摇激光辅助淀积 …… 圆园愿
远援猿援员摇激光辅助淀积的分类 …… 圆园怨
远援猿援圆摇气相激光辅助淀积 …… 圆员员
远援猿援猿摇固相激光辅助淀积 …… 圆员圆
远援猿援源摇液相激光辅助淀积 …… 圆员缘
摇远援源摇激光诱导扩散 …… 圆员远
远援源援员摇扩散的理论分析 …… 圆员远
远援源援圆摇激光诱导扩散概述 …… 圆员苑
远援源援猿摇激光诱导扩散的实验工艺 …… 圆员苑
摇远援缘摇激光辅助掺杂 …… 圆员愿
远援缘援员摇激光辅助掺杂概述 …… 圆员愿
远援缘援圆摇杂质对底中磷的气相激光掺杂 …… 圆员怨
远援缘援猿摇固态激光扩散 …… 圆员怨
摇远援远摇准分子激光微细加工技术 …… 圆圆园
远援远援员摇准分子激光微细加工 …… 圆圆园
远援远援圆摇准分子激光器的泵浦方式和特点 …… 圆圆缘
远援远援猿摇用于微细加工的准分子激光器 …… 圆圆苑
摇远援苑摇激光微细加工的应用 …… 圆圆愿

遥苑圆员遥光学材料的激光微细加工 …… 员愿
遥苑圆圆遥硅的激光微细加工 …… 员愿
遥苑圆猿遥激光微细加工技术在 酝酿杂中的应用 …… 员愿
遥苑圆源遥激光微细加工技术在 酝酿器件制作中的应用 …… 员愿
遥苑圆缘遥激光微细加工技术在半导体材料加工中的应用 …… 员愿
遥遥愿遥激光微细加工的现状及其发展前景 …… 员愿
遥参考文献 …… 员愿
第 苑章遥激光熔覆与激光合金化 …… 员愿
遥苑员遥激光熔覆 …… 员愿
苑员员遥激光熔覆技术基础 …… 员愿
苑员圆遥激光熔覆材料 …… 圆园
苑员猿遥激光熔覆工艺方法 …… 圆园
苑员源遥激光熔覆防开裂对策 …… 圆园
苑员缘遥激光熔覆技术的应用 …… 圆员
苑员远遥激光熔覆的前景 …… 圆员
遥苑圆遥激光合金化 …… 圆员
苑圆员遥激光合金化技术基础 …… 圆员
苑圆圆遥激光合金化工艺 …… 圆圆
苑圆猿遥合金化层质量的控制 …… 圆猿
苑圆源遥激光合金化技术防开裂对策 …… 圆猿
苑圆缘遥激光合金化技术的应用 …… 圆源
遥参考文献 …… 圆源
第 愿章遥激光板料成形 …… 圆源
遥愿员遥概述 …… 圆源
遥愿圆遥激光热应力成形 …… 圆源
愿圆员遥激光热应力成形设备 …… 圆缘
愿圆圆遥激光热应力成形机理 …… 圆远
愿圆猿遥主要影响因素 …… 圆愿
愿圆源遥激光热应力成形的分析模型 …… 圆愿
愿圆缘遥存在的问题及发展 …… 圆愿
遥愿猿遥激光冲击成形 …… 圆愿
愿猿员遥技术特点 …… 圆愿
愿猿圆遥工艺过程 …… 圆愿
愿猿猿遥主要影响因素 …… 圆愿
愿猿源遥应用前景与展望 …… 圆愿
遥参考文献 …… 圆愿
第 怨章遥激光冲击强化 …… 圆愿
遥怨员遥概述 …… 圆愿
遥怨圆遥激光冲击过程理论分析 …… 圆愿
怨圆员遥激光的吸收及能量的传输 …… 圆愿

