

材料科学与工程著作系列
HEP Series in Materials Science and Engineering

HEP
MSE

光电功能 材料与器件

Opto-Electrical Functional
Materials and Devices

周忠祥 田浩 孟庆鑫 编著
宫德维 李均

高等教育出版社

光电功能 材料与器件

Opto-Electrical Functional
Materials and Devices

周忠祥 田浩 孟庆鑫 编著
宫德维 李均

高等教育出版社·北京

图书在版编目(C I P)数据

光电功能材料与器件 / 周忠祥等编著.-- 北京 :
高等教育出版社, 2017.6
(材料科学与工程著作系列)
ISBN 978-7-04-047315-5

I. ①光… II. ①周… III. ①光电材料-功能材料-
研究 ②光电器件-研究 IV. ①TN204 ②TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 022770 号

GUANGDIAN GONGNENG CAILIAO YU QIJIAN

策划编辑	刘剑波	责任编辑	卢艳茹	封面设计	姜磊	版式设计	杜微言
插图绘制	杜晓丹	责任校对	陈旭颖	责任印制	尤静		

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	25	版 次	2017 年 6 月第 1 版
字 数	460 千字	印 次	2017 年 6 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	75.00 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 47315-00

前 言

随着科技的发展与进步,信息产业已经走进了千家万户,并成为我们生活中重要的一部分。目前,信息产业的竞争焦点已逐渐转向了光电信息技术领域。光电信息技术以其极快的响应速度、极宽的频宽、极大的信息容量、极高的信息效率和分辨率等诸多特点,不断地推动着现代信息技术的发展,使得光电信息产业在市场中所占的份额逐年增加。在技术发达国家,与光电信息技术相关的产业的产值已占国民生产总值的一半以上。因此,作为光电信息产业的基石——光电功能材料与器件的研究必将成为目前重要的科研热点之一。

光电信息科学与工程专业是教育部根据国家战略性新兴产业的需求,于2012年设置的新专业,该专业是由电子信息科学类的光信息科学与技术、光电子技术科学与原属于电气信息类的信息显示与光电技术、光电信息工程、光电子材料与器件5个专业统一修订而成的。本书作为光电信息科学与工程专业的核心课程的教材或参考书籍,主要介绍有关的光电功能材料,例如在光电功能材料方面,介绍了发光材料与电光材料、压电及热电材料、光信息材料、红外材料与隐身材料等;在光电功能材料的性质方面,集中介绍了材料的介电性质、压电性质、电光性质及材料的一些非线性效应和非线性光学性质,例如电光效应、弹光效应、声光效应、非线性光学极化、相位匹配、光混频和参量振荡等;介绍了各类光电功能材料的制备方法、性能检测及各种力、热、光、电相关高性能电光器件、声光器件、光通信器件及探测器件等。

本书的章节设计、内容规划及编写工作均由周忠祥负责,同时参加编写的人员还有宫德维(第一、二、八章)、孟庆鑫(第三、四、八章)、李均(第四、六章)、田浩(第五、七章)。全书由周忠祥、孟庆鑫负责统稿。

本书在介绍光电功能材料的基本理论、材料种类、器件设计和性能表征的基础上,将已学过的基础理论课如光学、电磁学、固体物理、量子力学等的基本理论与实际材料、器件相结合,加深对已学知识的理解和掌握,为走向实际工作岗位奠定基础,对于大学生、研究生和从事光电行业的专业技术人员都有参考价值。在全面介绍基础知识的同时,还介绍了诸如弛豫铁电晶体PMN-PT、负折射率材料等新型材料的性质及制备方法,使得这本书更具有时代感。

本书是作者在多年从事该课程教学的基础上编撰而成的。在教学过程中,曾3次复印讲义供学生上课参考,得到了老师和学生们的中肯建议,在此一并

前言

感谢。由于近年来光电功能材料的快速发展，加上时间仓促，疏漏与不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

