

激光原理及应用

主编 魏彪 盛新志
副主编 朱永 徐铁峰 魏莹莹

重庆大学 出版社

内 容 提 要

本书内容包括 绪论 光和物质的近共振相互作用 速率方程理论 连续激光器的工作特性 光学谐振腔理论 高斯光束 典型激光器 激光的应用等。书中每章还配有思考与练习题,书末有附录和参考文献。

该书可供测控技术与仪器专业的本科学生学习使用,也可供相关专业的学生和工程技术人员参考。

摇图书在版编目(CIP)数据

摇激光原理及应用 魏彪、盛新志主编 重庆 重庆大学出版社 2004.10

摇(测控技术与仪器专业本科系列教材)

摇陈星 魏彪 盛新志 魏堂莹

摇 I 魏...摇 II 魏...②盛...摇 III 激光理论—高等学校—教材
IV 魏堂莹

摇中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 15128 号

激光原理及应用

主 编 魏彪 盛新志

副主编 朱永瑶 徐铁峰 魏堂莹

责任编辑 谭敏 曾春燕 版式设计 谭敏

责任校对 任卓惠 责任印制 张策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人 张鹤盛

社址 重庆市沙坪坝正街 8 号重庆大学(南区)内

邮编 401331

电话 (023) 23456789

传真 (023) 23456789

网址 <http://www.cqup.com.cn>

邮箱 zhanghe@china.com (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆科情印务有限公司印刷

*

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12.5 字数 320千字

2004年 10月第 1 版 2004年 10月第 1 次印刷

印数 1—5000

定价 18.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

本书系根据“重庆大学出版社测控技术与仪器专业本科系列教材主编会议”的精神要求,在编者多年科研和教学实践的基础上编写而成。在编写过程中,既考虑了“激光原理及应用”本身的内容和体系,又考虑了非光电子专业如测控技术与仪器专业的实际需求,同时还广泛吸收了国内外相关教材的长处。与国内外目前常用教材相比,本书具有如下两个显著的特点:

(一)从光与物质相互作用的原理出发,引出速率方程理论和激光器的工作特性,进而介绍光学谐振腔理论和高斯光束,使读者对普通光与激光在发光机理上、结构上及传播规律上的异同,有一个清晰的了解和认识,便于读者更好地理解激光基本原理。

(二)在内容的取舍上,主要讲授激光原理,对激光技术则基本上不作单独介绍。相对而言,激光技术如选模技术、稳频技术等更偏向于工程应用的知识,学生只要弄清了激光的基本原理,对激光技术也就比较易于理解和掌握。为了更多地展现激光作为“神奇光源”的无穷魅力,书中不仅介绍了新近发展起来的如纳米激光器、载射线激光器等,而且介绍了激光在方方面面的应用技术,特别还增加了激光测定样品年代的应用技术、激光三维扫描应用技术等,期望提高学生对本课程的学习热情。

本书共设 15 章,参考学时约为 120~130 学时。第 1 章为绪论,介绍激光发展的历史及其特点。第 2 章介绍光和物质相互作用,主要包括光吸收和发射的理论处理,谱线加宽机制及其对唯象理论的影响等。第 3 章介绍速率方程理论,主要包括典型激光器的工作能级、小信号光的介质增益、增益饱和和对均匀和非均匀加宽介质的不同影响等。第 4 章介绍连续激光器的工作特性,主要包括均匀加宽介质激光器速率方程及模竞争、非均匀加宽介质激光器的多模振荡、激光器输出特性等。第 5 章介绍光学谐振腔理论,主要包括光学谐振腔的构成和分类、光学谐振腔的矩阵光学理论、光学谐振腔的衍射积分理论等。第 6 章介绍高斯光束,主要包括高斯光束的特性及其传播规

律、改善高斯光束特性的有关原理及方法等。第 苑章介绍典型激光器,主要包括固体激光器、气体激光器、染料(液体)激光器和新近发展起来的一些激光器等。第 愿章介绍激光的应用,主要包括在基础科学研究、通信及信息处理、军事和生物及医学中的应用等。

本书绪论由徐铁峰编写,第 员圆猿章由盛新志编写,第 源缘章由朱永编写,第 远章由魏莹莹编写,第 苑章由魏彪编写,附录由徐铁峰和朱永编写。最后,由魏彪负责全书统稿。

本书由中国工程院院士黄尚廉教授撰写了序言,潘英俊教授对书稿进行了详细审阅,并提出了许多宝贵意见,在此对他们深表谢意。在本书的出版过程中,得到了重庆大学出版社的热情帮助,在此表示感谢。