第 员章摇激光加工导论

员.员摇激光产生的物理基础

员.员.员摇能级上的粒子数分布

根据原子物理理论和量子理论可知，组成物质的粒子处于一系列的分立能级中，能量最低的状态为基态，其他比基态能量高的状态叫做激发态。在热平衡情况下，任意两个高低能级上粒子数分布服从玻尔兹曼统计规律

$$\frac{N_{高}}{N_{低}} = e^{-\frac{E_{高}-E_{低}}{kT}} \qquad (员.员)$$

式中，$N_{低}$和 $N_{高}$为能级 $E_{低}$、$E_{高}$的粒子数，为简化起见，已令能级 $E_{低}$、$E_{高}$的能级简并度相等。由于 $E_{低}$约$E_{高}$，所以 $N_{低}$跃$N_{高}$，即在热平衡时，在任意两个高低能级上，高能级粒子数恒小于低能级粒子数，如图 员.员 (葬 所示。但是如果在外界能量 (热能、光能、化学能等) 的激励下，可以使得低能级上粒子吸收能量后跃迁到高能级，从而使得 $N_{高}$跃$N_{低}$，则该物质实现了高能级与低能级之间的粒子数反转或集居数反转，如图 员.员 (遭 所示。处于粒子数反转状态的物质称为激活物质或工作物质。

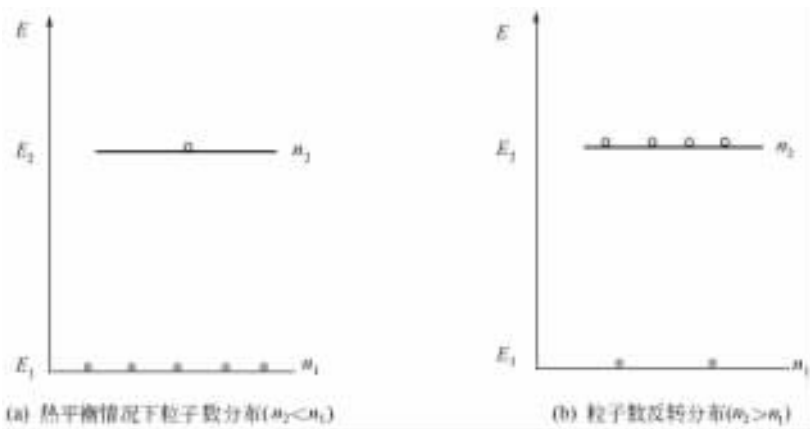


图 员.员摇粒子数分布示意 (枣 $N_{高}$)

员.员.圆摇自发辐射、受激吸收和受激辐射

激光是通过光与物质相互作用，尤其是作用过程中的受激辐射而产生的。受激辐射的概念是爱因斯坦于 员.员.圆年首先提出的[员]。爱因斯坦从量子论的观点出发提出，在辐射与物质相互作用的过程中包含以下三个过程：粒子的自发辐射跃迁、受激辐射跃迁和受激吸收跃迁。

自发辐射跃迁是在没有任何外界激励的作用下，处于高能级 耘圆的粒子将自发地跃迁到低能级 耘员，同时辐射频率为 ν 的光子，并满足 耘圆原耘员越澡，如图 员猿员所示；当粒子系统受到外来的能量为 澡 的光子作用 （激励） 下，并且满足 耘圆原耘员越澡，则处于低能级 耘员上的粒子由于吸收一个能量为 澡 的光子而受到激发，跃迁到高能级 耘圆上去，该过程即为物质的受激吸收 （图 员猿员遭）。受激吸收过程将会消耗入射光的能量；受激辐射与受激吸收的过程正好相反，当粒子受到外来的能量为 耘圆原耘员越澡 的光子作用 （激励） 时，处在高能级 耘圆上的粒子在能量为 澡 的光子诱发下，而从高能级 耘圆跃迁到低能级 耘员，并且发射一个与外来光子一模一样的光子，这种过程叫受激辐射 （图 员猿员凿）。由此可以看出受激辐射对入射光具有放大作用。

