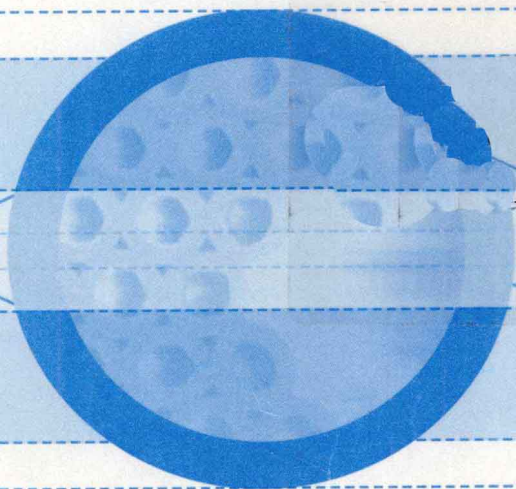




干福熹 等 著

PHOTONIC GLASSES
AND THEIR
APPLICATIONS

光子学玻璃及应用



上海科学技术出版社

国家科学技术学术著作出版基金和上海科技专著出版资金资助出版

光子学玻璃及应用

Photonic Glasses and Their Applications

干福熹 等著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

光子学玻璃及应用/干福熹等著. —上海:上海
科学技术出版社, 2011. 12

ISBN 978—7—5478—0613—5

I. ①光... II. ①干... III. ①光学玻璃—研究 IV.
①TQ171.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 224897 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 25.5 插页 6

字数 570 千字

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978—7—5478—0613—5/TB·2

定价: 180.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

20 世纪 60 年代激光的产生和应用,使得以光的传输和成像为主要研究内容的传统光学,逐步转向并发展为以研究光的产生、探测和控制为主的光子学,涉及光子的频率变换、极化态和偏振态的变化、光子的受激发射和非线性光学效应等诸多领域。光子学玻璃为光子学材料中最重要的一类。光子作为信息和能量的载体拓宽了玻璃在光、电子领域更广泛的应用。

本书系统地介绍了各类激光玻璃及应用(包括高功率激光体玻璃和玻璃光纤、激光放大器玻璃、有机-无机复合激光玻璃和玻璃光波导等),玻璃的各类非线性性质(包括非线性光谱性质、二阶及三阶非线性光学性质、飞秒激光实现玻璃中微结构调控等),玻璃薄膜和玻璃纤维在数据存储和通信、光学超分辨和光子晶体中的应用。

本书有十余位作者参加了各章节的撰写,书中有关资料主要选自各位作者的长期研究成果。为了反映当代光子学玻璃的发展,也引用了国外已发表的一些文献和资料。

本书可供从事光学、光电子学和光子学技术与材料研究、开发、生产的专业人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

序 言

20 世纪 60 年代初激光的诞生,对当代科学技术的发展起到了重大的推动作用。传统的光学局限于光的自发辐射和非相干性传播的研究,激光的产生使光学研究转向以光的受激发射和相干性为主,从弱的光频电磁辐射而转向强场的光频电磁辐射,从以往的弱光作用下的线性光学效应而转向强光作用下的非线性光学效应,这就是传统的光学向光子学转变的基本原因。光子学主要涉及光子的产生、探测和控制,光子的频率变换和偏振态变化以及受激发射和非线性光学效应的研究。在应用领域,光子作为信息和能量的载体而促成了包括玻璃态和晶态材料在内的光子学材料的诞生。其实到目前为止,光子学材料的概念还是模糊的,一种观点认为具有光子学特征的材料才称为光子学材料(Photonic Materials),另一种观点认为光子学所用的材料(Materials for Photonics)皆称为光子学材料。我个人取向前一种理解,因此写了一章“从光学玻璃到光子学玻璃”作为代绪论,试图来区别这两类玻璃,是否确当,还望读者进一步指正。