特别要说明的是,本书的编写参考了许多国内外相关教材及文献等资料,参考文献对本书的知识构成意义重大,编者在此对这些资料的作者一并表示衷心感谢。此外,研究生唐跃林、冯鹏、谭怡、刘亚楠在本教材编写过程中,对书中插图的绘制、文字的校对等付出了艰苦的劳动,在此也表示衷心感谢。

本书的编写得到了重庆大学出版社“测控技术与仪器”专业本科系列教材出版基金资助。

限于编者水平,错误和疏漏恐在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

圆园园年 源月

摇序

激光是 20 世纪人类社会 10 项最伟大的发明之一。激光从理论上提出到技术上的实现,几乎经历了半个世纪。1917 年,爱因斯坦在研究黑体辐射理论时,提出了自发辐射和受激辐射的概念。1958 年,美国的汤斯和肖洛以及前苏联的普洛霍洛夫与巴索夫,各自独立地提出了将微波量子放大器的原理拓展到光频波段的设想。1960 年,美国休斯敦实验室的物理学家梅曼研制出了世界上第一台激光器——掺铬的红宝石固体激光器。不到一年,我国的第一台激光器在中国科学院长春光学精密机械研究所诞生。此后,人们采用数百种物质实现了激光振荡和放大,其跨越的波长从亚毫米波到真空紫外,甚至到载射线的广阔电磁波谱区。激光辐射的高方向性,高亮度,高单色性高相干性,使普通光辐射黯然失色。各种激光器:固体激光器,气体激光器,半导体激光器,自由电子激光器,液体激光器等,像雨后春笋般涌现出来。目前发展的三超激光器,即超强(大功率)、超短脉冲(飞秒激光器)、超短波长(远紫外、载射线激光器),是提升我国国防威慑力、开展原创性科学研究具有巨大作用的战略高科技。

目前激光技术已广泛应用于工农业生产、国防军工、生物医疗、环境保护、科学研究以及人们的日常生活之中。从激光微细加工到激光核聚变,从激光视听装置、光通信到捕捉跟踪测量飞行目标,从激光育种到激光美容,从办公设备的激光打印机到超市里付款的条形码激光扫描器,激光应用使人类社会面貌焕然一新,激光在信息光电子与能量光电子领域的广阔应用,使人类进入了光电子学的新时代。

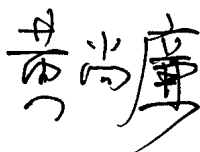
有鉴于此,激光原理及其各种应用技术也已成为各行各业的工程技术人员必须掌握的一门高新技术。我国的重点高等院校从 20 世纪 70 年代起就开设了激光理论与应用的课程,编写的涉及激光原理、技术和应用的有关教材不下数十种,但主要针对电子类本科专业。

本书编者来自于国内多所普通高校,充分考虑到测控技术与仪器本科等非电子类专业的实际需求,在多年为各自所在高

校本科生讲授该门课程的基础上,重新编写了《激光原理及应用》。

该书从光与物质相互作用的原理出发,引出速率方程理论和激光器的工作特性,进而介绍光学谐振腔理论和高斯光束,便于读者更好地了解激光的基本原理。书中有关激光应用的章节都由长期从事该领域教学与研究的专家编写,是一本很有特色的教材。相信本书的出版,对于诸如测控技术与仪器等本科专业的教学以及从事激光技术的推广应用的工程技术人员,了解激光的原理与应用技术,都会起到有益的促进作用。

中国工程院院士



重庆大学教授

圆年 源月 员日于重庆市

目 录

绪论	1
一、激光的发展简史	1
二、激光的特点	2
三、本课程的学习方法	3
第一章 光和物质的近共振相互作用	4
第一节 电磁波的吸收和发射	4
第二节 电磁场吸收和发射的唯一理论	5
第三节 光谱线加宽	5
第四节 激光器中常见的谱线加宽	6
第五节 光和物质相互作用的近代理论简介	6
思考和练习题	6
第二章 速率方程理论	7
第一节 典型激光器的工作能级	7
第二节 三能级系统单模速率方程组	8
第三节 四能级系统单模速率方程组	8
第四节 小信号光的介质增益	9
第五节 均匀加宽介质的增益饱和	9
第六节 非均匀加宽介质的增益饱和	9
第七节 超辐射激光器	9
思考和练习题	9
第三章 连续激光器的工作特性	10
第一节 均匀加宽介质激光器速率方程	10
第二节 激光振荡阈值	10
第三节 均匀加宽介质激光器中的模竞争	10
第四节 非均匀加宽介质激光器的多纵模振荡	10
第五节 激光器输出特性	10
思考和练习题	10

