

信息光电子学基础

朱祖华 编著

D232.6

浙江大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了信息光电子学基本单元——激光的产生、传播、调制、变频和探测的基本原理和理论，有关器件的工作原理及应用。并简要地介绍了光纤通信技术。本书注意理论与实际的联系，收入了不少实验资料和数据，反映了光电子学领域的一些最新研究成果和发展动向。

本书可作为高等院校信息电子类、应用物理类专业本科生或研究生相关课程的教材。并可供从事光电子技术工作的科技人员和高等院校其它有关专业的师生参考。

信息光电子学基础

朱祖华 编著

责任编辑 应伯根

*

浙江大学出版社出版

杭州文教印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

*

开本：850×1168 1/32 印张：21.75 字数：543千

1990年7月第1版 1990年7月第1次印刷

印数：0001~2000

ISBN 7-308-00396-5

TP·029 定价：5.25元

前 言

信息光电子学是当前高科技发展的中心之一，以它为基础的光通信技术，尤其是光纤通信技术，发展十分迅速，对人类生活各方面产生了广泛和深远的影响。信息光电子学也是正处于发展中的光信息处理和光计算技术的基础。

本书是作者自1982年来在为无线电电子工程学系电子类专业本科生讲授光电子学课程教学实践的基础上编写而成。全书共十章。第一章至第五章介绍了激光产生的理论，即激光物理基础和常用激光器。第六章至第九章讨论了光的传播、光的调制、光的频率（或波长）的变换以及光的探测。第十章则简要地介绍了光纤通信及其发展。全书的内容是以光信息传输整个过程为线索串联起来。本书在编写中注重了对基础理论、基本原理和基本概念的清晰描述及不同学科之间关系的阐明；并注意引用光电子技术的最新成果和反映发展的动向。希望读者通过本书的学习后对光电子学领域有一较好的了解，能够掌握基本理论知识，举一反三，灵活运用。

科学技术发展至今，各学科间的相互渗透、相互促进已成为最重要的特点之一。电子类专业学生不了解近代光学的情况理应改变。然而根据目前教学的现实，为加强理论的系统性和本书使用的独立性，在本书中我们仍然补充了一些必要的光学基础知识，以方便读者。读者只要具有一定的普通物理、电磁理论和固体物理方面的知识，自学本书也是不难的。本书适合作为信息电

子类、应用物理类专业的本科生和研究生相关课程的教材。对于从事光电子技术工作的科技人员亦具有一定的参考价值。

本课程的教学时数以80学时为宜，讲授的内容可以根据具体情况作取舍。

本书由朱祖华编著。丁纯选编了全书的习题，并承担了书稿的抄写和绘图工作。丁桂兰编写了第十章光纤通信部分。此外，本书的编写过程中，得到了王明华副教授的帮助。

中国科学院上海光学精密机械研究所方祖捷副研究员和吴光照副研究员在百忙中仔细地审阅了全书，并提出了许多有价值的意见。对此，谨表深切的谢意。

由于学识所限及时间仓促，书中肯定会存在一些不足甚至错误之处，恳切希望读者批评指正。

作者 1990年2月于浙江大学

目 录

第一章 激光概论	1
§1.1 激光器的基本结构.....	1
§1.2 激光产生的条件.....	4
§1.3 激光的特点.....	9
习题一	16
第二章 光学谐振腔	17
§2.1 光学谐振腔的特点.....	17
§2.2 光学谐振腔的类型.....	20
§2.3 光学谐振腔的稳定性条件.....	24
§2.4 光学谐振腔中的光场分布——高斯光束.....	33
§2.5 光学谐振腔的计算.....	56
§2.6 光学谐振腔的谐振频率.....	62
§2.7 光学谐振腔的损耗.....	72
§2.8 高斯光束的变换.....	78
习题二	92
第三章 光和物质的相互作用	96
§3.1 自发辐射、受激吸收和受激辐射之间的关系	97
§3.2 光谱线展宽.....	102
§3.3 光和物质相互作用的经典理论及其修正.....	121
§3.4 增益饱和.....	131