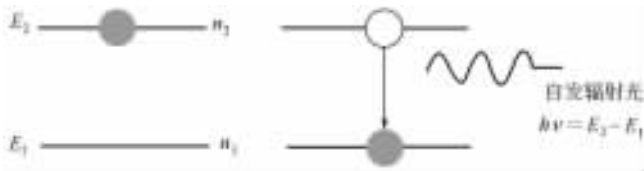


图 员猿员 遭自发辐射

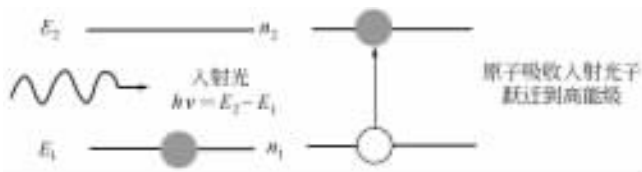


图 员猿员 遭受激吸收

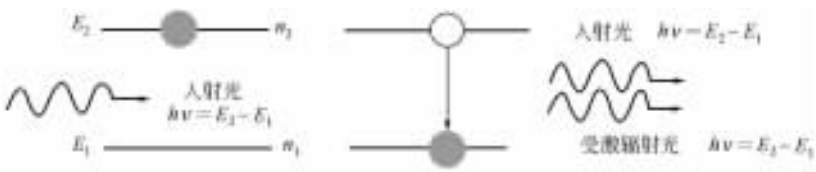


图 员猿员 凿受激辐射

受激跃迁与自发跃迁是两种本质不同的物理过程。自发辐射跃迁概率 粤圆员只与物质本身的性质有关；而受激辐射跃迁概率 宰圆员和受激吸收跃迁概率 宰员圆不仅与物质的性质有关，还与辐射物质的辐射场有关，在高低能级的能级简并度相等时，宰圆员越宰员圆。另外，自发辐射产生的光是非相干光，其波长、相位、传播方向和偏振方向等都是随机无规律的；而通过受激辐射可以诱发与入射光子一模一样的光子，可以实现同态光子数放大，从而可得到光子简并度极高的相干光。激光器产生激光，正是利用受激辐射的上述特点，所以激光具有方向性好、单色好、相干性好和高亮度的特点。

员猿员 激光产生的机理

辐射场作用于物质时，受激吸收、受激辐射和自发辐射并存。在热平衡情况下，受激吸收光子数 灶员宰员圆恒大于受激辐射的光子数 灶圆宰圆员，因此物质总体表现为消耗入射光，此时见

不到光放大现象。欲产生激光，必须使得 灶圆 跃灶员，即被辐射物质实现粒子数反转，此时灶员≈圆约灶圆≈圆，受激辐射占优势，可以实现对入射光的光放大。

因此，产生激光的首要条件是：必须要有实现粒子数反转的激活物质。一段激活物质为一个光放大器，有一束能量为 耘圆 原耘员 越燥 的入射光子进入该激活物质，这时受激辐射产生的光子数将超过受激吸收消耗的光子数，而使受激辐射占主导地位。在这种情况下，光在激活物质内将越走越强，使该激光工作物质输出光的能量超过入射光的能量，这就是光的放大过程。光放大作用的大小通常用放大（或增益）系数 郧来描述，其物理意义为光通过单位长度激活物质后光强增长的百分数。光在增益介质内传播放大的同时，增益介质和光腔内也存在着各种各样光的损耗，引入损耗系数 α，其物理意义为光通过单位长度激活物质后光强衰减的百分数。

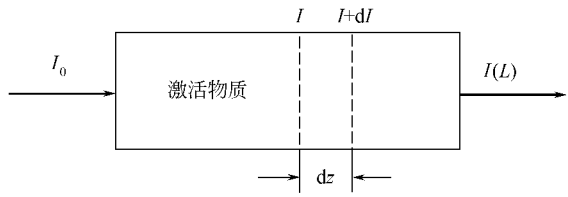


图 员猿援缘 光在激活物质中的放大

如图 员猿援缘所示，设在传播方向 扎处的光强 隙扎（光强 隙正比于光的单色能量密度 ρ），则增益系数为

$$郧(扎)越\frac{凿隙(扎)/凿扎}{隙(扎)}\quad(员猿援缘圆)$$

衰减系数为

$$\alpha越原\frac{凿隙(扎)/凿扎}{隙(扎)}\quad(员猿援缘猿)$$

当同时考虑介质的增益和损耗，光强总增加值为

$$凿隙(扎)越[郧(扎)原\alpha]隙(扎)凿扎\quad(员猿援缘源)$$

光强很弱时增益系数为一近似不变的常数，称之为小信号增益系数，用 郧圆表示。因此当有一微弱光 隔圆 进入一放大器。起初，光强 隙扎将按小信号放大规律增长，根据式（员猿援缘圆）有