第 源章 摇光学谐振腔理论	员源
摇源援 摇光学谐振腔的研究方法	员源
摇源圆 摇光学谐振腔的基本知识	员缘
摇源猿 摇光学谐振腔的矩阵光学理论	员员
摇源源 摇光学谐振腔的衍射积分理论	员苑
摇源缘 摇平行平面腔的自再现模	员起
摇源远 摇对称共焦腔的自再现模	员源
摇思考和练习题	员缘
第 缘章 摇高斯光束	员苑
摇缘援 摇高斯光束的基本特点	员苑
摇缘圆 摇高斯光束的传输	员起
摇缘猿 摇高斯光束的特性改善	员起
摇思考和练习题	员苑
第 远章 摇典型激光器	员怨
摇远援 摇概述	员怨
摇远圆 摇气体激光器	员圆
摇远猿 摇固体激光器	员缘
摇远源 摇染料激光器	员源
摇远缘 摇半导体激光器	员愿
摇远远 摇其他激光器	员缘
摇思考和练习题	圆起
第 苑章 摇激光的应用	圆猿
摇苑援 摇激光在基础科学研究中的应用	圆猿
摇苑圆 摇激光在通信及信息处理中的应用	圆源
摇苑猿 摇激光在军事技术中的应用	圆怨
摇苑源 摇激光在生物及医学中的应用	圆缘
摇苑缘 摇激光在材料加工中的应用	圆苑
摇苑远 摇激光在测量技术(计量学)中的应用	圆员
摇苑苑 摇激光在能源、环境中的应用	圆愿
摇苑愿 摇激光在土木、建筑中的应用	圆员
摇思考和练习题	圆猿
附 录	圆缘
摇粤 常用物理常数表	圆缘
摇月 常见激光器的典型技术参数	圆苑
摇悦 常用电光晶体的典型技术参数	圆愿
摇阅 常用光学非线性晶体的典型技术参数	圆怨

常用激光晶体的典型技术参数	猿猿
常见光功率计型号和厂家	猿猿
典型激光波长使用的光学零件及其材料性能参数	猿猿猿
常见光路和光学元件的传播矩阵	猿猿猿
参考文献	猿猿

绪 论

一、激光的发展简史

20世纪初,著名物理学家爱因斯坦(Albert Einstein)提出了受激辐射的概念,20世纪30年代初首先在微波波段实现了受激辐射的微波信号放大(即微波激射器)。但要推广到光波波段存在着三大困难:首先,在共振腔内保持单一的电磁波波型,腔体尺寸应与波长同一量级,在微波波段容易实现,而在光波波段波长太短不易实现;其次,通过调节磁场强度,利用塞曼效应可实现频率调谐,而在光波波段调谐范围很小;最后,因为自发辐射跃迁几率正比于辐射频率的立方,在光波波段自发辐射产生噪声远高于微波波段。1958年,肖洛(Charles Townes)和汤斯(Arturo Schawlow)发表的论文中提出了在光波波段实现受激辐射的条件,向人们展示了获得激光的可能性。他们设想了用两块平行安置的高反射率镜组成新式的共振腔,只让沿轴线方向传播的光形成共振模式,非轴向模式的光很快就逸出腔外而消失,从而控制了共振腔内模式的数目,并且大大降低了自发辐射噪声。他们同时又提出在共振腔内放入发光材料,用普通强光源泵浦,使原子激发到高能态,在原子从高能态自发辐射到低能态过程中,诱导其他处于高能态的原子产生受激辐射,并在共振腔内来回反射过程中,使与诱导光相同的光子以指数形式增加,实现激光振荡。并且指出,要达到振荡状态,高能态的粒子数必须比低能态粒子数多(即粒子数反转)才有可能。此后,各国科学家相继提出了各种实验方案。1959年美国休斯敦实验室的梅曼(Charles Townes)利用掺钕的红宝石晶体,用氙灯泵浦,于1960年1月制成了世界上第一台激光器。1960年贾范(James Van Turnhout)发明了第一台气体激光器,1960年出现了半导体激光器,1960年帕特尔(Peter P. Schue)发明了第一台可调谐激光器,1960年贝尔实验室发明了第一台再调谐激光器。1960年出现了商用千瓦级激光器。