习题三	145
第四章 激光振荡理论	146
§ 4.1 激光振荡的阈值条件	146
§ 4.2 激光振荡的频率	156
§ 4.3 激光振荡的功率和最佳耦合输出	160
§ 4.4 连续稳定激光器的工作特性	170
§ 4.5 模式锁定	175
§ 4.6 调Q技术	195
§ 4.7 激光器中的张弛振荡	209
习题四	215
第五章 常用激光器	218
§ 5.1 常用激光器概述	218
§ 5.2 氦氖激光器	223
§ 5.3 二氧化碳激光器	227
§ 5.4 掺钕钇铝石榴石 ($\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$) 激光器	232
§ 5.5 染料激光器	234
§ 5.6 半导体激光器	239
习题五	265
第六章 光的传播	266
§ 6.1 介质波导的模式	266
§ 6.2 平板波导的TE模和TM模	271
§ 6.3 耦合模理论	276
§ 6.4 周期性波导	279
§ 6.5 分布反馈激光器	289
§ 6.6 定向耦合	299
§ 6.7 漏泄型介质波导	304
§ 6.8 平方律折射率波导	309

习题六	324
第七章 光的调制	325
§ 7.1 光在晶体中的传播	326
§ 7.2 电光效应	345
§ 7.3 电光调制	367
§ 7.4 波导调制器	385
§ 7.5 电光检测与取样	395
§ 7.6 声光调制	407
§ 7.7 磁光调制	437
§ 7.8 半导体激光器的调制	443
习题七	454
第八章 光的频率变换——非线性光学效应	457
§ 8.1 非线性极化效应	458
§ 8.2 非线性介质中的波传播——波耦合方程式	471
§ 8.3 光学二次谐波产生(光倍频)	476
§ 8.4 光参量放大和振荡	494
§ 8.5 频率上转换	509
§ 8.6 受激喇曼散射	512
§ 8.7 相位共轭光学	525
§ 8.8 光学双稳态	541
习题八	556
第九章 光的探测	559
§ 9.1 光探测器的一般问题	559
§ 9.2 光电倍增管	577
§ 9.3 光电二极管	587
§ 9.4 雪崩光电二极管	597
§ 9.5 长波长光电探测器	602

§ 9.6 光电导探测器.....	696
习题九	616
第十章 光纤通信.....	618
§ 10.1 概论.....	618
§ 10.2 光学纤维.....	624
§ 10.3 光通路部件.....	635
§ 10.4 光端机.....	640
§ 10.5 光纤通信系统.....	652
§ 10.6 光纤通信系统展望.....	661
参考文献	668
索引	674

第一章 激光概论

60年代初，人类第一台激光器制成了。这一世界科学技术史上划时代的事件，对科学技术各个领域产生了巨大和深刻的影响，改变了和正在改变世界的面貌。

激光器作为一种新型的光源，在光的亮度、方向性、单色性和相干性等各个方面，具有普通光源远不能及的优点。而激光又是光电子学学科发展的前题和基础。正因如此，了解和研究激光对于学习和应用光电子技术具有重要的意义。

本章的主要目的是，通过对激光器的基本结构、激光产生的条件以及激光的特点作简要的介绍，以获得初步的概念，为后面各章内容的学习作准备。

§ 1.1 激光器的基本结构

激光器一般必须具备三个基本部分：激光工作物质（或称激活介质），光学谐振腔和泵浦源（或称激励能源）。在第五章中，我们将对几种最常用的激光器的基本结构分别加以介绍。这里我们先以红宝石激光器为例，对激光的基本结构加以说明。图 1.1 是它的结构示意图。

1.1.1 激光工作物质

激光器首先按工作物质分类。气体激光器是以不同的气体为工作物质的，例如 He-Ne 激光器的工作物质是按一定气压比混合的氦原子和氖原子气体，CO₂ 激光器的工作物质是 CO₂ 分子气

