

# 光折变效应和 BaTiO<sub>3</sub> 晶体

张 治 国

(中国科学院物理研究所)

## 摘 要

本文简要叙述了光折变效应的基本物理概念和它的特点,具体地介绍了光折变晶体 BaTiO<sub>3</sub> 的自泵浦位相共轭效应、两波耦合效应、光感生的光散射效应等主要物理特性,并给出了有关工作的最新实验结果,简析了光折变晶体的研究现状和今后发展趋势。

光折变效应及各类新型光折变材料的研究,是目前国际上极为活跃的研究领域之一<sup>[1-6]</sup>。光折变材料具有一系列独特性质,因此在非线性光学研究领域独树一帜。国际上不少实验室都竞相开展这方面的研究,以至目前一些价格昂贵但却具有明显光折变效应的材料(如 BaTiO<sub>3</sub> 晶体),国际市场供不应求。

光折变效应及新型光折变材料研究之所以备受人们注意,主要是基于两方面的原因。首先是,光折变材料的一些独特性能具有明显的应用背景。例如,一些光折变材料在极低的连续激光(1mW/cm<sup>2</sup>)下在室温即可显现光折变效应,这些效应在光学计算机、光学信号处理、光放大、全息存储、实时指令、实时光学图象识别等一系列应用光学项目中,具有潜在的应用背景<sup>[6]</sup>。它将有可能促进现有光学技术和器件的更新。其次,一些光折变材料具有极强的非线性特性,用这种材料,将使人们有可能观察到一些迄今尚未观察到的新现象,获得新的实验结果,发现一些新的物理过程。况且,一些具有典型光折变效应的材料(如 BaTiO<sub>3</sub>)本身,从其生长规律到其所具有的一系列重要特性,尚有待进一步的探究。在众多的光折变材料中,BaTiO<sub>3</sub> 晶体由于对光的作用具有极低功率的非线性响应,因而引起人们强烈的兴趣。

## 一、光折变效应

光折变效应一般存在下列的物理过程<sup>[5]</sup>:

(1) 当光场作用于物质时,在物质中激起载流子(电子或空穴);

(2) 载流子在物质内运动,形成空间电荷分布,进而形成空间电场;

(3) 所形成的空间电场,再作用到物质上,产生普克尔效应(一级电光效应),从而使物质折射率发生变化。

这种过程引起的折射率随光作用而变化的效应称为光折变效应。例如,当两束光在光折变晶体中相干后,形成强弱相间的条纹,光强处载流子被激发,并且将在光场梯度方向发生漂移,结果是导致空间电荷分布亦呈周期性(疏密相间),最后呈稳定结构,从而形成空间电场分布,并且它在时间上是稳定的。电荷梯度方向是电场方向,这一周期电场作用于晶体,将产生普克尔效应,即电场强处物质折射率改变大,电场弱处折射率改变小,从而在物质中形成折射率光栅。

## 二、光折变效应的特点

1. 光作用在光折变材料上所形成的折射率光栅与入射光光强大小无关,只与两束光的光强比  $I_1/I_2 = M$  有关。光强在这里只反映建立折射率栅的速度快慢:光强大,折射率栅建立的快;光强弱,折射率栅建立的慢。

2. 对于无梯度光强(指均匀光强,例如晶体置于均匀光场情况),则光强无论多强,都不会在晶体中产生光折变效应。

3. 当两束光作用于物质时,在物质中相干,形成强度分布的栅,进而形成折射率分布的栅。对于通常介质,强度栅和折射率栅的位相是一致的;对于光折变材料,这两个栅的位相是不一

致的，它们将存在有  $\frac{\pi}{2}$  的位相差<sup>[5]</sup>。这是光折变材料的一个重要特性之一。从能量耦合方程我们可以清楚地看到，对两个栅位相一致的介质，两光束间没有能量耦合作用；两个栅位相不一致时，则两光束间将产生能量转换现象<sup>[5]</sup>，人们称这种现象为两波耦合效应。

