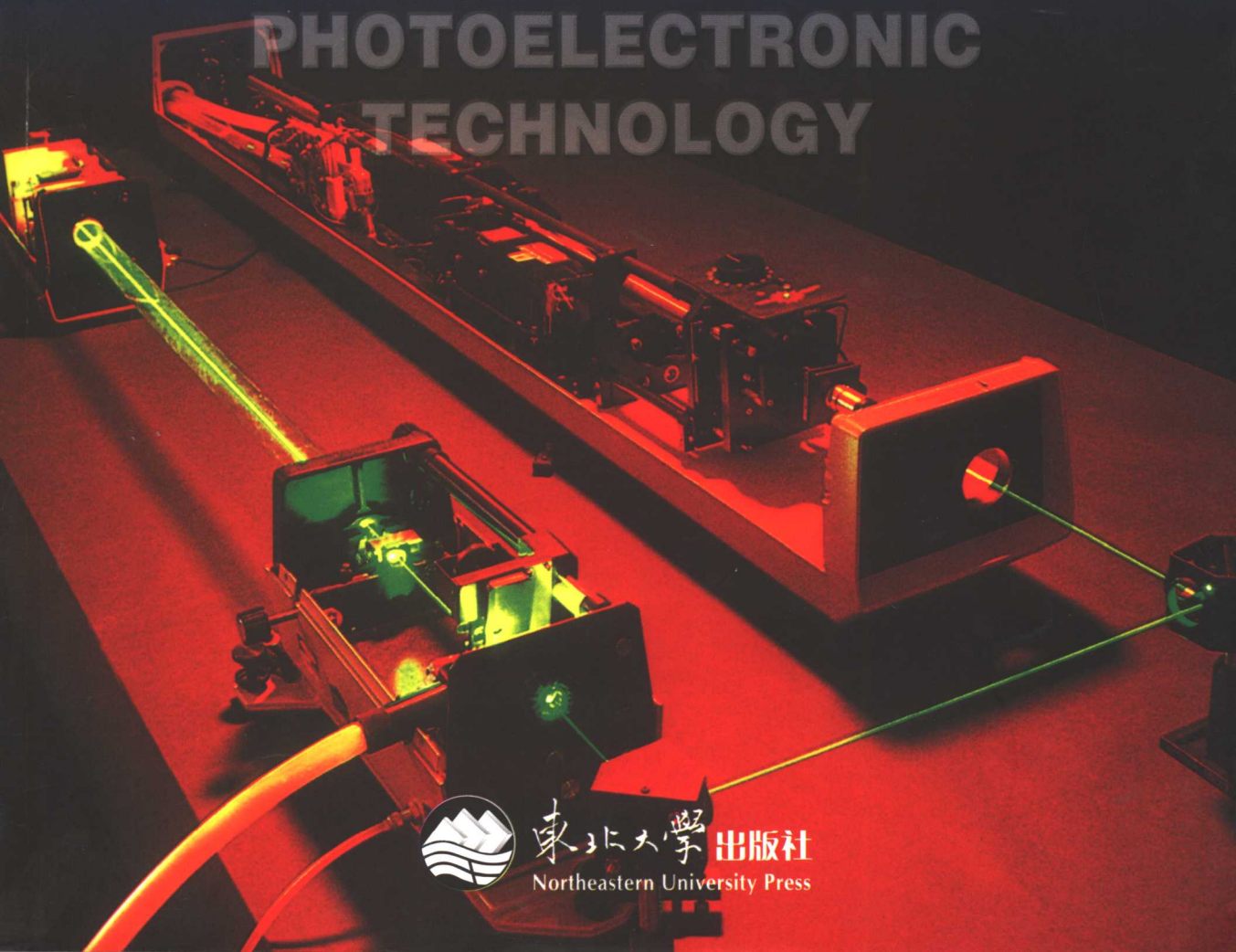


应用光电子技术基础

孙凤久 主编

APPLIED
PHOTOELECTRONIC
TECHNOLOGY



东北大学出版社
Northeastern University Press



东北大学资助

应用光电子技术基础

孙凤久 主编

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 孙凤久 2005

图书在版编目 (CIP)

应用光电子技术基础 / 孙凤久主编. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2005.12

ISBN 7-81102-209-5

I. 应… II. 孙… III. 光电子技术—应用 IV. TN209

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 144481 号

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印刷者: 沈阳市光华印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm × 260mm

印 张: 21.375

字 数: 547 千字

出版时间: 2005 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2005 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 冯淑琴

责任校对: 张淑萍

封面设计: 唐敏智

责任出版: 秦 力

定 价: 35.00 元

前 言

本书是根据作者多年来有关光电子学和光电子技术教学工作的总结汇编而成的。由于光电子学与光电子技术是一门正在迅猛而蓬勃发展并涉及内容非常广泛的综合性学科领域，在本书中只能涉猎其中一部分内容，同时为了反映作者多年来的研究工作，书中也加入了高斯光束传输的光学形式量子化理论、光学维格特效应以及激光处理取向硅钢等一些研究内容。

为了兼顾教学和其他方面读者的需要，书中包括“基础篇”和“应用篇”两个部分共十四章，本书并不十分追求各个章节的连贯性与系统性，读者基本上可以根据兴趣和需要进行选择性的阅读。在“基础篇”中主要内容是激光的特点与基本原理简介、光频电磁场理论概要、光与物质相互作用的基本过程、光与其他形式能量相互转化的物理效应、激光光电子技术应用中的一些基本元器件；“应用篇”的主要内容是光通讯、光电子激光精密检测技术、激光加工技术、光电子激光光谱科学分析仪器、信息（傅立叶）光学概要、光全息术、光信息存储与显示技术、激光光电子技术在医学与生物学中的应用。