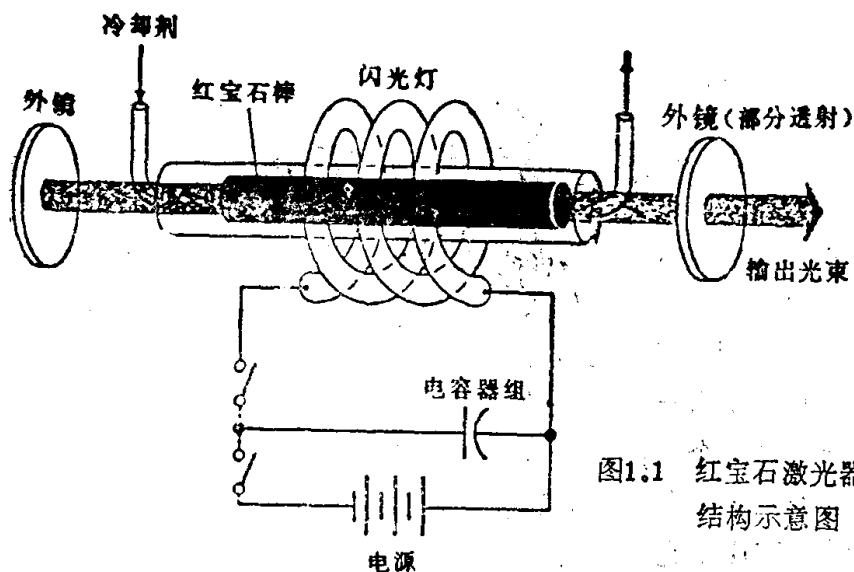


图1.1 红宝石激光器基本结构示意图

体等。固体激光器是以不同的晶体为工作物质的，例如，YAG激光器工作物质是掺钕的钇铝石榴石 ($\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{15}$) 晶体。染料激光器的工作物质是在一定的波长范围内具有强烈吸收性的有机染料。而半导体激光器的工作物质则是人们熟知的砷化镓或磷化铟化合物半导体材料。

红宝石激光器 (ruby laser) 的工作物质是一根红宝石晶体棒，晶体的基质是 Al_2O_3 ，激活离子是作为杂质掺入基质的三价铬离子 Cr^{3+} ，其重量百分比约为 0.05%，一对激光能级 (2E 的低能级 E 和基态能级 E_0) 之间的受激辐射，发出波长为 $\lambda = 0.6943 \mu\text{m}$ 的红光，见图 1.2 所示。晶体对红光的折射率约为 1.76。

1.1.2 光学谐振腔

光学谐振腔构成的方式因激光器而异。以红宝石激光器为例，在红宝石棒两端共轴地各放上一块反射镜，调节反射镜的镜面保持相互平行并与光轴垂直，这样便构成了一个光学谐振腔，

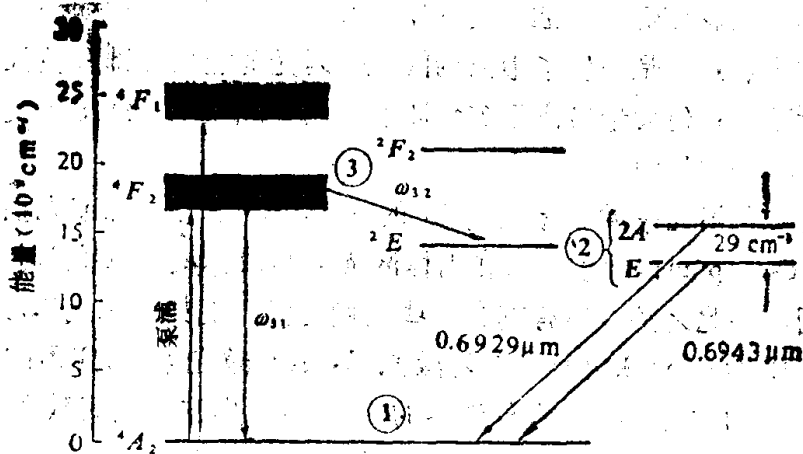


图1.2 红宝石激光器工作有关的能级

两块反射镜中一块为全反射镜（对于 $0.6943 \mu\text{m}$ 的红光反射率 $R_1 \approx 1$ ），另一块为部分反射镜（对于 $0.6943 \mu\text{m}$ 的红光反射率 $R_2 < 1$ ），激光由此输出。反射镜面上镀了多层介质膜以获得对应于激光波长下所需的镜面反射率。