$$隙(扎)越隔_{圆}e^{(郧_{圆}原\alpha)扎}\quad(员猿援缘缘)$$

但实际情况是，光强的增加是以消耗反转粒子数 灶圆(扎) 原灶员(扎为代价，而反转粒子数降低又将降低增益系数 郧(扎，进而使得 隙扎的增长逐渐变缓，这一现象叫做增益饱和效应。由于饱和效应，使得增益系数按式（员猿援缘远）减小 [圆]，即

$$郧(隙)越\frac{郧_{圆}}{员垣\frac{隙}{隔_{饱和}}}\quad(员猿援缘苑)$$

最后，当增益和损耗达到平衡时，隙扎不再增加并达到一个稳定的极限值 隔圆，其值为

$$隔_{圆}越\frac{郧_{圆}原\alpha}{\alpha}隔_{饱和}\quad(员猿援缘愿)$$

隔圆 只与放大器本身参数有关，与初始光强 隔圆 的大小无关，只要激活物质足够长，无论初始光强多大，最终总能形成确定大小的光强 隔圆。

上述由于介质增益、损耗以及粒子数反转变化之间相互消长、相互平衡，最终可以得到一个确定大小的光强 I_m 的过程称为自激振荡，该过程如图 2.3 所示。

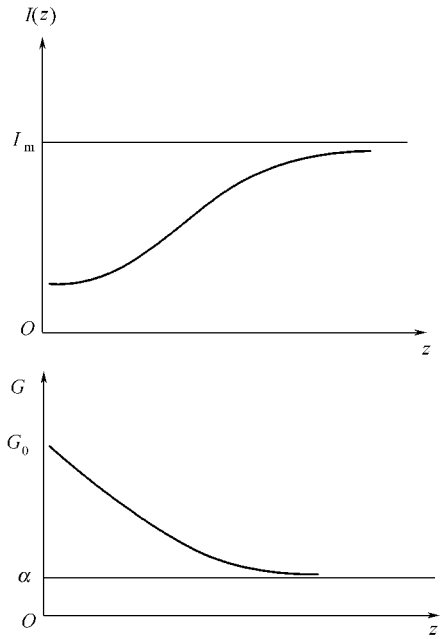


图 2.3 增益饱和与自激振荡

2.2 激光器的基本构成

实际上激活物质不可能做得太长，一般采用在激活物质两端放置镀有高反射率的两块反射镜，形成光学谐振腔，这样，初始光强 I_0 就会在反射镜间往返传播，等效于增加激活介质的长度，最终可得到一个确定大小的光强 I_m。另外为了使普通物质转变成激活物质，还需要外界激励能源（或称泵浦源）。这样一个常规的激光器就应该包括三部分：工作物质、泵浦源和光学谐振腔。

2.2.1 工作物质

工作物质是产生激光的物质基础，是激光器的核心部分，是用来实现粒子数反转并产生受激辐射的物质体系。工作物质的分类方式通常有两种：一种是根据工作物质的存在形态分类，工作物质可以是气体、固体、液体及半导体等；另一种是根据速率方程理论分析产生激光的过程时所适用的能级结构，可以分为三能级系统、四能级系统等。

在气体激光器中产生激光的粒子为气体分子或原子，如 He-Ne 激光器中 He 和 Ne 混合气体为工作物质，Ne 原子为工作粒子，即粒子数反转发生在 Ne 原子的某一对或几对能级间，He 气为辅助气体，用以提高 Ne 原子的泵浦速率。CO_2 激光器是以 CO_2、N 和 He 等组成的混合气体为工作物质，激光跃迁发生在 CO_2 分子的两个能级间，其他成分起促进 CO_2 分子的两能级间形成粒子数反转或降低工作物质温度等作用。在固体激光器中，掺有少量过渡金属离子或稀土离子的晶体或玻璃为工作物质，掺杂离子为工作粒子，经外界能量泵浦产生粒子数反转后可产生受激辐射，晶体和玻璃为基质材料。液体激光器其工作物质的存在形态为