本书由东北大学孙凤久教授主编，并负责绪论、第7章、第9章、第10章以及第2章和第8章部分的编写；宋根宗副教授负责第5章、第7章、第13章和第14章的部分编写；赵国俭副教授负责第1章、第3章、第4章和第6章的编写；杨玉玲博士负责第2章和第8章的部分编写；于撼江博士负责第11章和第14章的部分编写。该书是根据东北大学2005年教材编写计划进行的，在编写过程中得到东北大学教务处的大力支持，也得到物理系许多同事的帮助，特别是于撼江博士等在原稿的整理、打字和作图等方面付出了大量的劳动，在此谨向他（她）们表示诚挚的谢意。由于作者水平有限，书中缺欠与错误在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2005年5月

绪 论

1. 光电子学与光电子技术的概述

光电子学与光电子技术, 如果从电子学的角度来看可以将其视为是电子学与电子技术在光频领域的延伸, 由于有共同的电磁场理论和量子理论等基础, 因此它一方面继承与沿用了电子学许多概念、思想以及方法, 而且光频的特殊性使其形成了崭新的独立的科学体系; 如果从光学和光子学角度来看它是研究以光子和相干光束作为信息载体和能量载体的科学, 主要研究光子和相干光束的产生、运动、转化以及它与物质相互作用的各种效应和规律, 实验上主要研究光子和相干光束的产生、传输、控制、探测的方法以及相关科学技术; 如果从学科交叉的角度来看可以将其视为是现代光学、光子学和光子技术与现代电子学、电子技术、以及计算机技术的高度结合, 并且它与凝聚态物理学、材料科学、微加工机械学、近代化学等学科技术密切相关, 它是具有广阔发展与广泛应用前景的综合性的交叉型高新科学与技术; 从应用角度看当今光电子学与光电子技术是以激光技术为龙头, 业已在信息、能源、材料、航空航天、生命科学和环境科学技术等许多领域, 可以说涉及到工农兵学商与生活 and 娱乐等所有方面, 获得并将继续发展其广泛的应用价值, 从而也必将推动光电子产业的迅猛发展。

首先在信息科技领域, 20 世纪的电子学确实做出了巨大的贡献, 但由于其信息属性的局限性, 使其无论在速度、容量还是在空间相容性上都受到很大限制, 而光子的信息属性却表现出巨大的发展潜力和明显的优越性。从电子器件和光子器件的性能比较中, 可以看出光子器件的发展是必然的。在信息处理速度上, 电子器件的响应时间最快也只能达到 10^{-11} s, 而光子器件可达到 $10^{-12} \sim 10^{-15}$ s, 显然要比前者快至万倍。同时, 光子在通常情况下互不干涉, 具有并行处理信息的能力, 在光计算中可大幅度提高信息的处理速度。在存储能力、传播速度、抗干扰能力等很多方面, 光子器件弥补了电子器件的很多不足, 为信息技术的发展提供了新的可能性。为此, 进入 21 世纪, 光子学与电子学将会成为更密切的整合体, 互为补充, 相互促进, 把信息社会推向新的发展阶段。目前, 光电子技术研究热点之一是在光通信领域, 这对全球的信息高速公路的建设以及国家经济和科技持续发展起着举足轻重的推动作用。目前, 国内外正掀起一股光电子技术和光电子产业的热潮。在光电子技术方面的投资额度、人才培养、研究水平、开发能力、产业规模, 已经成为当代科学技术领域在世界范围内展开竞争的重要方面, 可以说这直接反映着一个国家科学技术发展的水平。完全可以预言: 光电子时代已经到来, 光电子技术将引起一场超过电子技术的产业革命, 将给工业和社会带来比电子技术更大的冲击。许多有识之士断言在未来几年内, 国际上光电子信息处理器件产值将达到和电子信息器件产值相等的程度, 到 21 世纪中期, 光电子产业将会超过电子产业的规模 and 影响。

光电子技术和产业在国家经济建设和科学持续发展中将发挥非常重大的作用。在 1998 年, 全世界光电子产业总产值实现 1400 亿美元; 2000 年, 已达到 1800 亿美元; 预计到 2010 年, 产值将达到 4500 亿美元。许多实业界人士认为, 如果说 20 世纪是微电子的世纪,

那么可以肯定 21 世纪将是光子和光电子的世纪。光电子产业将是 21 世纪市场潜力巨大、产值迅猛增长的高新技术产业，足可见光电子产业将是 21 世纪的重要的支柱产业之一。