我国科学家在激光器领域的早期工作并不落后。在梅曼(Charles Townes)之后一年,1960年夏天,中国科学院长春光机所的一批年轻科学家,利用球形聚光器和直管氙灯,用自己制造的掺钕红宝石在我国第一次实现了激光输出,诞生了中国第一台激光器,1960年中国科学院长春光机所的科研人员又研制成功我国第一台钕玻璃激光器。1960年钕玻璃激光器输出能量达

到了10¹⁶瓦焦耳。

由于激光具有许多迷人的特点,问世后经过四十多年的发展,已经由最初的红宝石激光器发展到固体、液体、气体、半导体等多种激光介质。在运转方式上有连续、高重复频率、高功率、高能激光器,激光波长从紫外到红外,并且实现了从可见到近红外的连续调谐,激光输出功率从微瓦到10¹⁶瓦,激光输出能量从纳焦耳到百万焦耳。

二、激光的特点

根据爱因斯坦受激辐射理论,受激辐射光与诱导光的频率、相位、传播方向、偏振状态都完全相同,通过光放大后得到的是大量处于相同状态的光子束。因此,激光器具有与普通光源极不相同的性质,通常概括为激光的源个特性:单色性好、方向性好、相干性好、亮度高。

1. 单色性与时间相干性

光源的单色性描述的是光源的光谱线宽,可用绝对线宽 $\Delta\nu$ (或 $\Delta\lambda$),或者相对线宽 $\Delta\nu/\nu$ (ν 是谱线的中心频率)定量表示。普通光源的线宽是很宽的,如单色性最好的氦灯,其线宽也只有10⁻¹⁰~10⁻⁹而理论上氦氖激光器的线宽极限可以达到10⁻¹⁵的量级。光源的时间相干性描述的是在同一空间点处,不同时刻光波的相干性,从时间域上它反映了光源所发出的有限长波列的持续时间 τ_c (称为相干时间),而从频率域上则反映了光源的光谱线的线宽 $\Delta\nu$ 。根据傅立叶变换的不确定关系,波列的持续时间 τ_c 与光谱线的线宽 $\Delta\nu$ 的乘积为常数,因此线宽 $\Delta\nu$ 越小,即单色性越好,则相干时间 τ_c 越长,时间相干性越好。可见,光源的单色性与光源的时间相干性紧密相关。普通光源的相干长度(定义为光速乘以相干时间)不过几十厘米,而氦氖激光器相干长度可达10⁵公里。

2. 方向性与空间相干性

光源的方向性由光束的发散角描述。普通光源的发光分布在各个方向,发散角很大,如电灯泡发光是在10²立体角,只能照明很短的距离。为了扩大照明距离,通常借助光学系统(如手电筒、汽车灯、探照灯等),但也只能照明几米到百米的距离。激光具有极好的方向性,发散角极小,可以接近衍射极限。例如通过光学系统发射到月球的激光,其光束直径只有几十米,为普通光源所望尘莫及。光源的空间相干性(指的是横向空间相干性,纵向空间相干性等同于时间相干性)描述的是在垂直于光束传输方向的平面内,不同空间点处光波的相干性,它与光源的方向性紧密相连。一般来说,光束的方向性越好,其空间相干性也越好。普通光源发出的光波,分布在众多的空间模式中,只有在一定的空间范围内光子才是相干的,光源的横向截面越大,空间相干性越差。用普通光源做双缝干涉实验,通常要用一小孔光阑置于光源之前形成点光源才能保证空间相干性。激光束的空间相干性由激光器的横模结构决定。对于激光器输出的激光束,如果有几个横模模式共存,则只有属于同一横模模式的光子才是空间相干的,横模模式数越少,空间相干性越好,光束的发散角也越小。对于单横模激光器,其空间相干性是最好的,光束的发散角也最小。

提高亮度

光源的亮度反映了光源发出的光能量在空间和时间上的集中程度,定义为单位光源表面积、单位立体角内发出的光功率(单位光谱宽度内的亮度则称为光源的单色亮度)。普通光源的发光通常是连续的,分布在很大的空间立体角范围内,因此其亮度是不高的。连续、准连续或脉冲运转的激光器可以输出很高的激光能量。20世纪50年代,我国的钕玻璃激光器,曾经输出10⁶焦耳的脉冲能量,美国用于核聚变的激光器输出脉冲能量达到10⁷焦耳,利用Q开关技术和锁模技术,激光脉冲持续时间可以压缩到飞(10⁻¹⁵)秒,使激光器的输出功率大大提高,目前已经达到10¹⁰瓦,而利用选模技术可以将激光线宽压缩到10⁻⁵厘米。激光器极高的功率、很小的发散角和极窄的线宽,使其单色亮度比太阳还要高10¹⁰万倍。