### 三、BaTiO<sub>3</sub> 晶体的特性

在各类光折变材料中，属铁电类晶体的有：BaTiO<sub>3</sub>，KNbO<sub>3</sub>，LiNbO<sub>3</sub>，SBN 等，它们的非线性特性比其它类型的光折变材料要高，而其中 BaTiO<sub>3</sub> 晶体的极低功率的非线性响应又是其它已知晶体所不及的。下面介绍其主要特性。

#### 1. 自泵浦位相共轭效应

采用四波混频的方法，在非线性质中可以获得入射波的位相共轭波输出。典型的实验配置如图 1(a) 所示： $I_1, I_2$  为泵光， $I_3$  为探测光， $I_4$  为共轭波输出。显然，在这种情况下必须有三束光作用于非线性介质，才能获得位相共轭波输出。但是，对于 BaTiO<sub>3</sub> 晶体，并不需要  $I_1$  和  $I_2$  光束，只要有一束  $I_3$  入射，就可获得位相共轭波  $I_4$  输出[如图 1(b) 所示]。这种特性使它作为自泵浦位相共轭镜(SPPCM)<sup>[2,3]</sup>，将具有明显的优点。目前 BaTiO<sub>3</sub> 的 SPCM 反射率可达 60% 以上<sup>[7]</sup>。笔者所在小组利用这种效应，完成了畸变象复原实验。图 2 为实验配置，其中光源为连续多模 Ar<sup>+</sup> 激光器，输出波长 5145 Å，输出功率 1W。单畴 BaTiO<sub>3</sub> 晶体尺寸为 4.2mm × 5mm × 5.8mm，由中国科学院物理研究所晶体室提供。当激光束经空间滤波器再扩束后通过幻灯片 S 时，载象束经透镜 L<sub>1</sub>、反射镜 M<sub>2</sub>、分束片 BS 及畸变介质 D 入射到 BaTiO<sub>3</sub> 上，载象经畸变介质后发生畸变，其畸变象由镜 4 反射到光屏上。由 BaTiO<sub>3</sub> 产生的位相共轭波经畸变介质 D 后，使畸变象复原，复原象由分束片 BS 反射到光屏上。图 3 是畸变象照片和复原象照片。

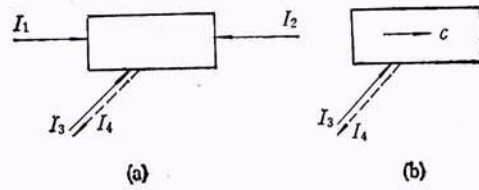


图 1

(a) 用四波混频方法产生位相共轭波；  
(b) 用 BaTiO<sub>3</sub> 自泵浦位相共轭效应产生位相共轭波

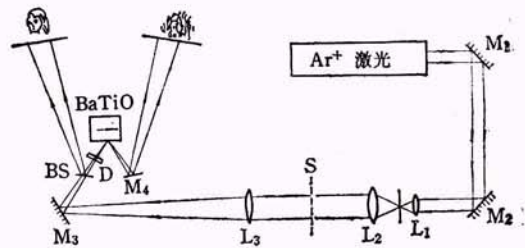


图 2 利用自泵浦位相共轭效应实现畸变象复原实验装置图  
M——反射镜；L——透镜；BS——分束器；D——畸变介质；S——幻灯片



图 3 (上) 畸变象；(下) 复原象

#### 2. 两波耦合效应

当两束光入射到 BaTiO<sub>3</sub> 晶体上时，如果两束光的光程差小于泵源的相干长度，则两束光之间将产生能量耦合作用，相对于晶轴取向

确定, 两束光之间的能量传递方向也是确定的 (如图 4 所示)<sup>[3-5]</sup>. 利用这一原理, 人们在 BaTiO<sub>3</sub> 晶体上已成功地获得放大因子高达 4000 的放大效果<sup>[6]</sup>. 图 5 是笔者所在小组在 BaTiO<sub>3</sub> 晶体上所做的光放大实验装置, 图中经 M<sub>4</sub> 入射到晶体的是泵光, 经 M<sub>3</sub> 入射到晶体的是信号光, O 为缩微底片. 当光通过 O 后到达晶体后面的屏上, 可以看到微缩片上的字母. 在不加泵光情况下, 通过调节可变衰减器, 使信号光减弱到在光屏上看不见字母. 此时若加上泵光, 我们将在屏上看到清晰的字母 (强度) 放大象, 从而表明泵光的能量已经有效地耦合到信号束上, 使信号得到放大.