光电子技术是 21 世纪最尖端的科学技术，它对科学技术的发展将起到巨大的推动作用。光电子技术不仅在信息科学方面，可以说它在很多科学技术领域都达到了最好的成果和最重要的记录，并创造出最新的记录。比如通过激光输出的脉冲能量，目前已达到 13PW ($1\text{PW} = 1 \times 10^{15}\text{W}$)，如将其聚集，可以想象在焦点位置上将会获得多么高的可以说是无坚不摧的能量密度和极高的温度。同样，用光电子技术也可得到最短的光脉冲并取得最高的压强。用光电子学的方法还可以得到最低的温度，可以把原子冷却到接近绝对零度。时间的测量标准长期以来（自 20 世纪 50~60 年代开始）采用铯原子钟，其精度为 30 万年差 1s；最近利用光电子技术刚刚宣布研制成功的激光钟，精度为 100 亿年差 1s，预计 10 年间将用于生活和科学工作中，例如全球定位系统（GPS）可以实现更精确的定位。用光电子方法可以做到最精密的刻画，最近用准分子激光可实现窄至 $0.1\mu\text{m}$ 的刻痕，估计最终可达到 50nm，这对超高水平集成器件的制作以及医学与生物学的研究创造了极好的条件。应用光电子技术可得到最大的信息容量，从发展的角度看，如能制成光子计算机，它的速度要大大超过电子计算机。通信的保密安全是一个非常重要的问题，可以说用光电子方法做成光子通信系统是最安全的。采用数学方法进行保密的措施，由于计算机的计算速度非常之快，密码总可以被解密；而用物理的方法，尤其是以单光子传播信息可以做到绝对保密。

光电子产业对传统产业的技术改造、新兴产业的发展、产业结构的调整优化都起着巨大的促进作用。比如，激光加工对传统机械加工进行了重要的改造，形成了一项全新的机械加工技术。对汽车、轮船等工业制造业的质量和产量的提高起到了重要作用。光电子技术具有精密、准确、快速、高效等特点，有助于全面地提高工业产品的高、精、尖加工水平，大幅度提高产品的附加值和竞争能力。同时，光电子技术派生出了许多新兴科学技术和新兴的高新技术产业，极大地推动了高新技术的发展和产业结构的调整优化。

在国防上，光电子技术也起着很重要的作用，可以说是国防军事现代化的支柱之一。最近在战争中应用大量光电子技术，如用于武器控制的光电子精确制导等在战争中起着奇特的功效。在作战时，光电子技术可以提供快速而准确的信息，用以克敌制胜。

总之，光电子技术是以电磁理论与量子理论为基础，以物质的四种形态为对象，以光—电、电—光、光—磁、磁—光、光—热、热—光、光—声、声—光等能量与信息的转换、传播、接收为目标，以光通讯、光计算、光储蓄、光传感、激光光谱、物质结构、激光加工、激光医疗、激光检测、激光武器等等为应用领域，集“光、机、电、计、材”等于一身的，最先进，最前沿，最实用，最富发展前景的高新技术。

2. 光电子学和光电子技术的产生

光学是一门历史悠久的古老的科学，中国是最早开发对光学的科学研究，在墨经上就有关于光的反射和折射的论述，在丁肇中的诺贝尔奖演讲词中特别对中国对光学的贡献作了描述。古典光学的发展为人类和科学的进步起了很大的推动作用，比如：望远镜的发明推动了天文学的发展，显微镜的发明推动了物质结构、生物学、医学、地质学的发展，等等。光学的早期发展的历史是不平坦的，经历了粒子说和波动说的长期而激烈的争论，逐步形成了迄今仍有巨大应用价值的光线光学或几何光学和波动光学。到 19 世纪由于电子学的发展和电磁场理论的出现才使得人们认识到原来光是电磁波，又由于光量子假说的出现，进一步认识

到光的波粒二象性，同时产生了量子光学，以至后来逐渐在电子学的启发下产生了光子学。一个极具震撼力的历史事件，即 1960 年激光的问世，它使古老的光学返老还童，开创了“现代光学”的新时代。

电学是一门远比光学而后发展的学科，但它的发展速度要比光学快，特别到电磁理论产生后，人们对电磁波的应用和电子的运动感到神奇并投入了极大的兴趣，并迅速形成了电子学的时代，从真空电子学，到半导体电子学，到微电子学，又发展到集成电路，一发不可收拾，为人类的现代文明做出了巨大的贡献。但是随着科学技术发展的更高、更快、更强的要求，特别随着信息时代的到来，纯电子学在许多方面受到了限制，比如电子的运动速度远比光速低得多，则使计算机的运算速度大大受限，存储的容量、电信的传输信息的容量、以及电磁干扰等问题，人们企盼着光的特点的发挥；另一方面现代光学和光子学的发展许多也是借助了电子学的方法和思路，比如光的振荡、放大、变频、光信息处理、频谱的分析等等均来源于电子学或与电子学类似，只不过是进入了更高的频率——光频。从而出现强-强联合和优势互补的自然条件和相结合发展的历史必然，虽然该发展过程已有先期的历史，但是直至当前迎接真正信息时代到来的时刻，光电子学及光电子技术领域的真正形成和发展，方才成为历史的必然。光电子学与光电子技术的产生的图解和重大的历史事件如图 1 所示。