也可以将反射镜直接做在红宝石棒上。将晶体棒两端面磨平抛光使相互平行并与光轴垂直，再镀上多层介质膜以获得所需的反射率。于是，晶体棒两端面便构成了一光学谐振腔，激光在腔内往返传播获得增益，产生振荡并输出。

1.1.3 泵浦源

从根本上说，激光器是一种能量变换器，激光的产生和输出是以消耗别种形式的能量为代价的。因此，任何激光器都必定有提供能量的源泉，这就是激光器的泵浦源。围绕红宝石棒的螺旋形闪光灯，对闪光灯放电提供激励的电容器组以及总电源，构成了红宝石激光器的泵浦源。在工作时，当电容器组接通电源后得到充电，由触发器（图中未画出）给闪光灯一个脉冲高压，在灯

管中形成火花使灯管导通，这时储存在电容器组的电能便通过灯管释放出来，于是产生了很强的闪光。闪光的能量，部分被红宝石棒所吸收，使大量铬离子被泵浦到激光上能级，在满足一定条件时，将产生受激辐射放大。

这种利用光来激励激光物质的方式称为光泵浦或光抽运 (optical pumping)，常在固体激光器和液体染料激光器中得到应用。除此之外，还有其他一些激励方式，例如，在气体激光器中（如He-Ne激光器，CO₂激光器，Ar⁺激光器等）应用的气体放电激励方式，半导体激光器的P-N结正向注入电流激励的方式等。不同的激励方式，能量转换的效率不同。

§ 1.2 激光产生的条件

光波通过介质传播时，其强度将因吸收而减弱，这是早为人们所熟知的事实。而激光的产生却向我们展示了一种新的物理现象——光的受激辐射放大 (Light amplification by stimulated emission of radiation—Laser)。换言之，当满足一定的条件时，光可以通过受激辐射过程而获得放大。什么是激光产生的条件？受激辐射是怎样的一种过程？下面将作一简要的说明。

1.2.1 受激辐射

1917年，爱因斯坦 (A. Einstein) 在《关于辐射的量子理论》的著名论文中，首次提出了受激辐射 (stimulated emission) 和自发辐射 (spontaneous emission) 的概念。他从光量子的概念出发，提出辐射场与构成物质的原子之间的相互作用应包含自发辐射、受激辐射和受激吸收三种跃迁过程。为简单起见，我们考虑原子两个能级 E_2 (高能级) 和 E_1 (低能级) 之间跃

过程，假设这两个能级间满足辐射跃迁的选择定则。

处于高能级 E_2 的原子会自发地向低能级 E_1 跃迁，并且发射一个频率为

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1.2-1)$$

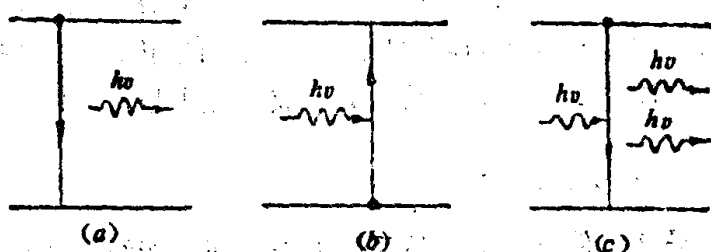


图1.3 三种跃迁过程示意图

(a) 自发辐射；(b) 受激吸收；(c) 受激辐射

的光子，这个过程称为自发辐射（参见图1.3(a)）。对于大量处于高能级 E_2 上的原子而言，由于自发跃迁产生的光辐射之间，没有确定的相位关系，它们可以各有不同的偏振方向和传播方向，所以自发辐射产生的光是非相干的荧光（fluorescence）。

