光折变空间光学孤子及其温度与自偏转特性

Guangzhebian Kongjian Guangxue Guzi
Jiqi Wendu Yu Zipianzhuan Texing

张光勇　程永进　著

中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

光折变空间光学孤子及其温度与自偏转特性

张光勇　　程永进　著

中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

内 容 摘 要

光折变非线性光学是一门新兴的学科，它在当前的高科技、光通信、光信息处理及光子器件设计领域中占有重要地位，具有重要的潜在应用价值。本书系统介绍了光折变效应，基于光折变效应的空间光学孤子理论，光折变空间光学孤子的温度特性，空间光学孤子传播偏转特性；并论述了双光束耦合耗散系统中的刚性孤子理论及温度特性。最后简要介绍了双光子光折变效应及双光子光折变空间光学孤子。每章后面附有相关参考文献。

本书可供物理学、光通信及光电信息等科学与技术专业的科技人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光折变空间光学孤子及其温度与自偏转特性/张光勇，程永进著. —武汉：中国地质大学出版社有限责任公司，2012.12

ISBN 978-7-5625-3027-5

Ⅰ.①光…
Ⅱ.①张…②程…
Ⅲ.①光学晶体-光折变-光孤子-研究
Ⅳ.①0734②0437

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 279445 号

光折变空间光学孤子及其温度与自偏转特性　　张光勇　程永进　**著**

责任编辑：马新兵　　责任校对：张咏梅

出版发行：中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)　邮政编码：430074
电话：(027)67883511　　传真：(027)67883580　　E-mail：cbb@cug.edu.cn
经　　销：全国新华书店　　http://www.cugp.cug.edu.cn

开本：787 毫米×960 毫米 1/16　　字数：183 千字　印张：9.5
版次：2012 年 12 月第 1 版　　印次：2012 年 12 月第 1 次印刷
印刷：荆州鸿盛印务有限公司　　印数：1—500 册

ISBN 978-7-5625-3027-5　　定价：39.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前　言

光折变非线性光学是非线性光学的一个重要分支，它是研究光与具有光折变效应的非线性介质相互作用的学科。自 1992 年 Segev 等预言光折变晶体中存在空间光学孤子以来，光折变空间光学孤子以其写入光功率低、写入波导的存储期长、能形成(2＋1)维波导等特点，成为近年来光折变非线性光学最为活跃的研究领域。光折变非线性属于饱和非线性，且可在较低的非均匀光辐照下产生，这使得光折变介质成为观察各种孤子现象的理想化介质，如空间孤子的三维相互作用、非相干孤子及分立孤子现象等。

光折变空间光学孤子在孤子研究领域中占据重要地位。首先，光折变空间光学孤子的形成对入射光强没有明显的阈值要求，孤子在微瓦量级的入射功率下即可产生，这使得许多孤子实验用低功率连续激光即可完成；其次，光折变空间孤子诱导波导可用于导引另一束介质非敏感的强光束，这对于光控光非常具有吸引力，同时光折变孤子波导可用于定向耦合器件及高效频率转换器件的设计；最后，光折变介质具有的非局域、非瞬时响应特性，使其成为研究非相干非线性光学的最理想介质，光折变介质中首次观察到的非相干空间孤子是光折变非线性光学对孤子研究领域的一个重大贡献。

本书共分 7 章。第 1 章是光折变效应及光折变空间光学孤子概述；第 2 章总结了光折变空间光学孤子基本理论；第 3 章讨论了光折变空间光孤子的演化和偏转特性研究；第 4 章研究了温度对光折变空

间光学孤子演化和偏转特性的影响;第5章介绍了光折变独立空间孤子对理论并讨论了温度对光折变独立空间孤子对演化和偏转的影响;第6章介绍了耗散全息光孤子温度特性研究;第7章对双光子光折变空间光学孤子及非相干耦合孤子对理论作了简单介绍。

由于本书出版较为匆忙,加之限于笔者的水平和经历,本书难免会有不足或是错误之处,敬请读者不吝赐教,提出宝贵批评和指正意见。

最后,我要向在本书写作过程中在不同方面给过我许多宝贵帮助的我的博士研究生导师刘劲松教授致以衷心的感谢。在本书出版过程中,中国地质大学物理系陈刚教授给予了许多指导意见,在此,对他的支持与帮助表示深切的谢意。同时,深深感谢中央高校基本科研业务费专项资金(青年教师特色学科团队项目:CUG110120)给予本书出版的资助。