三、本课程的学习方法

抓住基础和重点

与其他课程一样,本课程学习要抓住基础和重点。辐射理论、谐振腔理论、描述激光过程的动力学理论,这些都是本课程的重点。人们在认识事物过程中,感觉到的东西往往不一定理解,只有理解了的东西才能更好地感觉到。所以只有掌握了激光基础知识,才能更好地理解激光产生的物理过程,为今后实际应用打好基础。

理解物理概念

在学习中,不要把精力过度集中在具体数学推导上,而要集中精力搞清物理概念。为了方便数学处理,理论上设定的许多模型都作了简化,不能完全反映激光器的实际。数学处理只是为了让人们更好地理解物理过程,而理论计算结果和实验结果往往有差别。例如,谐振腔几何光学理论把腔内视为完全均匀的介质,而实际激光器中工作物质不可能完全均匀;且由于工作物质吸收泵浦光转化为热,在热传导作用下工作物质内部产生了温度梯度,工作物质发生了热畸变,即使原来均匀性很好的激光介质也会变成不均匀介质。谐振腔几何光学理论不能完全描述实际激光器,但它能为我们提供许多指导性结果,如横模模斑尺寸、纵模间隔等,以指导我们如何实现空间选模和选频。

理论联系实际

理论要联系实际,要到实验室了解实际激光器的结构和运转过程,这些感性认识可加深对激光理论知识的理解。如条件允许,可以开设配套的实验教学项目,对这些实验项目一定要充分重视,认真完成。通过对实验结果的分析,对比相应的理论计算,加深对基本概念的理解,同时也掌握基本的实验和计算技能。

第 1 章

光和物质的近共振相互作用

光与物质的相互作用,是介质形成增益能力的物质基础,也是理解激光工作物质的放大特性、分析激光器振荡原理的物理基础,对这一问题的讨论成为激光原理的中心,也是进一步学习激光物理的理论基础。

为叙述方便,激光原理中“光”泛指电磁辐射,物质的分子和原子统称为“原子”。光场频率等于原子某一固有辐射频率的情形,称为共振相互作用,否则为非共振相互作用。在激光器中,无论是光强由原子受激辐射过程放大,还是原子对泵浦光的吸收,光场频率均近似等于原子某一固有辐射频率,因此,近共振相互作用是激光原理关注的中心。

处理光与物质近共振相互作用的常见激光理论有全量子理论、速率方程理论和经典电偶极振子模型以及爱因斯坦关于跃迁的唯象解释,不同层次的理论以不同的近似程度揭示激光器不同层次的特性和规律。经典电子谐振子模型可用来理解激光增益介质中的许多现象,例如,电磁波在物质中的吸收、色散和谱线加宽,复折射率、色散关系和线型函数的导出。量子理论也可以表述这些激光器特性和规律,只是较复杂。电偶极振子模型求解以及谱线加宽的机制和对光与物质相互作用的影响是本章的重点。

1.1 电磁波的吸收和发射

量子论建立之前,人们还没有认识到光的粒子性和物质原子中能级的存在,只从经典电动力学出发,认为光是服从麦克斯韦电磁运动规律的电磁波,物质为服从经典力学运动规律的电偶极振子,建立起解释物质对光波吸收和发射现象的经典电偶极振子模型理论。虽然,从现代量子理论的观点看来,经典理论十分粗糙,但它能以比较直观和简单的理论方法解释光与物质相互作用的一些实验现象,同时,经典理论所采用的基本概念和术语,对于进一步理解更深入的理论亦颇有帮助。

1.1.1 电介质极化

电介质就是通常所说的绝缘体材料。实际上并没有完全电绝缘的材料,绝缘体材料是为简化问题将实际绝缘体材料的理想化,抽象成一种理想模型,即内部没有自由移动电荷的理想源

电介质模型。这里只针对各向同性电介质进行讨论。处于电场中的理想电介质要受电场的影响,发生电极化现象,处于电极化状态的电介质会反过来影响电介质中的电场。

一、电介质对电场的影响

电介质对电场的影响可以通过如图 4-1 所示实验演示。图 4-1 中,两个平行放置的金属板,分别带有等量异号电荷 $+Q$ 和 $-Q$,金属板间是空气,可以近似地当成真空处理。两金属板分别连到静电计的两个电极上,静电计指计的偏转大小指示出两带电金属板之间的电压 U 。