处于低能级 E_1 的原子在频率为 ν 的入射光的激励下，吸收了能量为

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1.2-2)$$

的光子，从低能级 E_1 跃迁到高能级 E_2 ，这样的过程称为受激吸收（stimulated absorption），可参见图1.3(b)。

处于高能级 E_2 的原子在频率为 ν 的入射光的激励下，发射一个与入射光子完全相同的光子，而跃迁到低能级 E_1 ，这样的过程称为受激辐射。所谓受激发射的光子与入射光子相同是指两者的频率或能量由(1.2-1)或(1.2-2)式所描述，并且相应的光波的相位、偏振方向和传播方向等都相同。图1.3(c)为受激辐射的示意图。可见，光的受激辐射使入射光的强度增加了。

实际上, 光的自发辐射, 受激吸收和受激辐射这三种跃迁过程是同时存在的。对于大量粒子构成的粒子体系 (如原子或分子等), 如果其中某些处于高能级 E_2 的粒子自发辐射了能量为 $h\nu$ 的光子, 则对于其他的粒子而言, 这些光子形成的光波列就可以视为外来入射光, 处于低能级 E_1 的粒子就可能因这些光子的激励而发生受激吸收, 处于高能级 E_2 的粒子也可能因此而发生受激辐射。这一概念以后在分析激光的形成过程中是有用的。

1.2.2 粒子数反转

在热平衡条件下, 粒子体系中的粒子在各能级上的分布具有一定的统计分布规律性。这个统计规律就是玻尔兹曼分布律 (Boltzmann distribution law)^{*1}。考虑粒子的一对能级: 高能级 E_2 和低能级 E_1 。设高能级 E_2 的简并度 (degeneracy)^{*2} 为 g_2 , 低能级 E_1 的简并度为 g_1 ; 又设单位体积内处于高能级 E_2 的粒子数为 N_2 , 处于低能级 E_1 的粒子数为 N_1 , 则玻尔兹曼分布律可以写成

$$N_2 = N_1 \frac{g_2}{g_1} e^{-(E_2 - E_1)/kT} \quad (1.2-3a)$$

或
$$N_2/g_2 = N_1/g_1 e^{-(E_2 - E_1)/kT} \quad (1.2-3b)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数, T 为热平衡时的绝对温度。因为 $E_2 > E_1$, 且 $T > 0$, 所以在热平衡时有

$$N_2/g_2 < N_1/g_1 \quad (1.2-4)$$

^{*1}对于某些粒子体系, 如半导体激光器中的电子和空穴, 粒子占据能级的几率应服从费米分布律 (Fermi distribution law)。但是, 这里我们用满足玻尔兹曼分布律

的粒子体系说明受激跃迁过程和粒子数反转, 并不影响处理方法的普遍性。

^{*2}能级简并度 g_2 表示能级 E_2 是由 g_2 个不同能态所组成, 它们具有相同的能量 E_2 。

满足上式的粒子数分布，称为粒子数的正常分布，图1.4(a)为正常分布的示意图（为简化起见，图1.4中取 $g_1 = g_2$ ）。

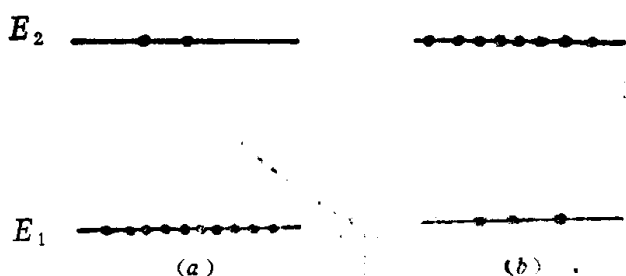


图1.4 (a) 粒子数正常分布；(b) 粒子数分布的反转

如果外界的某种因素使得处于高能级的粒子数大大增加，并达到

$$N_2/g_2 > N_1/g_1 \quad (1.2-5)$$

这时，我们称粒子体系达到了粒子数分布反转 (population distribution inversion)，见图1.4(b)。显然，达到粒子数分布反转的粒子体系不再处于热平衡的状态。