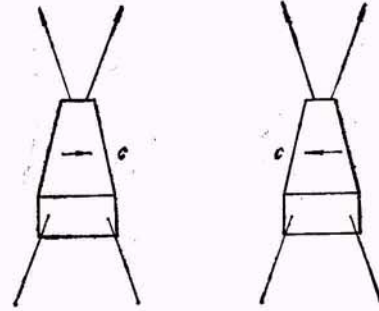


图 4 两波耦合与晶体晶轴  $c$  的关系

### 3. 光感生的光散射效应

光入射到 BaTiO<sub>3</sub> 晶体上后, 将产生一系列有趣的光感生的光散射效应. 通常定义散射光与入射光偏振态相同者为各向同性光散射,

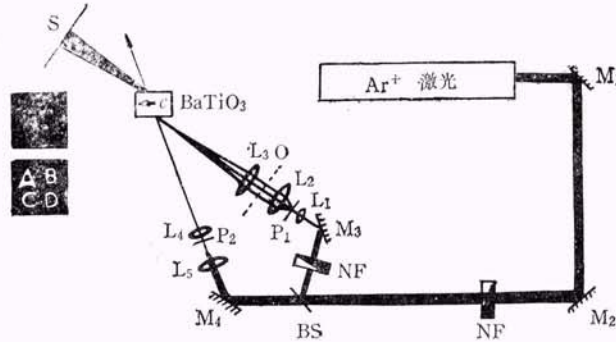


图 5 相干光 CW 图象放大实验装置图

M——反射镜; L——透镜; BS——分束器; NF——滤光片; P——针孔; O——微缩片; S——屏

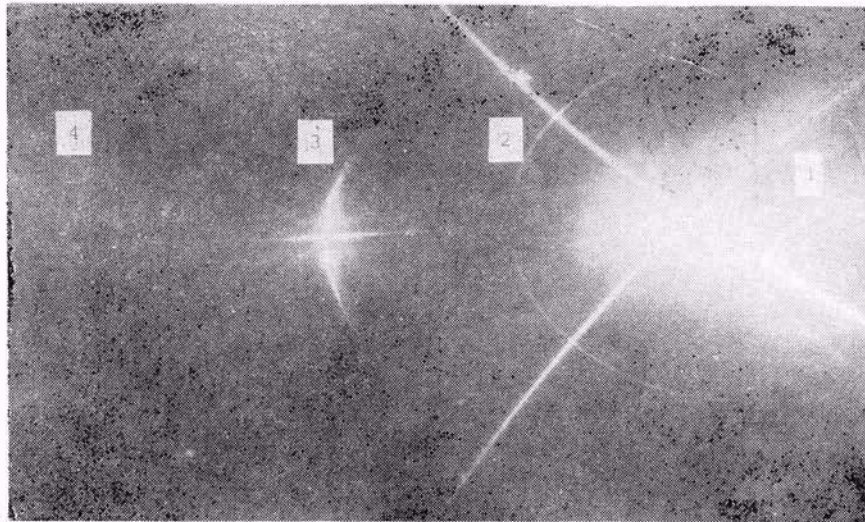


图 6 激光感生的光散射

1——两波相互作用形成的各向同性扇形光散射; 2——三波相互作用形成的相对入射光对称分布的各向异性圆锥光散射; 3——四波相互作用形成的相对出射面法线对称分布的各向同性圆锥光散射; 4——四波相互作用形成的相对出射面法线对称分布的各向异性圆锥光散射

偏振态相反者为各向异性光散射。根据形成机理,又可以把它们分为:(1)基于两波相互作用而形成的各向同性扇形光散射<sup>[3]</sup>; (2)基于三波相互作用而形成的相对于入射光对称分布的各向异性圆锥形光散射<sup>[9]</sup>; (3)基于四波相互作用而形成的相对于出射面法线而对称分布的各向同性和各向异性光散射<sup>[10]</sup>。图6是笔者所在小组拍摄的部分光散射照片,其中1表示两波相互作用产生的光散射,2是三波相互作用形成的光散射,3和4是四波相互作用形成的光散射。