保持两板距离和板上电荷不变,如图 4-2 所示,在板间充满绝缘液体,如变压器油等电介质,静电计上指计偏转减小到读数 U' 。

(4-1)

式中 ϵ_r 为板间电介质的相对介电常量(或相对电容率),这是一个大于 1 的电介质特性常数,大小随电介质的种类和状态(如温度)的不同而不同。

板间电压的减小,说明板间电场减弱。平行平板间的电场强度与电压成正比,电介质中电场强度减弱到原来的 $1/\epsilon_r$ 。几种常见电介质的静电场相对介电常量如表 4-1 所示。只能是因为板间电介质对电场的反作用,而且反作用的大小由电介质本身性质决定。这是为什么呢?这涉及电介质的微观极化机制。

有一点需要特别注意的是,表 4-1 中所列相对介电常量是对静电场而言。如果电极板间施加的是交变电压,相对介电常量会因电压变化频率的不同而不同。这一点在后面电偶极振子模型导出结果的讨论中会有所表现。

表 4-1 常见电介质的相对介电常量

电介质	相对介电常量
真空	1
氦(1.00054)	1.00054
空气(1.00059)	1.00059
石蜡	2.1
变压器油(2.2)	2.2
聚乙烯	2.3
尼龙	3.5
石维	3.8
纸	3.5~4.0
瓷	4~10
玻璃	4~10

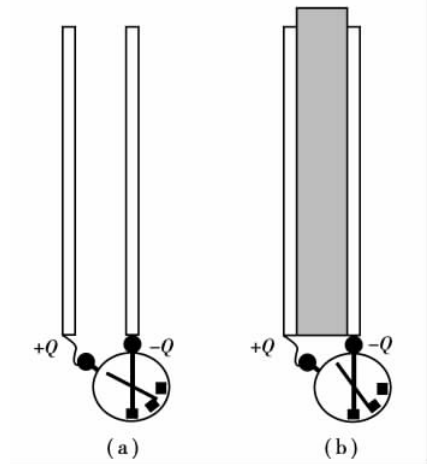


图 4-1 电介质对电场影响实验

二、电介质的极化

电介质中每个分子、原子都是一个复杂的带电系统,有正电荷,有负电荷,它们分布在一个亚纳米尺度的体积内,而不是集中在一点。由于分子、原子自身很小,在考虑其正负电荷在离分子远处产生的电场时,或是考虑一个分子、原子受外电场的作用时,都可以认为其中的正电荷集中于一点,负电荷集中于另一点。正电荷的集中点叫正电荷的“重心”,负电荷的集中点叫负电荷的“重心”。

分子、原子中正电荷和负电荷电量相等,可以看成是一个由正、负点电荷重心相隔一定距

离所组成的电偶极子。

以 q 表示一个分子中的正电荷或负电荷的电量的数值,以 \vec{d} 表示从负电荷重心指到正电荷重心的距离矢量,则这个电偶极子的电矩为:

$$P = qd \quad (1.1.1)$$

电介质可以认为是由大量的这种微小电偶极子所组成的。

按照电介质的分子内部的电结构的不同,可以把电介质分子分为两大类:极性分子和非极性分子。

表 1.1.1 极性分子的固有电矩

电介质	电矩 P (德拜)
氯化氢	1.11
氨	1.47
水	1.85
乙醇	1.69

有一类分子,如氯化氢、氨、水等,在无外电场的情况下,它们内部的电荷分布就是不对称的,因而其正、负电荷重心不重合。所以,这种分子具有固有电矩,统称为极性分子。几种典型极性分子的固有电矩列于表 1.1.1 中。如果把这种分子置于外电场中,如图 1.1.2(a) 所示,分子的固有电矩将受到外电场的力矩作用而沿着外电场方向取向。由于分子的

无规则热运动总是存在的,这种取向不可能完全整齐。外电场越强,固有电矩排列越整齐。

另一类分子,如二氧化碳、氮气、氧气等,在正常情况下,它们内部的电荷分布具有对称性,因而正、负电荷重心重合,这样的分子就没有固有电矩,这种分子叫非极性分子。如果把这种分子置于外电场中,则由于外电场的作用,如图 1.1.2(b) 所示,两种电荷的重心会分开一段微小距离,因而使分子具有了感生电矩,方向与外加电场的方向趋同。外电场越强,感生电矩越大。在实际可以得到的电场中,感生电矩比极性分子的固有电矩小至少几个数量级。