著　者

2012.9

此为试读,需要完整PDF请访问:www.ertongbook.com

目　录

第 1 章　光折变空间光学孤子概述 …… (1)
1.1　光折变效应 …… (1)
1.2　光折变效应的主要特征 …… (2)
1.3　光折变晶体材料 …… (5)
1.4　光折变材料的基本性能 …… (10)
1.5　孤子与光学孤子 …… (12)
1.6　光折变空间光学孤子 …… (18)
1.7　光折变空间光学孤子的研究进展 …… (19)
参考文献 …… (23)
第 2 章　光折变空间光学孤子基本理论 …… (32)
2.1　光折变效应物理机制 …… (32)
2.2　光激发载流子的输运 …… (34)
2.3　光折变效应动力学方程 …… (38)
2.4　光折变空间光学孤子理论 …… (40)
2.5　光折变空间光学孤子实例 …… (44)
参考文献 …… (50)
第 3 章　光折变空间光孤子的演化和偏转特性研究 …… (53)
3.1　光折变空间光孤子的基本演化特性 …… (53)
3.2　光折变孤子的低阶偏转特性 …… (55)
3.3　光折变亮孤子的高阶偏转特性研究 …… (61)
参考文献 …… (70)
第 4 章　温度对光折变空间光学孤子演化和偏转特性的影响 … (74)
4.1　温度对光折变亮孤子动态演化特性的影响 …… (74)
4.2　光折变亮孤子的温度偏转特性研究 …… (76)
参考文献 …… (80)
第 5 章　温度对光折变独立空间孤子对演化和偏转的影响 …… (83)
5.1　光折变独立空间屏蔽孤子对理论 …… (83)

5.2 独立空间孤子对的参数耦合作用 …… (87)
5.3 温度对独立空间屏蔽亮暗孤子对稳定性的影响 …… (91)
5.4 独立空间亮暗孤子对中暗孤子对亮孤子演化偏转特性的影响 … (95)
参考文献 …… (99)
第 6 章 耗散全息光孤子温度特性研究 …… (101)
6.1 光折变耗散系统中的全息空间光孤子理论 …… (101)
6.2 耗散全息光孤子小信号解析解 …… (103)
6.3 温度对耗散全息亮孤子稳定性的影响 …… (107)
6.4 二维耗散光伏亮孤子的实验观测 …… (110)
参考文献 …… (117)
第 7 章 双光子光折变空间光学孤子 …… (120)
7.1 双光子光折变非线性增强效应 …… (120)
7.2 双光子光折变模型 …… (122)
7.3 双光子光折变空间光学孤子理论 …… (124)
7.4 双光子光折变亮孤子的自偏转 …… (133)
7.5 非相干耦合双光子光折变空间孤子对 …… (134)
参考文献 …… (140)

第 1 章　光折变空间光学孤子概述

广义上讲，光折变空间光学孤子是指在具有光折变效应的电光材料中形成的空间孤子。它源于电光材料折射率变化非线性约束效应和光束的衍射相互平衡，从而导致光束在材料中传播时保持其空间包络不变传输。自从 1992 年预言光折变晶体中能形成空间光学孤子以来，光折变空间孤子以其写入光功率低、写入波导的存储期长、能形成(2+1)维波导等优点，成为近年来非线性光学最为活跃的研究领域，有关报道层出不穷[1,2]。近 20 年来相关研究不断深入，其应用范围不断扩大，光折变晶体中形成的空间光学孤子现象已经成为光折变非线性光学的一个重点研究对象。本章简要介绍了光折变效应及其主要特征[3]、光折变晶体材料及其特征参量[4,5]、光学孤子及光折变空间孤子的研究进展[6—8]。

1.1　光折变效应

光折变效应(photorefractive effect)是光致折射率变化效应(photo - induced refractive index change effect)的简称。它是电光材料在空间调制光强或非均匀光强的照射下，折射率发生相应变化的一种非线性光学现象。