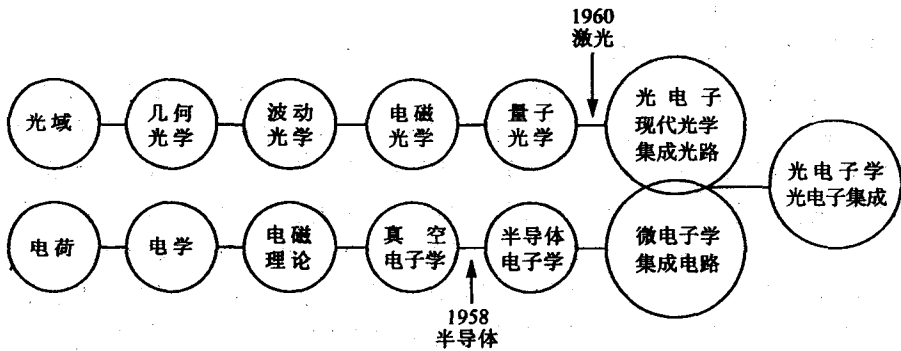


图 1 光电子学和光电子技术的产生

在回顾光电子学的形成历史时，特别是现代光学产生历史时，不能忘记它们的真正奠基人，即相对论的创始人 A. 爱因斯坦 (Albert Einstein)，他在建立相对论的同年 (1905 年) 发表了“关于光的产生和转化的一个启发性观念”的论文，论证光的量子性，揭示波粒二象性，得出了光电效应定律，1916 年发表了“关于辐射的量子理论”的论文，提出受激辐射和受激吸收的理论，成为激光和现代光电子学的理论基础，荣获 1921 年诺贝尔物理学奖。1958 年 C.H. 汤斯 (Charles H. Townes) 等提出了激光器的构想，1960 年 T.H. 梅曼 (Theodore H. Maiman) 研制成功了第一台以红宝石为工作物质的固体激光器，从而吹响了人类开始向激光和现代光学进军的号角，以至于为光电子技术的真正形成与发展开辟了大门。

3. 光电子技术的分类及应用范围

光电子技术包括非常广阔的内涵，粗略的可以分为三个大的领域：(1) 真空光电子技术。它主要研究真空中的光电转换和光电子运动过程与相关规律，最常见的应用器件比如有显像管、光电倍增管等真空器件。(2) 固体 (半导体) 光电子技术。它主要研究固体 (特别是半导体) 材料中有关光子与光电子运动规律、相关材料及应用器件，常见的器件比如有

ED、LED、CCD、OEIC等固体器件。(3)激光光电子技术。其中主要的内容是有关各类激光与相关器件的研发和在各种领域和交叉学科中的应用技术。

光电子技术的应用范围非常广泛，正如前面已提及的，它已渗透并应用到工、农、兵、商、医、卫、通、交、生、娱等各个方面并涉及到各种人群。以下仅罗列一些应用举例。

信息领域：光通讯，光盘存储，光信息处理，光计算……

能源领域：太阳能变电能，引发惰性约束核聚变发电……

医疗领域：激光手术（眼科、外科），光针灸，内窥……

工业加工：打孔、切割、焊接、退火、表面处理……

精密检测：物理量精密测量、光纤传感、激光光谱仪……

生物工程：激光镊、激光刀……

军事领域：激光打靶、制导、夜视、激光热武器、光雷达……

生活应用：电视机显示器、遥控器、非接触红外测试、洗手冲水系统、打电话、看电视、听音乐、健身、激光照排、激光打印、扫描仪、传真机……

娱乐场：激光后台背景幻灯……

商业领域：激光防伪商标、立体全息摄影……

环境领域：大气监测、环境保护……

4. 光电子技术发展趋势与展望

随着社会的发展，技术的进步，光电子学与光电子技术更是与时俱进，飞速的发展，它正以材料的多样化，波长的范围的扩展，谱线的精细，功率范围，应用领域的扩大，以及器件质量和集成化程度雪崩式延伸，并渗透到和深刻的影响着世界的各种标志性的领域。

激光的波长正向更短方向发展，已研制成功 X-射线激光，使对物质结构的研究可以深入到 Å 的量级；在激光功率方面，超强功率的激光 TW (10^{12} 瓦) 级激光已使我们掌握了光与物质相互作用研究和应用的强有力的工具；脉冲窄至飞秒 (10^{-15} 秒) 或更短的激光，为科学研究或探测已提供了更加有价值的手段；光电子技术中的多样性的发展和五彩缤纷的光电子器件使得它更加适应广泛的需求；随着光刻精度正从微米量级向纳米量级的发展，已研制出第三代 OEIC；随着纳米时代的到来，更加促进了光电子技术的应用将向着更精、更小、更细，并且具有高性能、高可靠、高实用性的方向发展。

光电子技术发展的一个重要标志和趋势是在信息科学中实现三“T”的目标，即通讯速度达 1T/s (1 万亿比特/秒)；计算机速率达 1T/s 和光盘存储密度达 1T/in² (1 万亿比特/平方英寸)。具体说，一根光纤可在 1s 内传输 10Tb 的信息；并行运算上亿次的计算机，已为更高速的串行计算所代替；一张 3 寸光盘足以存储我国最大图书馆的全部资料。从而由于通讯快捷、计算迅速、存储浩瀚，人工智能的完美实现，这才是真正进入信息时代。实现如此目标的重任显然将落在光电子技术的肩上，协同其他科学技术的共同发展，人类定将迎接一个更加光辉而美好的未来。

目 录

绪 论	1
-----	---

基 础 篇

第 1 章 激光原理概要	1
1.1 激光产生的基本原理	1
1.2 激光器件与激光特性	9
第 2 章 光频域电磁场理论	16
2.1 麦克斯韦方程组及其物理意义	16
2.2 平面电磁波的性质	19
2.3 光的电磁理论	22
2.4 光谐振腔中的光场模式与激光模式	23
2.5 线性光学系统的光学形式量子化理论概述	26
第 3 章 光的传播与物质光学性质的关系	54
3.1 物质的光学性质	54
3.2 光的吸收与色散	60
3.3 光的折射与双折射	63
3.4 光的反射与散射	65
第 4 章 光与物质相互作用的各种效应	71
4.1 电光与光电效应	71
4.2 磁光效应	75
4.3 声光与光声效应	78
4.4 光的二向色性与维格特效应	82
4.5 强光导致的介质损伤与破坏	85
第 5 章 激光器	89
5.1 固体激光器	89
5.2 He-Ne 气体激光器	107
5.3 CO ₂ 激光器	116