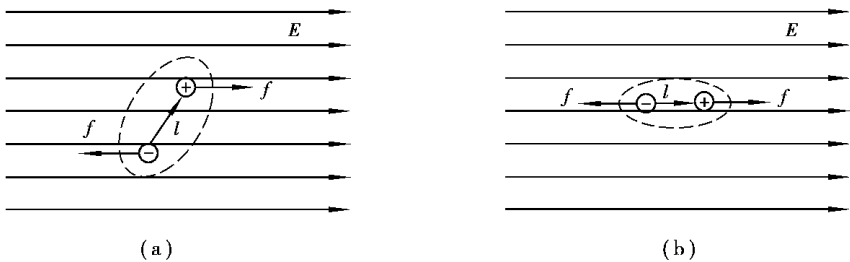


图 1.1.2 在外电场中的电介质分子

虽然两种电介质受外电场的影响所发生的变化微观机制不同,但宏观总效果是一样的,在电介质内部的宏观微小的区域内,正负电荷的电量相等,因而仍表现为中性。但是,在电介质的表面上却出现了只有正电荷或只有负电荷的电荷层,如图 1.1.3 所示。这种出现在电介质表面的电荷叫面束缚电荷(或面极化电荷),因为它不像导体中的自由电荷那样能用传导的方法引走。在外电场的作用下,电介质表面出现束缚电荷的现象,叫做电介质的极化。显然,外电场越强,电介质表面出现的束缚电荷越多。

束缚电荷反过来又会影响电场的分布,束缚电荷也产生电场。在电介质内部,束缚电荷产生的电场其方向与外电场的相反,起减弱电介质内部总电场的作用,进而减弱电场对电介质的极化作用。因此,放到静电场中的均匀电介质,在极化到一定程度后达到一个平衡状态。

达到平衡状态后,电介质中的电极化强弱,可用单位体积电介质内分子电矩的矢量和——电介质电极化强度 P (德拜)来表示。

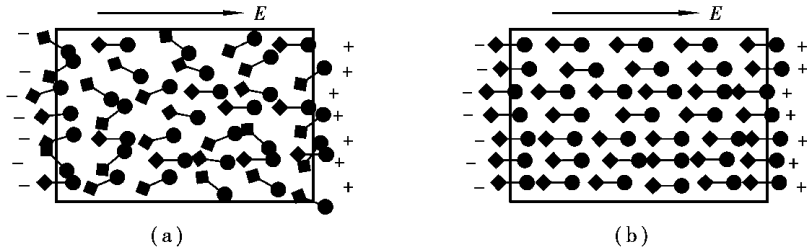


图 11-1 在外电场中的电介质分子

$$P = \sum_i p_i = \sum_i q_i r_i \quad (11-1)$$

由于分子固有电矩随电场增强逐渐地排列整齐,感生电矩随电场增强而增大,所以,不论哪种电介质,它的电极化强度都随外电场的增强而增大。实验证明:当电介质中的电场不太强时,如在一般强度的激光束光电场中,各种各向同性电介质的电极化强度与 E 成正比,方向相同。

$$P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E = \epsilon_0\chi E \quad (11-2)$$

ϵ_0 为真空中的相对介电常量 χ 为电介质的线性电极化率。对于常见电介质,束缚电荷由电场分布决定,电场 E 又等于外电场和束缚电荷产生的电场矢量和,这样,求电场 E 的问题就成了死循环。这种复杂关系可以通过引入电位移矢量来打破。

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (11-3)$$

这里 E 对应自由电荷所产生的电场。可见,电介质内部的电场强度在平衡后与电位移矢量成正比,方向相同,比例系数由电介质特性常数决定。这一正比关系,正是麦克斯韦电磁方程组的一个物质方程。

对于强电场情形,例如强激光的聚焦点上,上述线性极化关系需要作修正。

$$P = \epsilon_0\chi E + \epsilon_0\beta E^2 + \epsilon_0\gamma E^3 \dots \quad (11-4)$$