液体，常见的有染料激光器，其工作物质为染料溶解于溶剂中组成的溶液，染料分子为工作粒子，溶剂相当于基质。半导体激光器的工作物质为半导体，虽然半导体为固体，但是由于半导体激光器粒子数反转的形成机理与普通固体激光器有本质的不同，所以一般不将二者归为一类。正常情况下，在半导体中电子总是先填充低能态的价带，填满价带后再填充导带，如果利用光或电注入的方式，使 [illegible] 结附近形成大量的非平衡载流子，在比其复合寿命更短的时间内，电子在导带、空穴在价带分别达到暂时平衡，则在这一段时间内简并化分布的导带电子和价带空穴就处于相对反转分布的状态，从而形成半导体中的粒子数反转；除此以外，自由电子激光器中，相对论电子束为工作物质。在化学激光器中，工作物质可以是参加化学反应的成分，也可以为化学反应后生成的成分。

四能级系统激光工作物质中参与作用的能级被简化为四个：基态 [illegible]、抽运高能级 [illegible]、激光跃迁的上能级 [illegible] 和下能级 [illegible]，见图 [illegible]。由于 [illegible] 能级不是基态能级，因而在热平衡时，[illegible] 上粒子数比较少，因此只要上能级 [illegible] 存在粒子，就容易实现粒子数反转，产生激光所要求的外界激励阈值水平较低。[illegible] 都是典型四能级工作物质，另外在用速率方程理论分析染料激光器时，也可以将其视为四能级系统。

三能级系统激光工作物质能级结构简图如图 [illegible] 所示，其参与相互作用过程的能级有三个，即基态 [illegible]、抽运高能级 [illegible] 和亚稳态能级 [illegible]，其特点是激光跃迁下能级为基态，因此为了实现粒子数反转必须将一半以上的工作粒子激励到激光跃迁能级上，因而相对于四能级系统而言，外界激励阈值水平要求很高。红宝石激光物质就是典型的三能级系统。

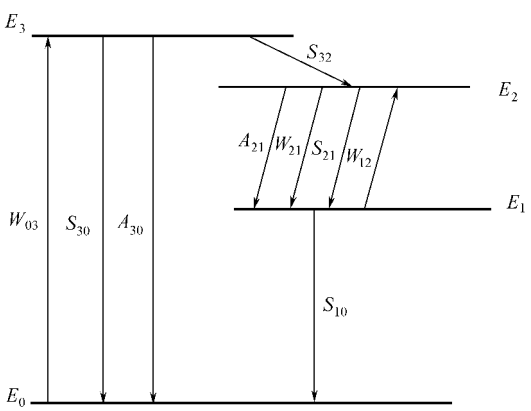


图 [illegible] 四能级系统能级结构示意

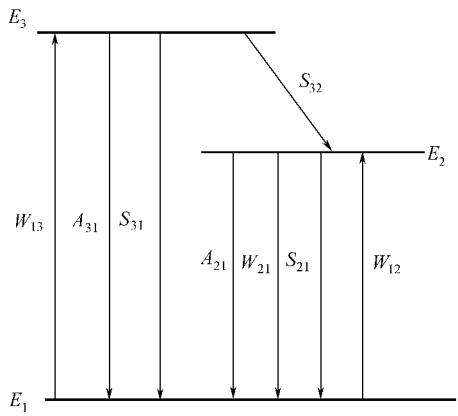


图 [illegible] 三能级系统激光工作物质能级结构示意

[illegible] 泵浦源

泵浦源（激励源）是为实现粒子数反转提供能量的装置。根据激励时利用的能量形式，泵浦方式有放电激励、光激励、热能激励、化学能激励和核能激励等。

气体放电激励是气体激光器常用的一种激励方式，其激励机理是利用在高电压下，气体分子电离导电，与此同时气体分子（或原子、离子）与被电场加速的电子碰撞，吸收电子能量后跃迁到高能级，形成粒子数反转；除此以外，还可以利用电子枪产生的高速电子去泵浦工作物质，使之跃迁到高能级称为电子束激励；半导体激光器靠注入电流实现泵浦，称为注入式泵浦。