英文版《光子学玻璃》一书由世界科学出版社出版发行(Photonic Glasses. Fuxi Gan, Lei Xu. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006)已有 4 年多时间,发行不久即告罄,在国际学术界有一点影响。其实上海科学技术出版社在 2006 年前就约我写此书的中文版,但当时我手中正在编写另一本书《中国古代玻璃技术的发展》,上海科学技术出版社,2004 年出版)而耽误了,实在抱歉。为了满足国内读者的需求,上海科学技术出版社希望再出中文版,于是我重新组织了写作队伍,从头开始。光子学作为当代前沿的科学,在近五年中有很多新的发展,因此各章内容都有了新的较大的补充和修改。特别考虑到材料、元器件和应用的相互关系,加强了对光子学玻璃应用的介绍,因此书名定为《光子学玻璃及应用》。

本书的主要内容是中国科学院上海光学精密机械研究所、复旦大学和浙江大学诸位同仁和我的学生们多年研究的成果,已在国内外期刊上发表了上百篇文章,现在综合及汇集于本书的各章节中。因此,本书的内容是以我们从事研究的几个重要方面为主,不可能包括光子学玻璃的所有方面,也可能遗漏了一些重要部分,希望读者,特别是从事光子学研究的专家提出建议和指正,使我们今后能更好地改进。

此书付梓问世之际,我特别要提及中国自然科学基金会、中国科学院以及中国教育部长期以来对有关研究项目的支持。光阴荏苒而年已古稀,所以特请复旦大学徐雷教授和中科院上海光机所陈伟研究员协助我编写此书。上海科学技术出版社精心组织了本书的编辑和出版工作。在此一并向他们表示衷心的感谢。

干福熹

2011 年 2 月 28 日

目 录

第一章 从光学玻璃到光子学玻璃

第一节 物理学基础	2
一、光散射	2
二、光色散	3
三、光学非线性	4
第二节 光学玻璃	4
一、透明光学玻璃	5
二、颜色玻璃	7
三、低损耗的光学玻璃光纤和平面波导	8
四、低表面粗糙度的大尺寸光学基体玻璃	9
五、光学线性功能玻璃	10
六、无定形光学功能薄膜	12
第三节 光子学玻璃	12
一、激光玻璃	12
二、非线性功能玻璃	20
三、新型光子学玻璃	22
参考文献	24

第二章 非晶态光存储薄膜

第一节 非晶态磁光薄膜及其在磁光存储技术中的应用	27
一、磁光存储原理	28
二、非晶态稀土-过渡族金属合金薄膜的磁学和磁光特性	29
三、非晶态 RE-TM 薄膜的微结构和磁学特性微观机制研究	32
第二节 非晶态相变薄膜及其在光盘存储技术中的应用	36
一、相变光存储的原理	36
二、相变材料的晶化速度	37
三、相变中的亚稳相	38

四、激光诱导相变微区的结构和形貌	40
五、激光诱导相变热动力学	41
六、一次记录相变光存储	42
第三节 非晶态薄膜在超高密度和超快光存储中的应用	43
一、超快激光诱导相变存储	43
二、光磁混合存储	48
三、光电混合相变存储	50
四、多态相变光存储	51
五、分子相变光存储	51
六、近场纳米光存储	53
参考文献	56

第三章 功能薄膜的光学超分辨效应与应用

第一节 功能薄膜的光学超分辨原理	64
一、功能薄膜的非线性特性导致的光学超分辨效应	64
二、硫系薄膜的晶态到熔化态相变导致光学超分辨效应	65
三、Sb 薄膜折射率随温度变化导致的光学超分辨效应	66
第二节 功能薄膜光学超分辨效应的应用	70
一、高密度光盘存储器中的应用	70
二、光磁混合存储的应用	72
三、光学超分辨热刻蚀技术	73
参考文献	75