除了上面介绍的情况之外,人们在BaTiO<sub>3</sub>晶体上还开展了有关高阶混频现象<sup>[11]</sup>、光学双稳现象<sup>[12,13]</sup>、弛豫过程等方面的研究,限于篇幅就不一一介绍了。

到目前为止,在BaTiO<sub>3</sub>晶体上已开展了广泛的研究,并且取得了不少进展,但是,对它的生长规律以及基本物理机制尚未完全搞清楚。现在,人们正力图建立比较完整的理论模型,对一些现象进行系统的解释,同时正在努力提高晶体性能,特别是提高它的响应速度以满足应用的要求。此外,人们也正在努力寻求

新的高质量光折变晶体。例如,最近对钾钠铌酸锶钡(Ba<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>K<sub>1-x</sub>Na<sub>x</sub>Nb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>)、铌酸铅钡(Pb<sub>0.6</sub>Ba<sub>0.4</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)、锗酸铋(Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>)铌酸钾(KNbO<sub>3</sub>)等材料有所研究<sup>[14]</sup>,期望能得到非线性特性强、响应速度快、块大质优的光折变晶体。但是到目前为止,还没有一种材料能代替BaTiO<sub>3</sub>。

[1] J. Feinberg and R. W. Hellwarth, *Opt. Lett.*, **5** (1980), 519; *Opt. Lett.*, **6**(1981), 257.  
 [2] J. Feinberg et al., *J. Appl. Phys.*, **51**(1980), 1297; *J. Appl. Phys.*, **52**(1981), 537.  
 [3] Jack Feinberg, *Opt. Lett.*, **7**(1982), 486; *J. Opt. Soc. Am.*, **72**(1982), 46; *Optical Phase Conjugation*, Academic Press, New York, (1983), 417.  
 [4] F. Laer et al., *Opt. Commun.*, **47**(1983), 387.  
 [5] D. Rak et al., *Opt. Commun.*, **49**(1984), 302.  
 [6] P. S. Brody et al., *Appl. Opt.*, **26**(1987), 220.  
 [7] A. M. C. Smont et al., *Opt. Commun.*, **59**(1986), 77.  
 [8] Y. Fainman et al., *Optical Engineering*, **25**(1986), 228.  
 [9] M. D. Ewbank et al., *Opt. Commun.*, **59**(1986), 423.  
 [10] Zhiguo Zhang et al., *Opt. Commun.*, **69**(1988), 66.  
 [11] Zhiguo Zhang et al., *Opt. Lett.*, **13**(1988), 9.  
 [12] S. Kwong et al., *Appl. Phys. Lett.*, **45**(1984), 1016.  
 [13] R. W. Eason et al., *Opt. Lett.*, **12**(1987), 51.  
 [14] R. R. Neurgaonkar et al., *J. Crystal Growth*, **84**(1987), 629.

## 欢迎订购物理学名词

本书收集了全国自然科学名词审定委员会公布的物理学名词。物理学名词审定委员会遵照全国自然科学名词审定委员会的审定原则,对本学科的科学概念进行汉语定名,同时附以相应的英文名以及汉文名的异名。全书收集了通类;力学、振动与波;热学;电学;光学;近代物理学;测量与误差七大部分 2491 条词,是基础物理学的基本词。

规范的物理学名词的公布对统一科技名词术语和国内外科技交流起着促进作用。全国自然科学名词审定委员会将陆续审定公布一整套自然科学名词。根据

国务院授权,全国自然科学名词审定委员会公布的名词术语,全国科研、教学、生产、经营以及新闻出版等部门均应遵照使用。本书是上述各部门工作人员必备的工具用书。

订购20本以上者,8.5折优待。预计七月初出书。道林纸本单价13.40元,报纸本单价7.30元

联系人:北京东黄城根北街16号名委办公室卢慧筠。

全国自然科学名词审定委员会办公室