周忠祥
2017 年 2 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 功能材料简介	1
1.2 光电功能材料的研究现状	2
1.3 光电功能材料的展望	6
参考文献	6
第二章 光电功能晶体的基本知识	9
2.1 晶体的宏观性能描述	9
2.1.1 晶体的对称特性	9
2.1.2 晶体的分类	11
2.2 介电晶体电学性质的张量表示	14
2.2.1 标量、矢量和张量	14
2.2.2 利用一阶张量描述热释电效应	17
2.2.3 利用二阶张量描述晶体的电极化	18
2.2.4 利用三阶张量描述晶体的压电效应	21
2.2.5 利用四阶张量描述晶体的电致伸缩效应	28
2.3 晶体的铁电性能	32
2.3.1 铁电晶体的定义	32
2.3.2 铁电晶体的宏观特性	33
2.3.3 铁电晶体的宏观特性初步定性说明	34
参考文献	34
第三章 光电功能晶体的光学性质和非线性光学效应	35
3.1 晶体的线性光学性质	35
3.1.1 光在晶体中的传播	36
3.1.2 光在晶体中传播的几何法描述——光学曲面	45
3.1.3 晶体的偏振光干涉	54
3.2 晶体的非线性光学效应	57
3.2.1 非线性光学极化	57
3.2.2 非线性极化模型	58
3.3 晶体的非线性光学现象	62

3.3.1	倍频和混频	63
3.3.2	光学克尔效应	68
3.4	外场作用下的非线性光学现象	71
3.4.1	电光效应	72
3.4.2	弹光效应和声光效应	81
3.4.3	热光效应	86
3.4.4	旋光效应	88
3.4.5	磁光效应	89
	参考文献	91
第四章	光电功能晶体的性能检测	93
4.1	电学性能的测量	93
4.1.1	介电常数的测量	93
4.1.2	热释电性能的特征	95
4.1.3	压电性能的特征	97
4.1.4	铁电性能的测量	102
4.1.5	电致伸缩系数的测量	103
4.2	光学性能的测量	106
4.2.1	晶体光学性质的表征	106
4.2.2	晶体折射率的测量	107
4.2.3	晶体的光学吸收与透过	111
4.2.4	晶体的光折变性能	113
4.2.5	晶体非线性光学系数的测量	114
4.2.6	晶体电光性能的特征	116
4.3	光谱性能的测量	125
4.3.1	荧光光谱	125
4.3.2	紫外-可见吸收光谱	128
4.3.3	傅里叶变换光谱	132
	参考文献	136
第五章	光电功能晶体	137
5.1	铌酸锂晶体	137
5.1.1	铌酸锂晶体的结构特点	138
5.1.2	铌酸锂晶体的电学性质	140
5.1.3	铌酸锂晶体的线性和非线性光学性质	142
5.1.4	铌酸锂晶体的电光效应	145
5.1.5	铌酸锂晶体的光折变效应	147

5.2	钽铌酸钾锂晶体	149
5.2.1	钽铌酸钾锂晶体的生长与结构	150
5.2.2	钽铌酸钾锂晶体的光学性质	155
5.2.3	顺电相钽铌酸钾锂晶体的二次电光效应	159
5.2.4	顺电相钽铌酸钾锂晶体的电控光折变效应	160
5.2.5	钽铌酸钾锂晶体的压电性能	164
5.3	弛豫铁电单晶 PMN-PT	168
5.3.1	PMN-PT 单晶的特征	169
5.3.2	PMN-PT 单晶的相结构	171
5.3.3	PMN-PT 单晶的弛豫性与畴结构	174
5.3.4	PMN-PT 单晶的线性光学性质	178
5.3.5	PMN-PT 单晶的光折变性质	180
5.3.6	PMN-PT 单晶的应用	183
5.4	激光晶体	184
5.4.1	非线性激光晶体简介	184
5.4.2	增益介质: 钇铝石榴石系列晶体	185
5.4.3	频率转换晶体: 氟代硼铍酸钾和磷锆锌	186
5.5	发光晶体	192
5.5.1	光致发光晶体	193
5.5.2	电致发光晶体	195
5.5.3	半导体发光晶体	197
5.6	半导体化合物晶体——光伏材料	202
	参考文献	203
第六章	其他光电功能材料	207
6.1	液晶材料	207
6.1.1	液晶的基本性质	208
6.1.2	液晶的光学特性	211
6.1.3	液晶的主要应用	212
6.2	有机光电功能材料	217
6.2.1	有机发光材料	217
6.2.2	有机光电导材料	221
6.2.3	光折变聚合物材料	222
6.3	透明陶瓷材料	223
6.3.1	透明陶瓷的简介及发展	224
6.3.2	陶瓷的光学透明机理	225