1966 年，美国贝尔实验室的 Ashkin 等在 $LiNbO_3$ 和 $LiTaO_3$ 晶体激光倍频实验中首次发现了光折变效应[9]。他们在实验中意外发现，由于光辐照区折射率的变化破坏了产生倍频的相位匹配条件，从而降低了倍频转换的效率。当时把这种由于折射率的不均匀变化导致的光束散射和畸变称为“光损伤”(optical damage)。这种“光损伤”在光辐照停止后仍能保持相当长的时间，而在强的均匀光照下或在 200℃以上加热情况下又可被擦除而恢复原状。正是基于这种性质，1968 年，Chen 等[10]首先认识到利用这种“光损伤”可进行全息光学记录，并深入研究了这种效应的物理机制，提出了光激发载流子的漂移模型。由于这种“光损伤”可以通过均匀辐照和加热的方法擦洗掉，因而是一种可逆的损伤。为了区别于永久性的光损伤，后来人们将它改称为“光折变效应”。此后人们相继在 $BaTiO_3$、$KNbO_3$、SBN 等铁电氧化物，$Bi_{12}SiO_{20}$(BSO)、$Bi_{12}GeO_{20}$(BGO)、$Bi_{12}TiO_{20}$(BTO)等立方硅铋族氧化物，GaAs、InP、CdTe 等半导体材料以及电

光陶瓷 PLZT 和有机聚合物等材料中发现了光折变效应[11]。

电光材料中的光折变过程是一个复杂的光电过程，涉及到光激发载流子的激发、迁移、俘获和再激发。具体过程可概括如下[3,4]：

光照之前，光折变晶体中的电子被束缚在价带中，不能自由运动，在空间调制光强或是非均匀光强的照射下，光照区的电子被激发出来，进入相邻的导带，同时在价带中留下空穴。导带中的电子和价带中的空穴都可以自由运动，这就是光生载流子。

载流子在晶体中的运动形式主要有三种。

(1)由于晶体各部分受光照射的强度不同，因此光生载流子的浓度存在浓度梯度，造成了载流子的扩散运动。

(2)电荷在外加电场或晶体内电场的作用下产生漂移运动，内电场是由于晶体内正负电荷中心的分离造成的。

(3)对于铁电晶体，其晶胞结构的不对称性导致了一个自发电极矩。经过单畴化处理的晶体内，每个晶胞的自发电极矩取向一致，相当于一个宏观的内电场，光生载流子在此电场作用下产生迁移运动，这就是光伏打作用。

对于不同的光折变材料，这三种电荷迁移运动所占的比例有所不同。电荷迁移的结果造成了正负电荷中心的分离。另一方面，运动着的载流子又重新被离子等陷阱中心俘获，还可在吸收光子后进行再激发。经过一系列的激发—迁移—俘获—再激发过程，载流子最终离开光照区，在暗区定居下来，此时光激发过程不再进行。这种运动的结果是在晶体内形成了与光强的空间分布相对应的电荷的空间分布。根据 Poisson 方程，这样的空间电荷分布必将产生与之相对应的空间电荷场 E_{SC}，并通过电光效应，调制晶体的折射率，即在晶体中写入体相位栅。

1.2 光折变效应的主要特征

正如前所述，光折变效应是指在非均匀光的照射下，通过空间电荷场的形成和电光非线性所引起的晶体材料折射率的空间调制。这一现象最初由于破坏了倍频实验条件导致光束散射和畸变而被称为光损伤[9]。后来，人们认识到这种光损伤可以在暗处保持相当长的时间，所以可以利用这种效应存储光学信息，从此这种光损伤得到广泛而深入的理论和实验研究，并被重新命名为光折变效应。这种光致折射率变化效应具有如下几个显著的特点[3]。

1. *弱光非线性光学*

光折变效应的光致折射率变化 Δn 依赖于 I/I_d 的比值，其中 I 为辐照光强，

I_d 为暗辐照强度。通过附加非相干背景辐照光 I_b 可控制 I_d 值的大小，从而有效改变 Δn 值的大小。和强光非线性光学相比，光折变效应最明显的特征是它产生于入射光强的空间调制，而不是绝对的入射光强，如表 1.1 所示。也就是说，对于弱光（如毫瓦级，甚至是微毫瓦级），只要辐照时间足够长，也可得到足够大的折射率变化。因此，人们又将光折变效应称为弱光非线性光学，以区别于在强光作用下极化率的非线性改变引起的强光非线性。后者是由于在通常的非线性光学材料中，价健电子云在光场作用下发生形变，电子云的畸变会引起激发态的能级或跃迁矩阵的微扰变化，从而对光的传播产生影响。由于原子核对价键电子的束缚作用一般远大于电场的扰动作用，因此，只有在极高的光场作用下才会显出明显的非线性光学效应。