第四章 激光玻璃的光谱性质及其应用

第一节 高掺钕(Nd^{3+})磷酸盐玻璃的激光光谱	77
一、 Nd^{3+} 离子的吸收和发射性能	78
二、无辐射跃迁	79
三、格位效应	79
第二节 高掺镱(Yb^{3+})玻璃的激光光谱	80
一、 Yb^{3+} 离子吸收和发射光谱	81
二、 Yb^{3+} 高掺磷酸盐玻璃低温下的吸收谱	82
三、 Yb^{3+} 玻璃的光谱参数	83
四、激光选择激发的荧光窄化光谱	83
五、 Yb^{3+} 浓度对发光的影响	84
六、激光性能参数	85
第三节 高掺铒(Er^{3+})玻璃的激光光谱	86
一、 Er^{3+} 离子的吸收和发射光谱	87
二、 Yb^{3+} 敏化对 Er^{3+} 发光的影响	87

三、铒玻璃的光谱参数	89
四、掺铒磷酸盐激光玻璃的应用	90
第四节 高功率激光钕玻璃	92
一、高功率激光钕玻璃的增益、储能、提取效率和非线性	92
二、高功率激光钕玻璃的品质因子	95
三、磷酸盐激光钕玻璃在国内外大型 ICF 装置中的应用	95
四、高功率激光钕玻璃的制造工艺	95
参考文献	97

第五章 玻璃中稀土离子的非线性发光

第一节 上转换发光机理	101
一、激发态吸收	102
二、受激离子间的交叉弛豫能量转移	103
三、合作发光	105
四、雪崩发光	106
第二节 上转换发光中稀土离子间的能量转移	109
一、 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 共掺玻璃的能量转移	109
二、 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺玻璃的能量转移	111
三、 $\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ 共掺玻璃的能量转移	112
第三节 下转换发光	113
一、下转换发光机理	113
二、玻璃中稀土离子的下转换荧光	115
第四节 稀土掺杂玻璃光纤的超荧光	123
一、稀土掺杂石英玻璃光纤的超荧光	124
二、 Nd^{3+} 离子掺杂氟化物玻璃光纤中超荧光的演变	125
参考文献	127

第六章 玻璃的三阶非线性光学性能

第一节 玻璃的三阶非线性测量技术	131
一、三次谐波产生 (THG)	133
二、简并四波混频 (DFWM)	134
三、Z 扫描	135
四、光克尔效应	137
五、三阶非线性极化率的物理机制探讨	137
第二节 玻璃的三阶光学非线性	140
一、透明氧化物玻璃的三阶光学非线性	140
二、硫系玻璃及薄膜的三阶光学非线性	142

第三节 有机-无机复合玻璃的三阶光学非线性	145
一、有机材料的三阶光学非线性	145
二、制备方法	147
三、有机-无机杂化玻璃的三阶光学非线性	147
第四节 纳米结构玻璃的三阶光学非线性	149
一、半导体微晶掺杂纳米复合玻璃的三阶光学非线性	149
二、 C_{60} 掺杂纳米复合玻璃的三阶光学非线性	153
三、金属粒子掺杂纳米复合玻璃的三阶光学非线性	153
第五节 光限幅效应	154
一、 C_{60} 改性硅酸盐材料的光限幅效应	154
二、金属酞菁的光限幅效应	155
三、掺杂微粒溶胶-凝胶材料的光限幅效应	156
参考文献	157

第七章 玻璃的二阶非线性光学性能

第一节 玻璃二阶光学非线性的产生与测量	161
一、玻璃二阶光学非线性的产生	161
二、玻璃二阶光学非线性的测量	164
三、二阶光学非线性系数分布函数的获得	165
四、玻璃二阶光学非线性产生机理	167
第二节 二氧化硅玻璃的二阶光学非线性产生	168
一、极化条件对二阶光学非线性的影响	168
二、不同极化方式对二阶光学非线性的影响	169
三、Ge 掺杂的二氧化硅玻璃	171
四、软玻璃	171
第三节 高折射率玻璃的二阶光学非线性产生	171
一、硼酸铅玻璃	171
二、碲酸盐玻璃	179
三、硫系玻璃	179
第四节 应用	181
一、二阶光学非线性的稳定性	181
二、准相位匹配光学二次谐波产生	181
三、电光器件	182
参考文献	182