5.4	氩离子激光器	123
5.5	准分子激光器	129
5.6	染料激光器	130
5.7	半导体激光器	134
5.8	化学激光器	141
第6章	光束的变换与处理	143
6.1	光的调制方法与器件	143
6.2	光的解调方法与器件	154
6.3	各类常用的光学元件与系统	158
应 用 篇		
第7章	激光光电子技术在精密测量方面的应用	175
7.1	长度、速度、角度、角速度的精密测量	175
7.2	物体探测装置	183
7.3	激光光电子仿形计量传感器	187
7.4	电流和磁场的激光检测	192
第8章	激光加工技术	196
8.1	激光加工技术的地位和主要特点	196
8.2	激光加工的物理基础	197
8.3	激光焊接技术及其应用	202
8.4	激光切割	211
8.5	激光表面合金化与熔覆	217
8.6	激光在精密加工中的应用	226
8.7	取向硅钢的激光处理	227
第9章	光电子激光光谱技术	231
9.1	激光喇曼光谱的原理及光谱仪的结构	231
9.2	激光光声光谱	241
9.3	红外傅立叶变换光谱	251
第10章	傅立叶光学(信息光学)及应用简介	263
10.1	透镜的傅立叶变换功能	263
10.2	频谱分析和空间滤波	264
10.3	空间滤波技术应用举例	269

第 11 章 光全息术	275
11.1 全息照相的基本原理	275
11.2 全息照相的分类与装置	279
11.3 全息照相的应用举例	281
第 12 章 光通信	288
12.1 光纤通信	288
12.2 激光大气通信 (空间激光通信)	312
第 13 章 光信息存储与显示技术	314
13.1 激光光盘存储技术简介	314
13.2 激光在信息输出设备中的应用	315
第 14 章 激光光电子技术在医学与生命科学中的应用	319
14.1 激光在医学与生命科学领域中的应用的机理	319
14.2 准分子激光角膜手术	321

基础篇

第 1 章 激光原理概要

众所周知，光电子技术的真正形成与发展是和激光的问世与激光技术的发展密切相关的。实际上激光技术业已成为光电子技术的应用与发展的龙头，因此在谈及光电子技术时首先必须要了解激光和与激光相关的技术。作为本书的开头，在本章将对激光的原理作以概要的回顾和介绍。

1960 年美国物理学家梅曼(T. H. Maiman)在微波激射技术基础上，成功地制成了世界上第一台激光器——红宝石激光器，成为继原子能、计算机和半导体之后，20 世纪又一重大的科学发明。激光技术的发展，使一系列的新颖学科脱颖而出，诸如激光物理、激光化学、激光医学、激光生物学、激光光谱学以及激光电子学等交叉学科和边缘学科相继形成，激光技术开创了人类文明的新纪元。

激光即受激辐射光放大，英文是 Light amplification by stimulated emission of radiation，缩写成 Laser，曾译成莱塞或镭射等。由此可见，产生激光的关键是受激辐射和光放大。

1.1 激光产生的基本原理

1.1.1 光和物质的相互作用

光和物质的相互作用就是光子与原子的相互作用，可分为吸收、自发辐射和受激辐射三种物理过程。

1. 吸收

设想原子具有 E_1 和 E_2 两个能级， E_2 为高能级(或称上能级)， E_1 为低能级(或称下能级)， $E_2 > E_1$ 。 E_1 可以是基态，也可以不是。如果有一个原子开始时处于低能级 E_1 上，当有一个能量为 $h\nu_{21} = E_2 - E_1$ 的光子接近这个原子时，则它就有可能吸收这个光子，从而提高它的能量状态，从 E_1 能级跃迁到 E_2 能级，如图 1-1 所示。当然，如果光子频率不满足关系 $h\nu_{21} = E_2 - E_1$ ，原子是不会吸收这一光子而发生跃迁的。

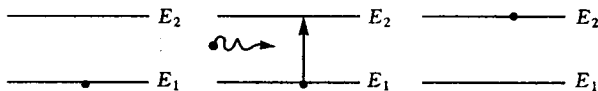


图 1-1 吸收过程

设处于能态 E_1 的原子数密度为 n_1 ，光的辐射能密度为 $u(\nu)$ ，则单位体积、单位时间内吸收光子而跃迁到高能级态 E_2 去的原子数 n_{12} 应该与 n_1 和 $u(\nu)$ 成正比，因而有

$$n_{12} \propto n_1 u(\nu)$$

$$n_{12} = B_{12} n_1 u(\nu) \quad (1-1)$$

式中 B_{12} 为比例系数, 称为吸收系数。 $B_{12} u(\nu)$ 称为吸收速率, 用 ω_{12} 表示, 于是上式可写成 $n_{12} = n_1 \omega_{12}$ 。