6.3.3	透明陶瓷的种类及应用	228
6.4	碳纳米材料	231
6.4.1	碳纳米材料的特性	232
6.4.2	碳纳米材料的应用及器件	238
6.5	负折射率材料	239
6.5.1	负折射率材料的概念及进展	239
6.5.2	负折射率材料的物理性质	241
6.5.3	负折射率材料的应用	245
6.6	光电薄膜材料	247
6.6.1	光学介质膜系及其应用	247
6.6.2	特殊功能膜系及其应用	250
6.7	多铁性材料	253
6.7.1	多铁性	254
6.7.2	单相多铁性材料	260
6.7.3	复合多铁性材料	266
	参考文献	269
第七章	光电功能材料的制备	271
7.1	光电功能晶体的生长理论和方法	271
7.1.1	晶体成核理论	271
7.1.2	晶体生长理论	273
7.1.3	溶液中的晶体生长	275
7.1.4	熔体中晶体生长的方法	281
7.2	光电信息透明陶瓷的制备	287
7.2.1	透明原理	287
7.2.2	影响陶瓷透光性的因素	288
7.2.3	制作透明陶瓷的关键技术	289
7.2.4	典型透明陶瓷的制备	295
7.3	薄膜生长	297
7.3.1	吸附、表面扩散与凝结	298
7.3.2	薄膜的形核与生长	299
7.3.3	薄膜的物理气相沉积	303
7.3.4	化学气相沉积	307
7.4	单晶光纤的生长技术	311
7.5	有机光电信息材料的制备	313
7.5.1	功能高分子材料的功能化方法	313

7.5.2 功能高分子材料的制备	315
7.6 负折射率材料的设计	326
参考文献	333
第八章 光电功能器件的原理与设计	335
8.1 光学体全息存储器	335
8.1.1 海量光学体全息存储器	339
8.1.2 体全息光学相关器	342
8.2 声光器件	346
8.2.1 声光调制器	347
8.2.2 声光偏转器	349
8.2.3 声光器件的应用	349
8.3 电光器件	350
8.3.1 电光开关器件	350
8.3.2 电光调制器	355
8.3.3 电光偏转器	357
8.3.4 电光图像处理器	361
8.3.5 电光分束器	365
8.4 发光器件	370
8.5 晶体光纤器件	374
8.6 其他光电功能器件	377
8.6.1 电致伸缩换能器	377
8.6.2 压电器件	379
8.6.3 磁光器件	386
参考文献	388

第一章

绪论

随着科技的发展与进步，信息产业已经走进了千家万户，并成为我们生活中重要的一部分。为了在科技竞争中立于不败之地，各国都投入了巨大的人力、物力、财力发展信息产业，而信息产业的竞争焦点也已经从传统的微电子信息产业转向光电子信息产业。作为光电子信息产业的基石——光电功能材料的研究亦成为目前重要的科研方向之一。

本章将从功能材料出发，介绍光电功能材料的研究现状及展望，以便读者在系统地学习本书内容之前，对光电功能材料有全面的了解，为后面的学习打下基础。

1.1 功能材料简介^[1,2]

作为人类社会发展的基础产业，材料工业在经济中占有举足轻重的地位。材料的分类有很多种，从应用角度通常可分为结构材料和功能材料两类。结构材料主要以其力学性质为应用基础，功能材料则是以其物理、化学或生物功能性质为应用基础^[1]。功能材料作为材料学科的分支，是物理学、化学和材料工艺学三者共同发展的结晶，在声探测、超声成像、高应变驱动器等电声转化器件上得到了广泛的应用^[2]。那么什么是功能材料呢？具体地说，功能材料就