第八章 光纤放大器玻璃

第一节 掺铒磷酸盐光纤放大器玻璃	187
一、高浓度的掺铒和铒镱共掺磷酸盐玻璃中的共协上转换和能量传递	188

二、稀土元素掺杂磷酸盐玻璃的结构·····	194
第二节 掺铒磷酸盐玻璃光纤放大器·····	195
一、光纤放大器基础·····	195
二、高浓度掺铒磷酸盐玻璃光纤的光纤放大器的性能·····	197
参考文献·····	203

第九章 用于高功率光纤激光器的有源石英玻璃光纤

第一节 石英玻璃光纤的基本概念及分类·····	207
一、光在光纤中的传输特性·····	207
二、双包层石英玻璃光纤的结构和特性·····	209
三、光纤激光器的发展历史和现状·····	213
四、光纤激光器的分类·····	217
第二节 掺镱双包层石英玻璃光纤的制备和特性·····	220
一、双包层光纤的拉制·····	220
二、光纤中的导波模·····	222
三、光纤的损耗特性·····	225
四、光纤的偏振特性和保偏光纤·····	227
第三节 连续波高功率光纤激光器·····	229
一、连续波高功率光纤激光器的基本结构·····	229
二、光纤激光器线形腔结构物理模型及速率方程·····	230
三、光纤激光器的模式控制技术·····	233
第四节 基于掺镱石英玻璃光纤的高功率光纤放大器·····	239
一、脉冲光纤放大器简介·····	239
二、脉冲光纤放大器的关键技术研究·····	240
三、低平均功率双包层光纤放大器·····	244
四、高平均功率脉冲双包层光纤放大器·····	245
五、脉冲双包层光纤放大中的瞬态增益与频率响应·····	246
第五节 超大模场光纤(LMA)研究的新进展·····	249
一、螺旋芯光纤·····	249
二、分块包层光纤·····	250
三、纤芯掺杂设计光纤·····	250
四、增益导引光纤·····	250
第六节 高功率光纤激光器的进展及应用·····	251
一、激光打标·····	251
二、金属雕刻·····	252
三、激光焊接·····	252
四、激光切割·····	253
参考文献·····	254

第十章 有机-无机复合固态染料激光玻璃

第一节 有机染料与液态染料激光器	256
一、有机激光染料的结构特点及光谱范围	256
二、新型激光染料的合成与选择	257
三、典型的液态可调谐染料激光器	258
第二节 复合固态染料激光玻璃及其制备技术	258
一、染料激光介质的固态化优势	258
二、基于聚合物的固态染料激光介质	258
三、基于无机凝胶玻璃和多孔玻璃的固态染料激光介质	259
四、基于有机改性凝胶玻璃的固态染料激光介质	260
五、基于化学杂化掺杂技术的固态染料激光介质	262
第三节 复合固态染料激光玻璃的光稳定性和光衰减机理	262
一、复合固态染料激光介质的光衰减及起因	262
二、聚合物基质中吡咯甲叉类染料的光衰减机理	263
三、复合固态激光玻璃中激光染料的光稳定性及光衰减机理	265
第四节 基于激光染料间的能量传递的复合固态染料激光玻璃	267
一、复合共掺染料凝胶玻璃的光谱学性能及传能机理	268
二、染料共掺凝胶玻璃的激光效率与调谐范围	271
三、复合共掺染料凝胶玻璃的激光寿命	272
第五节 固态染料激光器及其设计参数优化	273
一、泵浦条件对固态染料激光介质性能的影响	273
二、固态染料激光介质的冷却、循环装置	273
三、谐振腔设计和固态染料激光的光斑质量	273
四、固态染料激光器的窄线宽、可调谐输出	274
第六节 基于溶胶-凝胶法制备的有机-无机复合薄膜波导分布反馈(DFB)激光器	276
一、基于溶胶-凝胶薄膜的多波长 DFB 激光器	276
二、基于 Zr-ORMOSIL 薄膜沟道波导的 DFB 激光器	276
三、双光子泵浦的含 Zr 波导 DFB 激光器	277
四、近红外波段的固态染料激光介质与 DFB 激光器	277
五、基于能量传递的 Zr-ORMOSIL 波导 DFB 激光器	277
六、波导 DFB 激光器中永久光栅结构的制备	277
参考文献	280