2. 自发辐射

从经典力学的观点来讲, 一个物体如果势能很高, 它将是不稳定的。与此类似, 处于高能态的原子也是不稳定的, 它们在高能态停留的时间一般都非常短, 大约在 10^{-8} s 的数量级, 所以我们常常说, 激发态的寿命约为 10^{-8} s。在不受外界的影响时, 它们也会自发地返回到较低能态去, 从而放出光子, 光子能量为 $h\nu_{12} = E_2 - E_1$ 。

这种自发地从高能态返回较低能态而放出光子的过程, 叫做自发辐射过程。显然, 如果处于高能态 E_2 的原子数密度为 n_2 , 则自发辐射的光子数为

$$n_{21} = n_2 A_{21} \quad (1-2)$$

式中 A_{21} 为自发辐射系数, 图 1-2 表示了自发辐射的过程。

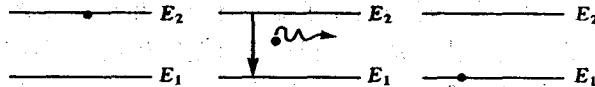


图 1-2 自发辐射过程

自发辐射的特点是这种过程与外界作用无关。各个原子的辐射都是自发地、独立地进行的, 因而各个原子发出来的光子在发射方向、偏振态和初位相上都是随机的。此外, 由于原子激发态不止一个, 不同原子可能处于不同能态上, 在不同能级间进行跃迁, 因此, 自发辐射光的频率不可能是单一的。除激光器光源以外, 普通光源的发光都属于自发辐射。例如霓虹灯, 当灯管内的低气压氖原子, 由于加上了高电压而放电时, 部分氖原子被激发到各个激发态的能级。当它们从激发态跃迁回到基态时, 便发出包含多种频率的红色光。从这里可以看到, 普通光源发出来的光, 其频率成分极为复杂, 发射方向参差不齐, 偏振状态无法确定, 初位相也各不相同, 因而是非相干光。

3. 受激辐射

爱因斯坦于 1905 年推广了普朗克的能量子概念, 提出了光量子的假说, 因而成功地解释了光电效应。1917 年, 爱因斯坦又从纯粹的热力学观点出发, 用具有分立能级的原子模型来推导普朗克辐射公式, 在这一工作中, 爱因斯坦预言了受激辐射的存在。40 多年以后, 当第一台激光器开始运转时, 他的这一预言也得到了有力的证实。

处于激发态 E_2 的原子在发生自发辐射之前, 如果受到外来光子的刺激, 若光子能量恰好满足 $h\nu = E_2 - E_1$, 它就会因感应而引起从 E_2 能态向 E_1 能态的跃迁, 同时辐射出一个与外来光子全同的光子, 这种过程就叫做受激辐射, 如图 1-3 所示。单位体积、单位时间内受激辐射原子数可以写为

$$n'_{21} = B_{21} n_2 u(\nu) \quad (1-3)$$

式中 B_{21} 为比例系数, 称为受激辐射系数, $B_{21} u(\nu)$ 称为受激辐射速率, 用 ω_{21} 表示, 它

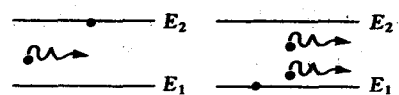


图 1-3 受激辐射过程

表征原子体系在外来光辐射作用下,产生 E_2 到 E_1 受激跃迁的本领,于是上式便可写为 $n'_{21} = n_2 \omega_{21}$ 。受激辐射具有与自发辐射完全不同的特点,所辐射出来的光子与外来刺激的光子具有完全相同的频率、相同的偏振态、相同的位相。而且,由于输入一个光子,就可以同时得到两个完全一样的光子;这两个光子又可再刺激其他原子引起受激辐射,产生四个完全相同的光子。以此类推,就能在一个入射光子的作用下,获得大量的量子态全同的光子,即形成了光放大。激光光束的一些新颖特点主要是根源于大量的光子都处于同一量子态。

1.1.2 三个系数间的关系

我们已讨论了吸收、自发辐射和受激辐射三个过程,并分别引出了表征这三种过程中跃迁本领强弱的三个系数,即 B_{12} , A_{21} , B_{21} 。尽管这三个系数有着不同的含义,但既然都是表征同一原子的特性,它们之间必然存在着内在联系。现在,就来讨论这种联系。

当光和原子相互作用时,必然同时存在着吸收、自发辐射和受激辐射三个过程,达到平衡时,单位体积、单位时间内通过吸收过程从基态跃迁到激发态去的原子数,等于从激发态通过自发辐射和受激辐射跃迁回基态的原子数。所以在平衡条件下,下列等式应该成立。

$$n_{12} = n_{21} + n'_{21}$$

利用(1-1), (1-2), (1-3)式,可得

$$n_1 B_{12} u(\nu) = n_2 A_{21} + n_2 B_{21} u(\nu)$$

或

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{\frac{n_1}{n_2} B_{12} - B_{21}} \quad (1-4)$$

在处于热平衡状态下,粒子数密度按能量的分布遵从玻耳兹曼分布率,即 n_1 , n_2 满足下列关系式

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right] = \exp\left[-\frac{h\nu}{kT}\right] \quad (1-5)$$

式中 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 为玻耳兹曼常量, T 为热力学温度。因 $E_2 > E_1$, 所以

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right] < 1$$

即 $n_2 < n_1$ 。所以在正常情况下,处于最低能态的原子数是最多的,能级越高,处于该能级的粒子数就越少。

从氦原子的某一激发态和基态能级来看,它们的能量差 $\Delta E = 16.9 \text{eV} = 27.04 \times 10^{-19} \text{J}$