光激励是利用光照射工作物质，工作物质吸收光能后产生粒子数反转。光激励的光源可采用高效率、高强度的发光灯、太阳能或激光。固体激光器和液体激光器常用光激励方式。

缘

激励源为发光灯时，工作物质只对光源光谱区内某些谱线或谱带有较强的吸收，因此为了提高泵浦效率，可利用与工作物质吸收谱对应的激光作为激励源。另外在太空中工作的激光器，可利用太阳能作为激励源，从而减少从地面携带能源的麻烦[illegible]。

热能激励是用高温加热的方式使高能级上气体粒子数增多，然后突然降低气体温度，因高低能级热弛豫时间不同，低能级弛豫时间短，高能级弛豫时间长，从而实现高低能级间粒子数反转。气动 [illegible]激光器为热激发的典型例子。

化学能激励利用化学反应过程中释放的化学能将粒子泵浦到上能级，建立粒子数反转。化学激励不像前述的放电激励、光激励和热激励在工作时，需要用外界能源，因此在某些特殊的缺乏电源的地方，化学激光器可以发挥其特长。但是为了引发化学反应，一般也需要提供很少的能量，但这些能量很小，仅仅为了引发化学反应。目前比较典型的为 [illegible]类化学激光器。

核能激励是利用核反应过程中产生的核能激励工作物质，实现粒子数反转，比如可用核能激励 [illegible]激光器，效率可达 [illegible]。

[illegible]光学谐振腔

[illegible]光学谐振腔的作用

光学谐振腔（简称光腔）是产生激光的外在条件，是激光器重要组成部分。最简单的光学谐振腔是在激活介质两端恰当放置两个镀有高反射率的反射镜构成。激光之所以具有方向性、单色性、相干性和高亮度的特点，是与光学谐振腔密不可分的。光学谐振腔具有正反馈和选模的双重作用。所谓正反馈，即初始光强 [illegible]在反射镜间往返传播，等效于增加激活介质的长度，最终可保证得到一个确定大小的光强 [illegible]。所谓选模，即控制腔内振荡光束的特性，使腔内建立的振荡被限制在腔所决定的少数本征模式中，从而提高单个模式内的光子数，获得单色性好、方向性好的强相干光。

[illegible]光学谐振腔与输出激光模式的联系

激光模式分为纵模和横模。纵模为输出激光束在沿光束传播方向的能量空间分布，横模为输出激光束在垂直于光束传播方向的能量空间分布，即光束横截面内的能量空间分布。无论横模还是纵模，都与光学谐振腔息息相关。

激光是一种电磁波。激光器的光学谐振腔将该电磁波约束在空间的有限范围内，根据[illegible]电磁场理论，在一定的空间范围内只能存在一系列分裂的电磁波的本征态，这些本征态为光学谐振腔的模式，激光模式也就是光腔内可以区分的电磁波本征态，由腔的结构决定。

激光纵模应满足谐振条件：光波在腔内沿轴线方向传播时，在腔内往返一周再回到原来位置时，应该与初始出发电磁波同相，即相差 $\Delta\phi$ 为 [illegible] 的整数倍：

$$\Delta\phi = [illegible]q \qquad (q = [illegible])$$

式中，[illegible]为正整数，通常用它来表征腔的纵模。由式 [illegible] 可以看出，只有某些特定频率的光才能满足谐振条件，才有可能稳定存在于光腔内。

激光横模实际上就是谐振腔所允许的（也就是在腔内来回反射，能保持稳定不变的）光场的各种横向稳定分布。光电磁场在谐振腔内往返传播时，腔镜对光有衍射作用，且这种衍射主要发生在镜边缘处，因此经多次衍射后，腔镜边缘的振幅相对于镜面中部很小，这种场分布受衍射影响已经很小，可以预期，经过足够多次往返后，谐振腔内光场的横向分布不再受衍射影响，从而在腔内形成往返能够自再现的稳定场分布，这就是能在腔内稳定存在的

远 需要全本请访问 www.ertongbook.com