第十一章 玻璃光波导

第一节 光波导的结构与原理	288
第二节 玻璃光波导的制备方法及光学特性	289
一、化学气相沉积	289

二、溅射·····	290
三、火焰水解沉积·····	290
四、离子交换·····	290
五、溶胶-凝胶·····	292
六、非氧化物玻璃波导的制备技术·····	293
第三节 有机/无机杂化光波导材料 ·····	295
第四节 玻璃光波导器件 ·····	297
一、二氧化硅玻璃光波导及阵列波导光栅·····	297
二、有机/无机复合玻璃光波导开关·····	299
三、8 通道可变光衰减器·····	300
四、连续可调固体染料激光器·····	302
五、离子交换波导激光器和光放大器·····	303
参考文献 ·····	309

第十二章 光子晶体的玻璃光纤

第一节 光子晶体光纤的基础 ·····	314
一、光子晶体和光子带隙·····	314
二、光子晶体光纤及其分类·····	317
三、光子晶体光纤的导光机理·····	319
第二节 光子晶体玻璃光纤的制备工艺 ·····	324
一、光子晶体玻璃光纤的制作方法·····	324
二、光子晶体玻璃光纤的后处理和复合光纤·····	330
第三节 光子晶体玻璃光纤的性质和应用 ·····	333
一、带隙波导型光子晶体玻璃光纤的性质和应用·····	334
二、有效折射率型光子晶体玻璃光纤的性质和应用·····	343
三、非石英玻璃 PCF·····	348
四、光子晶体玻璃光纤在传感器方面的应用·····	351
参考文献 ·····	356

第十三章 利用飞秒激光实现玻璃内部三维微结构调控和功能化

第一节 飞秒激光的特点 ·····	363
一、自聚焦·····	364
二、自相位调制·····	364
三、脉冲展宽·····	364
第二节 飞秒激光诱导玻璃各种功能微结构 ·····	365
一、微空洞结构·····	365
二、利用诱导色心的着色和发光实现彩色图像标记·····	365
三、诱导产生折射率的增加·····	366

四、活性离子的空间选择性价态操作·····	368
五、金属纳米粒子的空间选择性析出控制·····	370
六、玻璃中光功能晶体的空间选择性可控析出·····	371
七、玻璃中诱导离子迁移现象·····	372
八、玻璃中三维打孔·····	373
九、单光束飞秒诱导的偏振依赖的纳米光栅结构·····	374
十、单光束飞秒激光诱导的周期性纳米孔洞点串结构·····	377
参考文献·····	378
附录 光子学玻璃中英文名词对照及页码索引 ·····	382

光子学玻璃及应用彩图

第一章

从光学玻璃到光子学玻璃

本章摘要

光子学玻璃研究的是玻璃态材料中光子的产生、探测和控制,涉及光子受激发射、光子频率变换、光子极化态改变等诸多领域。本章回顾了从传统光学玻璃到如今光子学玻璃发展历程中各种主要玻璃态材料,以及它们的物理机制。面对当前对光子学器件的需求,必须更多地关注玻璃中新的光学现象,关注新的光子学玻璃器件的高性能,关注光子学玻璃制作中的纳米技术和工艺。

光学研究主要针对的是两大类问题:光频电磁波在物质中的传输问题和光频电磁辐射与物质的相互作用问题,前者涉及几何光学,而后者属于分子光学的范畴。用做光传输的最传统的媒介就是光学玻璃,是由德国的 Abbe 和 Schott 于 19 世纪 80 年代研究开发出来的。光学玻璃的制作和加工,在很长一段时间内是一项神秘而需要加以保密的工作。经过一个多世纪以来的研究和发展^[1-5],已经形成了以现代科学为基础的玻璃材料学和玻璃工艺学体系。完全可以有目的、有针对性地设计光学玻璃的物理、化学性质,同时实现规模化工业制造。就材料形态上而言,光学玻璃也已经从早先的三维块体材料,发展出二维薄膜和一/二维光纤材料,在现代光学工程和光子学工程领域中起着重要作用。