表 1.1　光折变非线性与强光非线性的比较[3]

	光折变非线性	强光非线性
阈值	弱光非线性，无阈值	只有在光场 $E>10^8$ V/cm 时才出现非线性，有阈值
响应时间	非瞬时响应（慢响应），需要光激发、自由载流子迁移和光俘获过程，响应时间依赖于光强	瞬时响应，电子在光场作用下瞬态感应电偶极矩，响应时间与光强无关（在阈值以上时）
存储性	暗存储时间反比于暗电导 $\tau_d=\frac{\varepsilon_0\varepsilon}{\sigma_d}$	没有存储性，$E=0$ 时，$\Delta n=0$
空间局域性	对于扩散机制：空间非局域 $\Phi=\pi/2$ 对于漂移及光生伏打机制：空间局域 $\Phi=0,\pi$	空间局域，$\Phi=0$

在光折变效应中，光场作用下光生载流子被激发，而后产生迁移并俘获形成空间分离的空间电荷，从而产生空间电荷场，并通过电光效应引起材料折射率的改变。因此，光折变效应起因于光强的空间调制，而不是绝对光强。因为空间电荷的分离和空间电荷场的建立需要一个积累的过程，所以光强的大小主要影响到自由载流子被光激发的速率和空间电荷场建立的时间。

弱光非线性光学无疑为非线性光学开创了更加广阔的研究领域，它不仅仅

可以在方便的时间尺度下观察和研究非线性现象，而且使得实时制作各种非线性光学器件成为可能。

2. 空间非局域性

如果光生载流子的迁移机制是扩散占优势，那么折射率改变的最大值处并不对应光辐照最强处。也就是说，相位栅在光栅波矢量相对于光强的干涉条纹有一定的空间相位移(即 $\Phi\neq 0$)，这种光栅又称为相移型光栅，它允许两束相互作用光束间发生稳态的能量转移。由光折变效应的两波耦合理论可知，增益系数 Γ 正比于 $\sin\Phi$，因此当相位移 $\Phi=\pi/2$ 时，光束间发生最大的能量转移。由于光折变材料对光强的非空间定域响应，折射率光栅与入射光强分布之间存在一个相位差，这个相位差的存在是光束在材料内发生耦合作用的原因所在，也是许多非线性光学效应产生的根源。

3. 过程的可逆性

在均匀光辐照下或是加热光折变材料，便可擦洗掉 Δn，这是因为在光折变过程中积累在辐照区边缘的空间电荷在不存在光照时会以暗弛豫时间弛豫，最终正负电荷被中和，即空间电荷场消失，所以折射率变化 Δn 虽然能够在暗处保存但是不能永久保存。提高介质温度可以增大暗电导，均匀光辐照下是用光电导代替暗电导，这两种方法均可缩短空间电荷的弛豫时间，将 Δn 擦洗掉。

4. 短波长比长波长的光折变敏感度高

这是因为波长短，处于更深能级的光生载流子越能被激发。如果光波的能量高于或是接近禁带宽度，电子和空穴都将参与光折变过程，它可以引起更强的光折变效应(带际光折变效应)，而且它具有许多不同于通常由杂质能级激发产生光生载流子的光折变效应的新特点。如果用脉冲激光代替连续光辐照光折变材料，则可以通过双光子吸收引起带际光折变效应。

5. 具有相当长的暗存储时间的非瞬时响应

光折变材料的暗处全息图稳定性取决于室温下俘获电荷载流子的陷阱的热激发活能，其越容易热激发，全息图的保存时间越短。因此，光折变材料在暗处保存全息图的能力，与材料的参数暗电导有关，光折变材料的暗电导一般比较小，所以暗存储时间一般比较长。在实际应用中，具有较低暗电导值的材料通常也会导致较慢的响应时间，所以要同时达到快速写入和长时间存储，这是目前光折变技术实用化过程中的一大挑战。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