1.2.3 光的放大

在§3.1中将指出，在入射光的激励下，粒子产生受激辐射的几率与粒子产生受激吸收的几率相等。在已经达到粒子数反转的介质中，由于 $N_2 > N_1$ （为简化起见，取 $g_2 = g_1$ ），所以当入射光在介质中传播了某段距离时，粒子发生受激辐射的次数要多于发生受激吸收的次数，因此，净的效果是产生的光子将越来越多。于是，光在粒子数反转的介质中传播时将越来越强，如图1.5所示意的样子。因为光强的增量 dI 与距离的增量 dz 及光强 I 成正比，即

$$dI = \gamma I dz \quad (1.2-6)$$

增益介质

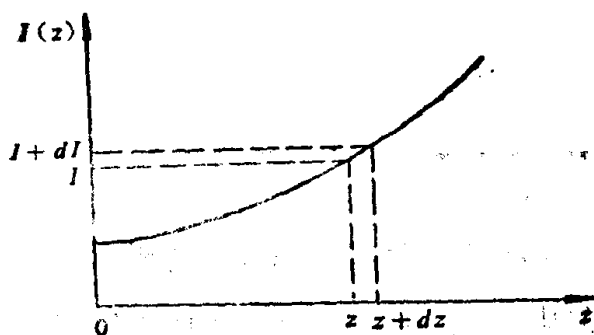


图1.5 光在增益介质中传播时得到放大

式中，比例系数 γ 称为光的增益系数 (gain coefficient)。假设 γ 不随光强 I 变化 (在第三章中，我们将证明此假设仅在光强 I 很弱时成立)，对 (1.2-6) 式积分得

$$I = I_0 e^{\gamma z} \quad (1.2-7)$$

这说明光在粒子数分布反转的介质中传播时，其强度将随传播的距离而增加。实现了粒子数分布反转的介质则被称为增益介质 (gain medium) 或激活介质 (active medium)。

由此可见，实现粒子数分布反转是获得光放大的先决条件。怎样才能实现粒子数分布反转呢？这就是靠前节所说的外界的激励能源提供的泵浦 (pumping) 作用。并不是任意介质通过泵浦作用都可以实现粒子数分布反转，需要对各种介质的能级结构和寿命加以分析和检测，以选择合适的介质作为激光工作物质。

1.2.4 阈值条件

在电子学的振荡电路中，必须对一个放大器加上足够强的正反馈才能克服电路中的损耗维持振荡。激光器实际上是一个光的自激振荡器：激活介质对光提供了增益，而光学谐振腔则提供了光的正反馈作用。当光在谐振腔中往返传播时，每次通过激活介质都得到了放大。由于光学谐振腔中存在着各种光损耗的机理，因此只有当光在谐振腔中往返一次传播所获的增益足以补偿在传播中经受的种种损耗时，才能维持稳态的振荡，产生激光。这就是产生激光的必要条件——阈值条件 (threshold condition)。

阈值条件可以用不同的参量来表示，例如阈值反转粒子数密度、阈值电流密度、阈值功率等等，视实际需要或激光器类型而定。

§ 1.3 激光的特点

1.3.1 激光的方向性

激光光束基本上是沿着激光器光轴所确定的方向向前传播的。除了半导体激光器，由于其本身结构所决定光束的发散角较大之外，一般的激光器发出的激光束发散角和在空间所张的立体角都很小。典型的数据，发散角 θ 约为 10^{-3} rad (弧度)，对应的立体角由下式估算

$$\Omega = \pi \theta^2 \quad (1.3-1)$$

当 $\theta \approx 10^{-3}$ rad (弧度) 时，得 $\Omega = \pi \times 10^{-6}$ 。这说明激光一般都以十分小的立体张角向空间传播，而不像普通光源，朝着四面八方所有可能的方向传播。由此可见，激光光束的方向性要比普通光源所发出的光好得多。