是指在外场作用下,材料的性能发生变化或产生一种新的性能,但该材料的组成和内部单元结构及聚合状态不发生变化的一类材料。功能材料具有优良的光学、热学、电学、磁学、力学、声学、化学、生物医学功能,广泛应用于各类高科技领域。当前,国际功能材料及其应用技术正面临新的突破,诸如光子材料、超导材料、信息材料、微电子材料、生态环境材料、能源转换及储能材料、生物医用材料以及材料的分子、原子设计等正处于飞速发展之中,推进功能材料技术的发展正在成为一些发达国家强化其经济及军事优势的重要手段。

自1965年美国Bell实验室的J. A. Morton博士提出功能材料概念以来,功能材料的品种已经达到十多万种,而且依然以每年5%的增长率不断增加。各种新型功能材料的设计及研究已经成为新技术和新兴工业发展的核心之一。近年来,激光和光电子学的发展进一步促进了功能材料的应用和发展,用于光电及其转换功能的光电功能材料已经成为材料科学与工程研究领域的一个热点。本书将详细介绍光电功能材料。

1.2 光电功能材料的研究现状

光电功能材料是指用于制作各种光电器件的材料,对光电信息具有发射、接收、传输、转换、监测、存储、调制、处理和显示等作用。光电功能材料既有电子材料的稳定性,又有光子材料的先进性,不仅是现代信息社会的支柱,也是信息技术革命的先导。光电功能材料的研究是当代科学的前沿,具有多学科交叉的特点,是材料科学中极富创新和挑战的前沿领域之一。

由于光电功能材料的种类繁多,涉及面广,因此存在多种分类方式。本章将按照电光晶体、液晶、有机材料、透明陶瓷、碳纳米材料、薄膜材料、负折射率材料、多铁性材料等对光电功能材料的研究现状进行介绍。

1. 电光晶体^[3-14]

晶体是光电功能材料的重要组成部分,在当前高新技术中有着不可替代的作用。进入21世纪以来,激光和光电子领域的发展进一步促进了电光晶体的发展和应用。作为高科技发展的核心材料,光电功能晶体具有不可替代的重要地位,发达国家纷纷投入大量人力、物力进行研究。目前研究比较多的电光晶体主要有以下几类^[3,4]:

(1) KDP型晶体:主要包括磷酸二氢钾(KH_2PO_4 , KDP)、磷酸二氘钾(KD_2PO_4 , DKDP)、磷酸二氢铵(NH_4PO_4 , ADP)、磷酸钛氧钾(KTiOPO_4 , KTP)、磷酸钛氧铷(RbTiOPO_4 , RTP)等^[5,6],这一类晶体都是线性电光晶体。其中,KDP、DKDP、ADP晶体的线性电光系数较大,而且比较容易得到大尺

寸、高光学质量的晶体,因此,其在电光材料中的应用较为广泛,但是这几种晶体都是采用水溶液法生长,比较容易潮解,严重限制了其应用的条件。KTP 和 RTP 晶体不仅非线性光学系数大,电光系数大,而且通光波段宽,已经成为目前商用激光倍频晶体和电光 Q 开关的主要选择。

(2) ABO_3 型晶体:这一类型主要是氧八面体结构的铁电晶体,包括铌酸锂($LiNbO_3$)^[7]、铌酸钾($KNbO_3$)^[8]、钛酸钡($BaTiO_3$)^[9]等,还有从这几种材料发展出来的具有较大的二次电光系数的铌铌酸钾($KTa_{1-x}Nb_xO_3$, KTN)^[10]、铌铌酸钾锂($K_{1-y}Li_yTa_{1-x}Nb_xO_3$, KLTN)^[11]、铌铌酸钾钠($K_{1-y}Na_yTa_{1-x}Nb_xO_3$, KNTN)^[12]和具有较大线性电光系数的铌酸锶钡($Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb_2O_6$, SBN)^[13]、钾钠铌酸锶钡[(K, Na, Sr, Ba)NbO₃, KNSBN]^[14]等晶体。其中,由于 $LiNbO_3$ 晶体的电光系数高、易于生长、制作器件工艺简单、稳定性高,因此其应用最为广泛。而 $BaTiO_3$ 晶体虽然线性电光系数非常大,但是在室温下难以极化实现单畴化,极大影响了其应用。SBN 和 KNSBN 晶体都是在 $BaTiO_3$ 晶体的基础上发展起来的,其不仅具有非常大的线性电光系数,而且改善了 $BaTiO_3$ 难于极化的缺点。KTN、KLTN、KNTN 晶体都可以通过改变晶体内的 Ta/Nb 的比例,使其在室温下为顺电相,大大提高了其透光性。而且这 3 种晶体在居里(Curie)温度附近都具有非常大的二次电光系数,相比于线性电光晶体具有更低的半波电压,这些使得其具有更广泛的应用前景。