1.3　光折变晶体材料

光折变材料是指那些由光致空间电荷场通过线性电光效应引起折射率变化的电光材料[4]。目前，几乎在所有的电光材料中都观察到了光折变效应，人们已先后在无机非金属晶体材料，如铌酸锂（$LiNbO_3$）、钽酸锂（$LiTaO_3$）、钛酸钡（$BaTiO_3$）、铌酸钾（$KNbO_3$）、钽铌酸钾[$K(Ta,Nb)O_3$]、铌酸钡钠（$Ba_2NaNb_3O_{15}$）、铌酸锶钡（$Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$，$0.25<x<0.75$）、硅酸铋（$Bi_{12}SiO_{20}$）、锗酸铋（$Bi_{12}GeO_{20}$）、钛酸铋（$Bi_{12}TiO_{20}$），陶瓷材料$(Pb,La)(Zr,Ti)O_3$，半导体材料砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）、锑化镉（CdTe）以及有机材料 COANP、bisANPDA 等材料中都观察到了显著的光致折射率变化。这些材料的光学、电学和结构特性差别都非常大，但它们有几个共同点，如晶格较易被扭曲，可在光致内电场的作用下发生晶格结构的畸变，并进一步导致折射率改变；晶体内部含有大量缺陷，用于充当电荷载流子的施主和陷阱等。

不同的光折变材料的特性不同，取决于材料的带宽、材料中杂质离子施主和陷阱的能级位置、浓度以及辐照光源的波长等。光折变晶体是那些没有中心对称的晶体，它们可大致归为三类[4]。

1.3.1　铁电体

铁电体晶体具有较大的电光系数，因此能达到很高的衍射效率，在许多场合，仅仅因为晶体本身的光吸收，使得衍射效率低于 100%。另一方面，铁电晶体具有大的最大折射率变化 Δn 和长的暗存储时间，使得它们非常适用于全息存储。铁电晶体的另一显著特点是存在结构相变，发生在居里点附近，此时材料的许多性能都会发生明显改变。铁电光折变晶体材料的种类如下。

1. *钙钛矿结构晶体*

其通式为 ABO_3，由 BO_6 八面体以共顶角方式联结成晶格骨架，一价或二价金属离子 A 则填充在八面体之间的空隙内。典型的钙钛矿结构铁电氧化物晶体包括钛酸钡（$BaTiO_3$）、铌酸钾（$KNbO_3$）、钽铌酸钾（$KNb_{1-x}Ta_xO_3$，KTN）等。其中，钛酸钡（$BaTiO_3$）晶体是最早被确定具有光折变效应的晶体。钙钛矿结构晶体有关的光折变参数列于表 1.2 中[4,12]。

钙钛矿结构光折变晶体的显著特点是其光电系数大，光折变效应较强，是目前性能最佳、使用较广的光折变材料。表 1.2 中列出的三种晶体都是人们研究的较多的钙钛矿光折变晶体材料。这三种晶体的缺点是很难获得大尺寸完全单

畴化的晶体,从而限制了它们的应用。

表 1.2 钙钛矿结构有关光折变晶体的光折变参数[4]