1970 年,在第九届高速摄影国际会议上,Poldervaart 教授第一次给出了光子学的含义:“光子学是一门以光子作为信息载体的系统科学”。这一含义当时并没有包括光子本身能量特性方面的内容。几年后,Poldervaart 教授^[6]又将光子学含义扩展到“光子不仅是信息载体,也是能量载体”,即以光子作为能量载体方面的研究同样是光子学研究的一个主要方面,基本上较为全面地给出了光子学的含义。关于光子学的定义,特别是光子学的内涵和所覆盖的研究领域,迄今尚不能被认为是最终的概念,作为一门新兴科学,光子学正处于发展和充实的成长阶段。

从光学玻璃到光子学玻璃的发展历程上看,光子学研究的是光子的产生、探测和控制,并涉及光子受激发射、光子的频率变换、极化态和偏振态的变化等诸多领域。20 世纪中叶激光的产生,极大地推动了光子学的发展,特别是在信息科学和工程中。光子的传输速度比电子的传输速度要快很多,约为三个数量级。因此以光子作为信息的载体,在响应时间上将表现得更短,而且单通道传输所包含的信息量要更多。21 世纪属于一个多媒体信息时代,信息容量是以 Tb

(10^{12} bits)为单位,或者说信息的存储密度将以 Tb/cm^2 为单位。与此对应,在传输、存储、显示和计算中的信息流也将以 Tb/s 为单位,今后在太赫兹(皮秒时间响应)量级甚至以上的超高频信息处理(调制、转换、交换、编码和解码)技术将是完全可以预期的。

目前的市场,传统光学应用早已经在光学仪器、眼科及医疗产业等领域扮演了主力角色,同时在太空和核工业等领域所涉及的光学工程中,也起到了极为重要的作用。而光子学玻璃的普及直到最近才逐渐显现出来,特别是在诸如光通信、光数据存储和处理、平面显示器等方面,光子学玻璃在光电产业中的重要性正在日渐上升。

作为器件的基础,探索和研究包括光子学玻璃在内的新型光子学材料,将是发展先进光子学器件的关键所在,也是新技术实现工业化、规模化的先导。光子学玻璃将与光学玻璃一起担任重要的功能作用,如激光的产生、频率的变换、光调制和光开关等。

目前较为重要的光子学材料包括^[7]:①激光材料:包括激光晶体、激光玻璃、半导体激光材料、光纤材料等;②光子探测材料:以半导体材料为主,包括多量子阱、线阵、面阵等结构;③光子频率、极化态和模式的变换材料:包括非线性光学材料、半导体饱和吸收阱、超晶格材料等;④光子存储材料:包括光折变材料、光色材料、电子俘获材料等。光子学及与光子学相关和交叉的光学和光电子学,它们的发展仍然需要探索新型光子学材料,其中玻璃态或者无定形材料的探索应该是一个重要的发展方向。

第一节 物理学基础

玻璃的光学性质主要与分子光学有关,涉及基于电磁辐射理论^[8]的光吸收、光反射和光散射等现象。

在经典的电磁辐射理论中,感应电偶极矩 P 与电场强度 E 的关系,可以表示为

$$P = P^{(1)} + P^{(2)} + P^{(3)} \quad (1-1)$$

上式中的 $P^{(1)}$ 、 $P^{(2)}$ 、 $P^{(3)}$ 分别表示为

$$P^{(1)} = \epsilon_0 \chi^{(1)} E, P^{(2)} = \epsilon_0 \chi^{(2)} E \cdot E, P^{(3)} = \epsilon_0 \chi^{(3)} E \cdot E \cdot E$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数, E 为电场矢量, $\chi^{(1)}$ 为线性极化率, $\chi^{(2)}$ 和 $\chi^{(3)}$ 分别为二阶和三阶非线性极化系数。