(3) AB 型晶体:主要包括立方或六方结构的半导体晶体,例如砷化镓(GaAs)、磷化镓(GaP)、硫化锌(ZnS)、硫化镉(CdS)等,虽然这一类晶体的通光波段宽,尤其在红外波段的透过性能优异,这对通信应用来说十分重要,但是其电光系数较小,影响了其更为广泛的应用。

2. 液晶^[5]

液晶,即液态晶体(liquid crystal, LC),是介于液态与结晶态之间的一种物质状态,是分子排列或指向具有某种规律的流体。液晶既有与普通液体类似的流动性,又在力学、光学和电学性质方面呈现出类似于晶体的各向异性,同时还具有不同于液体和晶体的特殊的光电特性。这些特殊的光电特性使得液晶不仅成为显示技术中的主流功能材料,而且在对宇宙的起源和早期演化的模拟、光束操控、可调谐光子带隙、负折射率材料以及光通信器件等方面都有重要应用。

从德国物理学家 Otto Lehmann(1877 年)利用偏光显微镜首次观察到材料的液晶化现象,到日本 Sharp 公司(1973 年)制造了世界上第一台液晶电子显示屏,再到现在随处可见的各种液晶显示器,液晶显示技术不断地带给人们更逼真、更细致和更宽广的视野。

随着液晶显示技术的成熟与发展,曾经困扰液晶显示技术的响应时间问题利用蓝相液晶得到了提高。

蓝相是液晶的一个相态^[15],一般出现在向列相和各向同性相之间,由双扭曲螺旋排列的分子组成的柱子构成。液晶的蓝相一般具有窄的温度范围(1~2℃)、自组装三维分子排列、无电场作用下宏观上呈光学各向同性等主要特性。蓝相液晶的这些快速响应的特性使得其在快速响应透镜、空间光调制器件等光学和显示器件领域有着广阔的应用前景。但是窄的相区间温度范围使得其发展受到了一定的限制,为了突破这个限制,人们提出了聚合物网格稳定等方法。随着蓝相温度范围的扩大,蓝相液晶正在显示、光学和光电子等领域吸引着研究人员的注意。

因为液晶分子能够在很弱的电场或磁场的驱动下改变取向,从而导致折射率、旋光性等光学性质的改变,所以液晶材料在很多低能耗、高敏感光学器件中有较多的应用。液晶器件通常采用类似三明治的夹心结构,即由两个平行的平板电极(至少有一面为透明介质)和夹在电极之间的液晶薄层构成。为了控制液晶分子的取向,通常在电极与液晶接触的表面上镀一层聚合物或其他双亲分子取向膜,液晶与取向膜的界面称为液晶的表面。液晶分子与表面的各向异性相互作用,液晶表面分子沿特定方向取向,并使液晶整体形成某种特定的排列,这个过程叫作液晶的表面锚定。当前,大部分液晶光电器件的工作原理是利用表面锚定预先使液晶分子形成某种排列,在工作时输入的光场或电场通过与液晶分子作用来改变液晶分子的取向,从而改变液晶的光学性质来实现光电开关、显示等功能。

3. 有机材料

有机光电功能材料是一类具有光电性能的有机材料,由于有机光电功能材料通常是含有 π 共轭体系和氮、硫等杂原子的芳香性有机分子,这样有机光电功能材料在可见光区域有很好的吸收特性,并有较大的 Stokes 位移,因此可以通过分子结构设计实现所需的光电性能。有机光电功能材料具有结构组成多样化和性能调节空间大等优点,在有机发光二极管、有机晶体管、有机存储器以及有机太阳能电池等领域应用广泛。