材料	$BaTiO_3$	$KNbO_3$	KTN
居里点/℃	120	225	90
对称性	4mm	2mm	4mm
折射率	$n_o=2.484$ $n_e=2.424$	$n_a=2.333$ $n_b=2.339\ 4$ $n_c=2.212$	$n_o=2.318$ $n_e=2.275$
介电常数	$\varepsilon_{11}=3\ 770$ $\varepsilon_{33}=135$	$\varepsilon_{11}=140$ $\varepsilon_{22}=1\ 200$ $\varepsilon_{33}=40$	$\varepsilon_{11}=1\ 600$ $\varepsilon_{33}=400$
电光系数/pm·V^{-1}	$\gamma_{13}=19.5$ $\gamma_{33}=97$ $\gamma_{42}=\gamma_{51}=1\ 640$	$\gamma_{13}=28$ $\gamma_{23}=1.3$ $\gamma_{33}=64$ $\gamma_{42}=380$ $\gamma_{51}=105$	$\gamma_{13}=-100$ $\gamma_{33}=240$ $\gamma_{42}=2\times10^4$
电荷类型	空穴或电子	电子或空穴	空穴
受主浓度 N_A/cm^{-3}	$10^{16}\sim10^{18}$	$10^{15}\sim10^{18}$	$10^{15}\sim10^{17}$
灵敏度 $S/cm^2\cdot J^{-1}$	0.67	2.2	
电荷迁移率 $\mu/cm^2\cdot V^{-1}s^{-1}$	0.5	0.2～0.6	
复合系数 $\gamma_R/cm^3\cdot s^{-1}$	5×10^{-8}	3.3×10^{-13}	
Σ	0.33～0.99		
τ_{di}/s	67($I_0=0.1W/cm^2$) 0.3($I_0=20W/cm^2$)	$\leqslant3\times10^{-6}$	
τ_R/s	1.0×10^{-9}		
τ_L/s	0.3($I_0=0.1W/cm^2$) 1.3×10^{-3}($I_0=20W/cm^2$)	6.5×10^{-2}(50W/cm^2)	
$\sigma_d/\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$	6×10^{-12}	$10^{-2}\sim10^{-14}$	
$\sigma_{ph}/\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$		1.4×10^{-5}(0.1W/cm^2)	
$\mu\tau_R/cm^2\cdot V^{-1}$	5×10^{-10}	2.3×10^{-10}	2×10^{-10}
L_{ph}/nm	7±1	0($KNbO_3$∶Ta)	
L_D/nm	100±5	150±7	10～40
L_s/nm	0.75±0.04	1.1±0.05	

2. 钨青铜结构晶体

其通式为$(A_1)_2(A_2)_4(B_1)_2(B_2)_8-(C)_4O_{30}$，其中$(B_1)O_6$和$(B_2)O_6$八面体构成晶格骨架。另外，还有三种不同的空隙及 12 配位的(A_1)，15 配位的(A_2)和 9 配位的 C 位，A_1、A_2和 C 间隙可以填充不同价态的阳离子，从而形成各种钨青铜结构的化合物。这些阳离子间隙可以被完全填满，也可以保留作为空位，因此钨青铜结构的晶体组分变化范围较大，内部缺陷结构复杂，易于掺杂，为其光折变效应的掺杂优化提供了很多可能。

与其他光折变材料相比，钨青铜型材料具有以下特点。

(1)电光系数张量中不为零的元素比钙钛矿型晶体多。

(2)具有简单的畴结构，极化容易。

(3)具有较大的电光效应且可以通过晶体组分的调整来改变电光系数的大小(表 1.3)。

(4)可以制备相变晶界化合物，具有非常大的极化率和电光系数。

(5)结构空位多，易于引入其他的光折变中心以增强其光折变效应。

表 1.3　钨青铜结构晶体 SBN，KNSBN，PBN 的光折变参数[12]

材料	SBN:60	SBN:75	KNSBN	PBN
居里点/℃	120	225	175	300～400
折射率	$n_o=2.36$ $n_e=2.33$		$n_o=2.35$ $n_e=2.36$	$n_o=2.27$ $n_e=2.41$
波长/nm	514		514	633
介电常数	$\varepsilon_{11}=470$ $\varepsilon_{33}=880$	$\varepsilon_{11}=500$ $\varepsilon_{33}=3\ 000$	$\varepsilon_{11}=700$ $\varepsilon_{33}=170$	$\varepsilon_{11}=1\ 600$ $\varepsilon_{33}=400$
电光系数/pm·V^{-1}	$\gamma_{13}=47$ $\gamma_{33}=235$ $\gamma_{42}=30$	$\gamma_{13}=50$ $\gamma_{33}=1\ 400$ $\gamma_{42}=42$	$\gamma_{33}=170$ $\gamma_{42}=350$	$\gamma_{13}=32$ $\gamma_{33}=160$ $\gamma_{51}=1\ 600$
电荷类型	电子	电子		电子
受主浓度 N_A/cm^{-3}	$10^{16}\sim10^{17}$	$\sim10^{16}$	$10^{16}\sim10^{17}$	
载流子迁移率和寿命之积/cm^2·V^{-1}	$(1.7\sim5.6)\times10^{-10}$	1.7×10^{-10}		
暗电导/Ω^{-1}·cm^{-1}	$(0.14\sim2.65)\times10^{-10}$	1.4×10^{-11}		