若该原子体系处于室温 ($T = 300 \text{K}$) 时,则根据玻耳兹曼能量分布率,在热平衡状态下,处于激发态的原子数密度 n_2 与处在基态上的原子数密度 n_1 之比为

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left[-\frac{\Delta E}{kT}\right] = \exp\left[-\frac{27.04 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300}\right] = e^{-653} \ll 1$$

将(1-5)式代入(1-4)式中,可得到光的辐射能量密度

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12} e^{h\nu/kT} - B_{21}} \quad (1-6)$$

把此式同普朗克辐射公式进行比较,就能够得到吸收系数、自发辐射和受激辐射系数之间的

关系, 即

$$B_{12} = B_{21} = B \quad (1-7)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (1-8)$$

这是爱因斯坦受激辐射理论的重要关系式。

从上面分析中可以看出, 三个过程中, 受激辐射是产生激光的基础。受激辐射过程不仅能产生大量的具有相同量子态的光子, 而且实现了光放大。但是, 光与原子体系相互作用时, 总是同时存在着吸收、自发辐射和受激辐射三个过程, 不可能要求只存在受激辐射过程。问题是如何创造条件, 使受激辐射过程胜过吸收过程和自发辐射过程, 从而在三个过程中占主导地位, 这是产生激光的关键。

理论和实践都证明, 为使受激辐射胜过吸收过程, 就必须造成粒子数反转分布; 使受激辐射超过自发辐射, 就需要借助光振荡。

1.1.3 粒子数反转

1. 受激辐射与吸收

根据(1-1)与(1-3)式我们可以得出单位时间、单位体积内原子体系吸收的光能量为 $n_1 u(\nu) Bh\nu$ (为简单起见, 我们用 ν 代替 ν_{12} 和 ν_{21} , 以下同), 受激辐射产生的光能量为 $n_2 u(\nu) Bh\nu$, 所以在单位体积、单位时间内产生的净光能量为 $(n_2 - n_1) u(\nu) Bh\nu$ 。设此原子体系的体积元为 dV , 截面积为 S , t 为辐射作用时间, 长度方向沿 z 轴, dJ 表示光能量的变化, 则单位体积、单位时间内产生的净光能量可表示为

$$\frac{dJ}{t dV} = \frac{dJ}{t S dz} = (n_2 - n_1) u(\nu) Bh\nu \quad (1-9)$$

若引入光强 I , 则有

$$I(\nu) = \frac{J}{tS} = cu(\nu)$$

式中 c 表示光速。则(1-9)式可以写成

$$\frac{dI}{dz} = (n_2 - n_1) \frac{I(\nu)}{c} Bh\nu$$

将(1-8)式代入, 得

$$\frac{dI(\nu)}{dz} = (n_2 - n_1) I(\nu) \frac{c^2 A_{21}}{8\pi\nu^2}$$

令

$$\alpha(\nu) = (n_2 - n_1) \frac{c^2 A_{21}}{8\pi\nu^2} \quad (1-10)$$

则上式可写成

$$\frac{dI(\nu)}{dz} = \alpha(\nu) I(\nu)$$

上式的解为

$$I(\nu, z) = I_0(\nu) e^{\alpha(\nu)z} \quad (1-11)$$

由此可见, 当 $\alpha(\nu) > 0$ 时, 光强将按指数规律增强; 当 $\alpha(\nu) < 0$ 时, 光强将按指数规律衰

减。而当 $n_2 > n_1$ 时, $\alpha(\nu) > 0$; 当 $n_2 < n_1$ 时, $\alpha(\nu) < 0$ 。在实际的原子体系中, 根据玻耳兹曼的平衡态能量分布率(1-5)式, 处于高能级的原子数总是比低能级的原子数少。在通常情况下, 原子体系总是处于热平衡状态的, 所以 n_2 总是小于 n_1 , 亦即 $\alpha(\nu)$ 总是负的, 吸收的能量总是大于受激辐射的能量。也就是说, 吸收过程总是胜过受激辐射过程。如果我们能够通过某种方法破坏粒子数的热平衡分布, 使 $n_2 > n_1$, 那么 $\alpha(\nu) > 0$, 受激辐射能量将大于吸收能量, 受激辐射过程将胜过吸收过程。这时的粒子数分布已经不是正常状态分布了, 我们把这种反正常分布叫做粒子数反转。

总之, 受激辐射过程和吸收过程是矛盾的。在通常情况下, 吸收过程总是主要的, 受激辐射过程是次要的。但是在特定的条件下, 在破坏了原子体系的平衡态分布后, 就有可能使受激辐射过程占压倒的优势。这样一个特定的状态, 就是粒子数反转分布。

2. 能实现粒子数反转的物质

各种物质并非都能实现粒子数反转。在能实现粒子数反转的物质中, 也不是在该物质的任意两个能级之间都能实现粒子数反转。要实现粒子数反转, 必须具备一定的条件。首先, 要看这种物质是否具有合适的能级结构; 其次要看是否具备必要的能量输入系统, 以便不断地从外界供给能量, 使该物质中有尽可能多的粒子吸收能量后, 从低能级不断激发到高能级上去, 这一能量供应过程叫做“激励”、“激发”、或者叫做“抽运”、“泵浦”。现在假定, 抽运过程能保证满足, 那么我们来看物质原子应该具有什么样的能级结构才有可能实现粒子数反转。