在式(1-1)中,如果是在弱电磁场情况下,仅需要考虑到 $P^{(1)}$ 项,因此表现出来的光学性质是线性的。对于弱电磁场条件下,光学玻璃主要具有两个线性光学效应:光的色散和散射。

对应式(1-1)中的二阶、三阶,它们在一般情况下的规律是:高阶的一般低于前一阶的 7~8 个数量级。因此,在通常能够得到的电场强度下,除非高阶系数特别高,均可以作为线性情况处理。当激光出现以后,尤其是在高功率激光作用下,即使高阶系数并不是很高,但所表现出来的光学性质已经具有较为明显的非线性性质。特别是在光子学玻璃的情况下,它们的作用主要是应用于强电磁场情况下,这时非线性效应将被显著感应出来。光子学玻璃的 $P^{(2)}$ 和 $P^{(3)}$ 项是必须加以考虑的,不能被轻易忽略,它们的光学性质和光学效应大部分都具有明显的非线性。

一、光散射

光学玻璃的自发光散射与玻璃中各种分子振动有关,极化张量 $P^{(1)}$ 的泰勒级数展开:

$$P^{(1)} = \alpha_0 \cos \omega_0 t + (\partial \alpha_k / \partial Q_k) Q_{k_0} \cos \omega_0 t \cos(\omega t + \delta_k) \quad (1-2)$$

式中, Q_k 为振动频率 ω_k 的简正坐标, δ_k 为相位因子。

式(1-2)中的第一项描述的是瑞利散射,第二项描述的是拉曼散射,这两项我们已经在光学玻璃中详细研究过^[8]。在高强度相干光(激光)辐照的时候,玻璃材料将伴随发生相干光散射,产生受激散射;在式(1-1)中 $P^{(3)}$ 项作用下,将产生受激拉曼散射和受激布里渊散射。与自发光散射不同的是,发生受激散射的入射光子是被处于激发态的受激声子所散射,而不是被热振动声子散射。此类受激散射光也是相干的,由于它们的相干性,必须关注光子学玻璃所发生的此类受激散射,特别是在高强度光入射的条件下。

二、光色散

光学玻璃的光色散可以采用经典电动力学,也可以采用量子力学来描述。在经典电动力学中,材料的吸收、反射和折射可以采用以下光学色散方程表示:

$$n^2(1 - \chi^2) = 1 + \frac{4\pi Ne^2}{m} \sum_k \frac{f_k(\omega_k^2 - \omega^2)}{(\omega_k^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_k^2} \quad (1-3)$$

式中, χ 为材料的吸收系数。如果可以忽略光吸收,即在 $\chi \ll 1$ 的条件下得到:

$$n^2 - 1 = \frac{4\pi Ne^2}{m} \sum_k \frac{f_k(\omega_k^2 - \omega^2)}{(\omega_k^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \Gamma_k^2} \quad (1-4)$$

如果光对材料的作用不处于共振区域,则在 $(\omega_k - \omega) \gg \Gamma_k$ 条件下得到:

$$n^2 - 1 = \frac{4\pi Ne^2}{m} \sum_k \frac{f_k}{\omega_k^2 - \omega^2} \quad (1-5)$$

式中, Γ_k 为第 k 种电子的阻尼系数, f_k 为振子强度, ω_k 为本征频率。

图 1-1 表示的是在共振和非共振区域的色散曲线,该曲线可以划分为非共振区域的正常色散和共振区域的反常色散。在反常色散区,很难测定块体光学材料的折射率,但是对于薄膜,则可以采用光学椭圆偏振法来测定。在正常色散区域,特定波长处玻璃的折射率只由振子强度和其本征频率确定。