典型的钨青铜结构光折变晶体包括：铌酸锶钡 $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$（SBN，$0.25<x<0.75$），钾钠铌酸锶钡$(K_yNa_{1-y})_a(Sr_xBa_{1-x})_bNb_2O_6$（KNSBN），铌酸铅钡 $Pb_xBa_{1-x}Nb_2O_6$（PBN）等。表 1.3 列出了这些晶体的光折变参数。这些晶体通常采用熔体生长技术，交易得到大尺寸的单畴晶体。

3. 类钙钛矿结构晶体

铌酸锂（$LiNbO_3$）、钽酸锂（$LiTaO_3$）晶体是最早被发现具有光折变效应和研究最为广泛的晶体。此类晶体也具有由 BO_6 氧八面体组成的 ABO_3 晶格，但与钙钛矿结构不同的是这些氧八面体是通过共用氧三角平面，沿三重极轴 c 连接起来。从极轴看去阳离子的排列次序为 Nb(Ta)、空位、Li、Nb(Ta)、空位、Li……。铌酸锂（$LiNbO_3$）和钽酸锂（$LiTaO_3$）两种晶体均采用提拉法从熔体中生长，且居里温度分别达到 1 210℃ 和 665℃。与其他铁电光折变晶体相比，这两种晶体更易于获得大尺寸的单畴单晶，且不必担心在长期使用过程中退极化。在 $LiNbO_3$ 晶体中通常掺入 Fe 杂质以增强其光折变性能，$LiNbO_3$：Fe 晶体也是目前最通用的光折变三维全息记录材料。表 1.4 列出了 $LiNbO_3$ 和 $LiTaO_3$ 晶体的部分光折变参数。

表 1.4 $LiNbO_3$ 和 $LiTaO_3$ 晶体的有关光折变参数[4]

材料	$LiNbO_3$	$LiTaO_3$
折射率	$n_o=2.323$ $n_e=2.234$ ($\lambda=532$nm)	$n_o=2.183\ 4$ $n_e=2.187\ 8$ ($\lambda=600$nm)
介电常数	$\varepsilon_{11}=\varepsilon_{22}=78$ $\varepsilon_{33}=32$	$\varepsilon_{11}=\varepsilon_{22}=51$ $\varepsilon_{33}=45$
电光系数/pm·V^{-1}	$\gamma_{13}=10$，$\gamma_{33}=33$ $\gamma_{22}=6.8$，$\gamma_{51}=32$	$\gamma_{13}=7$，$\gamma_{33}=30$ $\gamma_{22}=1$，$\gamma_{51}=20$
受主浓度 N_A/cm^{-3}	6×10^{16}	
电荷迁移率 $\mu/cm^2\cdot V^{-1}s^{-1}$	0.8	
复合系数 $\gamma_R/cm^3\cdot s^{-1}$	10^{-13}	
τ_R/s	0.013	

1.3.2 硅铋族立方氧化物晶体

这类材料主要包括硅酸铋 $Bi_{12}SiO_{20}$（BSO），锗酸铋 $Bi_{12}GeO_{20}$（BGO），它们都具有顺电电光和光导特性。晶体属于立方结果、$\bar{4}3m$ 对称点群，无外加电场

时晶体为各向同性，在外加电场作用下表现出双折射。与铁电氧化物晶体相比，这列晶体具有较强的旋光系数，在光折变应用时必须考虑晶体对光束偏振性的影响。这类晶体的应用一般采用两种不同的光路配置，一种是光栅矢量平行于晶体[001]面，以获得最大的衍射效率，通常用于记录全息图；另一种是光栅矢量垂直于[001]面，对应着最大的光束耦合作用，通常用于相干光放大和光学相位共轭。表 1.5 列出了 BSO 和 BGO 晶体的光折变参数，与铁电氧化物光折变晶体相比，这两种晶体的电光系数虽然较小，光折变效应也较弱，但是由于它们是光电导材料，因此具有很快的光折变响应速度。如果采用外加直流或交流电场等方法，也可增强这些晶体的光折变效应，以满足实际应用的需要。