β, γ 分别为二、三阶电极化率,都是非线性电极化率。线性电极化率 χ 值一般比非线性电极化率值大好几个数量级,只是由于高强度激光的出现,光电场强度得到极大的提高,原来被忽略不计的非线性项才得以急速增强,极化非线性才表现出来。当然,即便现在,一般需要对激光刻意聚焦,才能观察到非线性光学现象。在我们的讨论范围内,激光强度不大,非线性现象不显著,因此讨论只限于线性电极化情形。

11.1.1 电偶极子模型

在阐述经典理论的基本概念和方法之前,首先需要建立光场与物质相互作用的经典物理模型。考虑到在光学和激光领域中所遇到的大多数情况,光频电磁场的电场对物质的作用都远大于磁场的作用,在讨论中将只考虑电场对物质的作用,忽略磁场的影响。

一、经典假设

依据经典理论对物质极化的微观认识,可以将组成物质的微粒在电场中的行为简化为电偶极子模型:正电荷重心为原子核,负电荷重心为最外层一个电子的电荷重心;由于原子核质量大,运动忽略不计,负电荷重心受与其位移成正比的弹性恢复力的作用在原子核附近做一维简谐振动。也可以将其抽象成单电子受与其位移成正比的弹性恢复力作用,在平衡位置附近做一维简谐振动,即所谓经典电偶极子模型。

电偶极振子的受迫谐振动与介质本身性质、光场的频率、场强大小和方向以及介质极化情况密切相关。考虑到激光器中的主要作用,为简化问题,可以假定光电场为振动方向与电偶极振子振动方向相同的单色平面线偏振光,并且将讨论限于共振线性极化情形,光场的频率近似等于电偶极振子的固有振动频率、场强不太强时与各向同性电介质中电偶极振子的线性相互作用情形。

一维经典电偶极振子在外光场 $E \cos(\omega t)$ 作用下作受迫振动,电子运动方程为

$$m \ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x = -e E \cos(\omega t) \quad (1.1.1)$$

式中 k 为弹性恢复系数, $-e$ 和 m 分别为电子的电量和质量值, ω_0 为电偶极振子简谐振动的固有频率, γ 为经典辐射阻尼系数,亦称经典辐射能量衰减速率

$$\gamma = \frac{2}{3} \frac{e^2 \omega_0^4}{4\pi \epsilon_0 c^3 m} \quad (1.1.2)$$

这里 ϵ_0 和 c 分别为介质中的介电常数和光速。

二、谐振子自发辐射

当无外场存在,即 $E \cos(\omega t) = 0$ 时,电偶极振子的运动方程为

$$m \ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1.1.3)$$

解为

$$x = A e^{-\frac{\gamma}{2m} t} \cos(\omega' t + \phi) \quad (1.1.4)$$

$$\omega' = \omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma}{2m\omega_0}\right)^2} \quad (1.1.5)$$

x_0 为电子振动初始值,电子在其平衡位置附近做阻尼简谐振动。

对于可见光频电场,电偶极振子的固有频率 $\omega_0 \approx 2\pi \times 10^{15} \text{ rad/s}$,而 $\gamma \approx 10^8 \text{ rad/s}$,因此 $\gamma \ll \omega_0$,有 $\omega' \approx \omega_0$,阻尼振动的解近似为

$$x = A e^{-\frac{\gamma}{2m} t} \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (1.1.6)$$

所以,原子核与做阻尼振动的电子形成的偶极振子的偶极矩为

$$p = -ex = -eA e^{-\frac{\gamma}{2m} t} \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (1.1.7)$$

$$p_0 = -eA \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (1.1.8)$$

做阻尼振动的电子具有加速度,所以该电偶极振子将发射电偶极辐射。相应的辐射电场强度应有如下形式

$$E = \frac{2}{3} \frac{e \ddot{p}_0}{4\pi \epsilon_0 r} \cos(\omega_0 t - kr) \quad (1.1.9)$$

由此可见,在无外场作用时,被激励起振的电偶极振子会自发地向外辐射交变电场,形成原子向外界自发辐射的电磁波。原子自发辐射的电磁波频率近似等于其电偶极振子固有振动频率 ω_0 ,振幅随时间依指数衰减,衰减速率决定于经典辐射阻尼系数 γ ,这也是将 γ 称为辐射能量衰减速率的原因。

自发辐射电磁波实际上是辐射能量,该能量当然来源于外界,来源于外界对电偶极振子的激励。如果外界对电偶极振子没有激励作用,电偶极振子振幅为零,不会自发辐射电磁波;当外界对电偶极振子进行激励后,例如光波入射,光波电场将激励电偶极振子起振,使其振幅为