与无机光电功能材料相比,有机光电功能材料可以通过溶液法等方法实现大面积制备和柔性器件制备。此外,有机光电功能材料由于是有机物,能够自下而上通过自组装的方式来制备纳米器件和分子器件。近年来,基于有机高分子光电功能材料的研究一直受到材料界的高度关注,已经成为 21 世纪化学、材料领域的重要研究方向之一,并且取得了一系列重大进展。

4. 透明陶瓷^[16-19]

通常情况下,陶瓷材料是不透明的,其原因是陶瓷材料内部含有的微气孔

等缺陷对光线产生了折射和散射作用,使得光线几乎无法透过陶瓷体。1959年,通用电气公司首次提出了一些陶瓷可以透明的假设,不久后,R. L. Coble就制备出了氧化铝透明陶瓷^[17]。一般情况下,透明陶瓷材料不仅具有良好的透光性,而且在力学、热学、光学、电学等诸多性能方面优于不透明陶瓷,因此在诸多领域具有特殊的用途。

经过几十年的发展,目前已经研制出了几十种透明陶瓷:从过去的氧化铝透明陶瓷,氧化镁透明陶瓷,氧化钇透明陶瓷等发展到铝镁尖晶石透明陶瓷,氮化铝透明陶瓷,氮氧化铝透明陶瓷,透明 $\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})_{1-x/4}\text{O}_3$ (PLZT) 电光陶瓷,钇铝石榴石(yttrium aluminium garnet, YAG)激光透明陶瓷以及(Y, Gd) $_2\text{O}_3$ (YGO)、 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 、 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ 透明闪烁陶瓷等材料。目前,许多研究单位和公司都在进行新型透明陶瓷的研发。根据用途和功能可将透明陶瓷分为透明结构陶瓷和透明功能陶瓷。

最近,光电功能透明陶瓷尤其是透明激光陶瓷和闪烁陶瓷得到了广泛的研究与关注,并取得了可喜的成果。目前已成功地研制出钇铝石榴石激光透明陶瓷^[18,19]和YGO、 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ 等透明闪烁陶瓷。Siemens公司已经成功地将 $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ 陶瓷闪烁体应用于医学X射线计算机断层扫描影像术(X-ray computed tomography, X-CT),制造出的Ultrafast X-CT具有优异的性能,大大促进了新型透明陶瓷的研究与探索。

5. 碳纳米材料

一般地,碳纳米材料可分为两种:纳米结构碳和纳米尺度碳。纳米结构碳是指内部孔隙或结构在纳米量级的碳材料,其代表材料为活性炭和活性碳纤维。纳米尺度碳是指外部尺寸在纳米尺度的碳材料,其代表材料为炭黑、巴基球、碳纳米管、碳纳米纤维、纳米金刚石等。

碳纳米材料具有独特的低维结构和奇异的光学、电学、机械特性以及量子尺寸效应,这些特点使其在光电功能器件领域中有着越来越重要而广泛的应用,现已成为材料研究领域的前沿和热点。

6. 薄膜材料

当固体或液体的一维线性尺度远远小于其他二维线性尺度时,将这样的固体或液体称为膜。薄膜材料通常具有优异的力学、热学等性能,而且还具有光电、压电、磁性等特定功能,并且成本较低,所以广泛应用于科研、生产和生活中。

目前,光电薄膜作为薄膜材料中的重要组成部分,在波导、镀膜、光学开关、太阳能电池等领域有广泛的应用前景。

光电薄膜的制备方法很多,原理也有所不同。归纳起来,常见的光电薄膜制备方法主要有两种:物理气相沉积(physical vapor deposition, PVD)和等离子

体化学气相沉积(plasma chemical vapor deposition, PCVD)。

7. 负折射率材料

负折射率材料是近些年才出现的一种新型材料,由于其具有不同于通常材料的许多物理性质,例如负群速度、负折射率等,使其开创了一个全新的领域,可以用其制作出以前人们无法制作的许多器件,例如隐身斗篷等。随着负折射率材料研究的发展,许多原有的技术将得到新的发展和突破。对负折射率材料的研究已经成为国际科学界关注的热点,吸引了许多科学家的兴趣,特别是其独特的性质,将给电磁界带来一场革命。又因为它有很强的军用价值,所以一定会成为各国物理材料研究的重点。