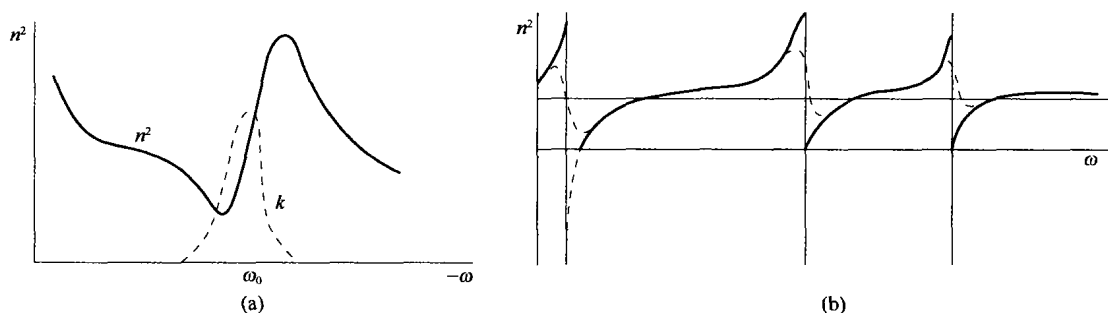


图 1-1 在共振和非共振区域的色散曲线

(a) 在一个吸收带附近的色散曲线; (b) 位于三个吸收带内的色散曲线

三、光学非线性

在强电磁场中色散曲线将发生斯托克斯(Stokes)偏移。随着电场强度的增加,这个偏移向长波方向移动。如图 1-2 所示,折射率的偏移量 δ_n 可表示为

$$\delta_n = n_2 |E|^2 \quad (1-6)$$

式中, n_2 为非线性折射率,其表达式为

$$n_2 = (2\pi/n_0) \chi^{(3)} = (2\pi N/n_0) \theta \quad (1-7)$$

式中, $\chi^{(3)}$ 为三阶四秩张量, θ 为非线性极化率,也就是电场诱导的极化率改变量 $(d\gamma/dE)$, 其中的 γ 即为一阶二秩极化率张量。

三阶光学非线性是由三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 的实部和 $\chi^{(3)}$ 的虚部共同构成的, 它们分别与材料的非线性折射和非线性吸收有关, 其中非线性吸收主要来源于饱和吸收和多光子吸收:

$$\chi^{(3)} = [(Re \chi^{(3)})^2 + (Im \chi^{(3)})^2]^{1/2} \quad (1-8)$$

经常用到的光学非线性折射率 n_2 与三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 的关系是

$$n_2 = 16 \chi^{(3)} / (\pi^2 c \epsilon) \quad (1-9)$$

式中, c 为光速, ϵ 为介电常数。

三阶光学非线性 $\chi^{(3)}$ 或非线性折射率 n_2 , 是在所有玻璃态材料中都存在的。在非共振区, 三阶光学非线性是由于电子壳层(电子云)的畸变和原子核心的偏移所导致的。其中电子云在光强作用下的畸变也被称作电子的极化, 在产生非线性的过程中起主要作用。基于上面提到的玻璃本征吸收发生 Stokes 偏移的假设, 通过三个波长处得到的玻璃的折射率和本征吸收波长, 我们推导出能够计算各种玻璃非线性折射率的方法^[8]。关于玻璃的三阶非线性折射率系数的详细讨论将放在本书的第六章。

因为玻璃是一种各向同性的物质, 没有二阶光学非线性效应, 所以二阶三秩极化率张量 β 应该等于零。但是最近的研究表明, 在强电磁场条件下玻璃中如果形成电荷分离态, 也将可以观测到二阶光学非线性效应, 如光的二次谐波等。根据光伏模型:

$$\chi^{(2)} = \chi^{(3)} E_{dc} \quad (1-10)$$

式中, $\chi^{(2)}$ 和 $\chi^{(3)}$ 分别为二阶和三阶极化率, E_{dc} 为导致电荷分离的电场强度。本书的第七章将进一步讨论玻璃的二阶非线性效应。

第二节 光 学 玻 璃

现代光学玻璃由如下几个分支组成, 它们仍然在现代光学、光电子学和光子学中发挥着重要作用。