BSO 和 BGO 晶体采用提拉法生长，易于获得大尺寸高质量的晶体。

表 1.5　BSO 和 BGO 光折变参数[4]

材料	BSO	BGO
折射率	2.650,2.615,2.530	2.6
λ/nm	(515)　(633)	
介电常数	56	48
电光系数 γ_{41}/pm·V^{-1}	4.25,3.81	3.67,3.29
λ/nm	(850)	(850)
旋光系数(°/mm)	45,22,11	20.5,9.5
λ/nm	(633),(850)	(850)
受主浓度 N_A/cm^{-3}	10^{16}	
电荷迁移率 μ/cm^2·V^{-1}s^{-1}	0.24(室温)	
$\mu\gamma_R$/cm^2·s^{-1}	10^{-7}	0.84×10^{-7}
σ/Ω^{-1}·cm^{-1}	10^{-18}	10^{-14}

1.3.3　半导体光折变材料

纯的和掺杂 Cr 的高阻 GaAs 以及掺杂 Fe 的高阻 InP 和 CdTe 半导体光折变材料都具有大的电荷迁移率、高的光电导和很快的响应速度，但它们的电光系数很小，必须借助于外加电场来得到较大的空间电荷场。这类材料的光谱响应范围在红外区 0.95～1.35μm 处，且载流子的迁移率、寿命以及迁移特征长度等性能参数都与外加电场有关，例如砷化镓(GaAs)中外加交流电场时会大大降低电荷迁移率与寿命之积 $\mu\tau_R$，在锑化镉(CdTe)中当外加电场强度超过 13kV/cm

时也会导致电荷迁移率下降[4]。

掺杂对半导体材料的光折变效应同样具有增强作用，常见的块状掺杂半导体晶体包括 GaAs:Cr，InP:Fe，CdTe:Fe，CdTe:V 等。另外，半导体量子阱结构（如 AlGaAs/GaAs）通过斯塔克量子限制效应使得光折变效应得到增强。

1.4 光折变材料的基本性能

光折变效应是光电材料的一种普遍性质。光折变效应涉及到光生载流子的产生、电荷迁移和电光效应等过程，对于不同的应用领域，光折变材料要满足不同的性能要求。不同光折变材料中光折变效应的强弱依赖于材料的光折变灵敏度和品质因数、响应时间、动态范围、施主与受主杂质浓度与类型等光折变参量。描述光折变材料的基本性能，一般用以下几个光折变特征参量[3,13]。

1.4.1 光折变灵敏度

光折变灵敏度 S 定义为单位体积内每吸收单位光能量所引起的晶体折射率的改变，它描述了晶体利用指定光能量来建立光折变光栅的能力，表述为

$$S=\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}W}=\frac{\Delta n}{\alpha I_0 \tau_{SC}} \tag{1.1}$$

其中，$W=\alpha W_0$；W_0 为入射光能；α 为吸收系数。在达到饱和前，单位体积光折变材料吸收的光能为 $\alpha I_0 \tau_{SC}$，其中 τ_{SC} 为材料的响应时间。

定义材料的光折变品质因数为

$$Q_{ph}=\frac{n_0^3 r_{eff}}{\varepsilon} \tag{1.2}$$

其中，n_0 为材料的线性折射率；r_{eff} 为有效电光系数；ε 为材料的介电常数。

(1.2)式表明光折变材料的品质因数正比于折射率改变量 Δn（$\Delta n=-(1/2)\cdot n^3 r_{eff} E_{SC}$），而反比于光折变响应时间 τ_{SC}（$\tau_{SC}=\varepsilon\varepsilon_0/(\sigma_{ph}+\sigma_d)$）。所以，品质因数越大，材料的光折变性能越好。表 1.6 列出了一些光折变晶体的品质因数。

1.4.2 响应时间（τ_{SC}）

因为光折变效应是一个复杂的光电过程，通过电光效应产生折射率变化的空间电荷场 E_{SC} 的形成需要光生载流子的产生、迁移、积累过程，这个过程的快慢决定了光折变材料的响应时间。光折变的弛豫实际上是空间电荷的弛豫，如果迁移长度 L_{eff} 远远小于光栅间隔，即 $KL_{eff}\ll 1$，则弛豫时间 τ_{SC} 近似等于光电导与暗电导的弛豫时间

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com