8. 多铁性材料

多铁性材料(multiferroic)包含铁电性(反铁电性)、铁磁性(反铁磁性、亚铁磁性)和铁弹性中的两种及两种以上铁的基本性能。这类材料在一定的温度下同时存在自发极化和自发磁化,从而引起磁电耦合效应,使多铁性材料具有某些特殊的物理性质。这些特殊的物理性质引发了若干新的、有趣的物理现象,包括在磁场的作用下极化重新定向或者诱导铁电相变;在居里温度铁磁相变点附近产生介电常数的突变;在电场作用下磁化重新定向或者诱导铁磁相变。而这些物理现象都与光电功能密切相关,因此,多铁性材料也是一种重要的光电功能材料。由于多铁性材料集合了多个性质于一身,已成为当前国际上研究的一个热点。

1.3 光电功能材料的展望

当前,在光电功能材料研究方面,亟待解决和发展的科学问题包括:进一步发展有关理论,扩大理论的应用范围;发展新的材料制备方法和技术,加强材料制备设备的研制。

在光电功能材料领域,我国自20世纪50年代开始起步,到20世纪80年代已经逐步走上了自主研究的道路,取得了一系列为世人瞩目的成果,完成了从原始创新到高技术产业的全过程,并引领了新的研究领域和高技术的发展。

从世界范围看,光电功能材料经过多年的探索和发展,已经发展到一个全新的阶段,相信经过一代又一代人的不断努力,未来会取得更辉煌的成就。

参考文献

- [1] 王继扬, 吴以成. 光电功能晶体材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(10): 1-15.

- [2] Tressler J F, Alkoy S, Dogan A, et al. Functional composites for sensors, actuators and transducers[J]. *Composites: Part A*, 1999, 30(4): 477-482.
- [3] 蒋民华. 晶体物理[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1980.
- [4] 马如璋, 蒋民平, 徐祖耀. 功能材料学概论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [5] Massey G A, Loehr T M, Willis L J, et al. Raman and electro-optic properties of potassium titanate phosphate[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(24): 4136-4137.
- [6] Roth M, Tseitlin M, Angert N. Composition-dependent electro-optic and nonlinear optical properties of KTP-family crystals [J]. *Optical Materials*, 2006, 28(1-2): 71-76.
- [7] Rauber A. Chemistry and physics of lithium niobate, In current topics in materials science [J]. 1978, 1: 481-601.
- [8] Günter P. Electro-optical properties of KNbO_3 [J]. *Optics Communications*, 1974, 11(3): 285-290.
- [9] Cohen R E. Origin of ferroelectricity in perovskite oxides[J]. *Nature*, 1992, 358: 136-138.
- [10] 王旭平. KTN 系列晶体的生长及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [11] 田浩. 顺电相钽铌酸钾锂晶体的生长及电控光折变性质研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [12] Pierangeli D, Parravicini J, Di M F, et al. Photorefractive light needles in glassy nanodisordered KNTN[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1657-1660.
- [13] Bekker A, Peda'el A, Berger N K, et al. Optically induced domain waveguides in $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(24): 3121-3123.
- [14] 刘思敏, 郭儒, 凌振芳, 等. 光折变非线性光学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [15] Gray G W. The mesomorphic behaviour of the fatty esters of cholesterol[J]. *Journal of the Chemical Society*, 1956, 94(6): 3733-3739.
- [16] 吉亚明, 蒋丹宇, 冯涛, 等. 透明陶瓷材料现状与发展[J]. *无机材料学报*, 2004, 19(2): 275-282.
- [17] Coble R L. Transparent alumina and method of preparation: US, 3026210 [P]. 1962-03-10.
- [18] Ikesue A, Kamata K, Yoshida K. Effects of neodymium concentration on optical characteristics of polycrystalline Nd : YAG laser materials [J]. *J. Am. Ceram. Soc*, 1996, 79(7): 1921-1926.
- [19] Ikesue A. Polycrystalline Nd : YAG ceramics lasers[J]. *Optical Materials*, 2002, 19(1): 183-187.