(1) 二能级系统

我们这里介绍的所谓几能级系统, 并不是说某种物质原子只具有这几个能级结构, 而是指与产生激光直接相关的能级个数。

如果某种物质只具有二个能级, 用有效的抽运手段不断地向这个二能级体系提供能量, 使处于基态 E_1 的原子尽可能多、尽可能快地激发到激发态 E_2 上去。这样, 是否有可能造成 $n_2 > n_1$ 的局面呢? 图 1-4 为一个二能级系统的示意图。根据(1-7)式, $B_{12} = B_{21} = B$, 所以原子的吸收速率 w_{12} 和受激辐射速率 w_{21} 也应相等。即 $w_{12} = w_{21} = w$ 。 A_{21} 为 E_2 向 E_1 进行自发辐射的系数, 也就是自发辐射的速率。令 E_1 和 E_2 能级上单位体积内的原子数分别为 n_1 和 n_2 , 则 n_2 的变化率为

$$\frac{dn_2}{dt} = w(n_1 - n_2) - n_2 A_{21} \quad (1-12)$$

在达到稳定时, 粒子数 n_2 不再变化, 即 $\frac{dn_2}{dt} = 0$ 。于是由(1-12)式得出

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{w}{A_{21} + w}$$

从上式可以看出, 不管使用的激励手段有多么好, $A_{21} + w$ 总是大于 w 的。就是说, n_2 总是小于 n_1 , 只有当 w 十分大时, n_2/n_1 才会接近 1, 从数学上看

$$\lim_{w \rightarrow \infty} \frac{w}{A_{21} + w} = \lim_{w \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{A_{21}}{w} + 1} = 1$$

所以, 对二能级结构的物质来讲, 不可能实现粒子数反转。

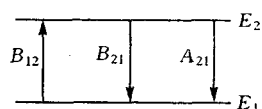


图 1-4 二能级系统

(2) 三能级系统

在三能级系统的情况下，是否能在其中的某两个能级之间形成粒子数反转呢？理论分析和实验结果都表明，三能级系统是有可能实现粒子数反转的。红宝石激光器就是采用一种三能级系统的工作物质。

图 1-5 为三能级系统的示意图。其中 w 和 A 的含义同前。如果抽运过程使三能级系统的原子从基态 E_1 迅速地以很大的速率 w 抽运到 E_3 ，处于 E_3 的原子可以通过自发辐射回到 E_2 或 E_1 。假定从 E_3 回到 E_2 的速率 A_{32} 很大，大大超过从 E_3 直接回到 E_1 的速率 A_{31} 和从 E_2 回到 E_1 的速率 A_{21} ，则当泵浦抽运速率 w 大大超过 w_{23} 或 w_{12} 时，能级 E_2 和能级 E_1 之间就有可能形成粒子数反转。用数学公式来表示时，可先写出能级 E_3 和 E_2 上的粒子数变化率的方程：

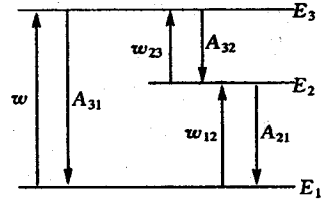


图 1-5 三能级系统

$$\frac{dn_3}{dt} = wn_1 - A_{31}n_3 + w_{23}n_2 - A_{32}n_3 \quad (1-13)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = w_{12}n_1 - A_{21}n_2 - w_{23}n_2 + A_{32}n_3 \quad (1-14)$$

在达到稳定时， $\frac{dn_3}{dt} = \frac{dn_2}{dt} = 0$ 。则由(1-13)，(1-14)式可得

$$n_3 = \frac{wn_1 + w_{23}n_2}{A_{31} + A_{32}}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{w_{12} + \frac{wA_{32}}{A_{31} + A_{32}}}{-\frac{w_{23}A_{32}}{A_{31} + A_{32}} + A_{21} + w_{23}} \quad (1-15)$$

因为已经假定 $A_{32} \gg A_{31}$ ， $w \gg w_{12}$ 所以(1-15)式的分子可以化为

$$w_{12} + \frac{wA_{32}}{A_{31} + A_{32}} = w_{12} + \frac{w}{\frac{A_{31}}{A_{32}} + 1} = w_{12} + w = w \quad (1-16)$$

(1-15)式中的分母可以化为

$$\frac{-w_{23}A_{32}}{A_{31} + A_{32}} + A_{21} + w_{23} = -\frac{w_{23}}{\frac{A_{31}}{A_{32}} + 1} + A_{21} + w_{23} = A_{21} \quad (1-17)$$

把(1-16)、(1-17)代入(1-15)，得

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{w}{A_{21}}$$

可见，只要使外界抽运速率足够大，就有可能使 $w > A_{21}$ ，从而使 $n_2 > n_1$ ，这样就有可能实现 E_2 和 E_1 两级间的粒子数反转。

我们常用的红宝石激光器，就是以红宝石作为工作物质的。它是三能级系统的激光器，它的 E_3 能级的寿命很短，约为 5×10^{-8} s；而 E_2 能级的寿命很长，约为 3ms，这个能级称为亚稳态。这就是说，当原子被外界激励到 E_3 能级后，由于 E_3 能级寿命短，很快就转移到 E_2 能级上去，而 E_2 是亚稳态，能级的寿命较长，于是就在 E_2 和 E_1 能级间形成了粒子