

KTa_{1-x}Nb_xO₃ : Cu 晶体中直流空间电荷场的进一步研究*

杨昌喜 廉英武 叶佩弦 管庆才 王继扬

(中国科学院物理研究所, 北京 100080) (山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

提 要

分别用扩束光和一束写入光对 KTa_{1-x}Nb_xO₃ : Cu (x=0.32) 晶体中的光折变栅进行擦洗, 通过不同的擦洗效果, 进一步论证了在写入过程中除了形成周期分布的空间电荷场之外, 同时还形成了直流空间电荷场. 并对直流空间电荷场被擦洗的动态过程进行了详细研究. 此外, 在写入之前利用一束均匀光照射在外加电场作用下的 KTa_{1-x}Nb_xO₃ : Cu 晶体, 研究了直流空间电荷场的形成对衍射信号强度的影响.

关键词 光折变效应, KTa_{1-x}Nb_xO₃ : Cu 晶体, 电光效应.

1 引 言

由于光折变材料具有实时记录、重复记录的功能和对弱光具有很强的非线性响应, 因此在光学信息处理、光计算和激光器件等方面具有广泛的应用前景. 光折变机理方面的研究也受到人们的重视.

KTa_{1-x}Nb_xO₃ (KTN) 晶体是最早被发现具有光折变性质的晶体之一^[1]. 由于很难生长出光学均匀性好的 KTN 晶体, 对其光折变性质及机理的研究直到近几年才活跃起来^[2~7]. 作者曾对掺铜 KTN 晶体的光折变性质及机理进行过系统的研究, 掌握了 KTN 晶体的一些基本的光折变性质, 并对 KTN 晶体中的光折变过程有一个初步的认识^[5~7]. 根据光折变理论^[8], 周期分布的干涉光场在晶体中形成周期分布的空间电荷场, 周期分布的空间电荷场通过电光效应形成周期分布的折射率调制. 文献[6]提出了在外加电场作用下, 周期性光场作用于晶体, 在晶体中除了形成周期性空间电荷分布外, 在光照区边缘也会形成空间电荷堆积, 于是形成了直流空间电荷场. 本文对 KTN : Cu 晶体中直流空间电荷场的形成、擦洗和作用作了进一步研究. 这对进一步全面认识光折变效应可能会有一定的意义.

2 实验和结果

实验装置如图 1, 两束写入光 (w_r) 来自未经扩束的 Ar⁺ 激光, 并且强度相等, 它们的夹角平分线垂直于 KTN : Cu 晶体的晶面. 利用 He-Ne 激光作读出光 (w_r), 读出光 w_r 在布拉格角方

收稿日期: 1992年5月29日; 收到修改稿日期: 1992年8月24日

* 本课题得到国家科委基础性研究重大关键项目 No. 2 以及国家自然科学基金资助.

向产生衍射信号(w_s), 读出光强度非常弱, 对 KTN : Cu 晶体中的折射率栅几乎无擦洗作用, 其光束直径远小于写入光束的直径. 写入光和读出光均为非寻常光. KTN : Cu 晶体的尺寸为 $5.5 \text{ mm} \times 5.06 \text{ mm} \times 5.36 \text{ mm}$. 由山东大学晶体材料研究所提供, 居里点 $T_c = -24 \text{ }^\circ\text{C}$. 本文中所有测量均是在室温下, 因而是在晶体的立方相下进行的. 外加电场方向平行于 5.06 mm 边, 并与折射率栅的波矢平行. 利用光电二极管接收衍射光信号, 利用双笔 y-t 记录仪进行实时记录, 其中一支笔记录衍射信号随时间的变化, 另一支笔监测读出光强度. 电子快门用以控制擦洗时间.

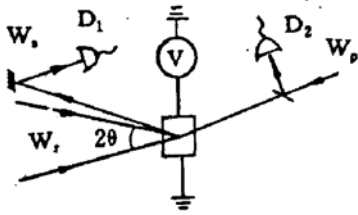


Fig. 1 Experimental setup,

w_r — writing beams from an Ar^+ laser. w_r — reading beam from a He-Ne laser. w_s — diffraction beam generated by reading beam, $2\theta = 20^\circ$

首先在写入光强 $I_w = 142 \text{ mW/cm}^2$, 外加电场 $E_w = 3.38 \text{ kV/cm}$ 的条件下进行写入实验, 衍射光经历上升和下降过程后达到稳态^[5]. 记下达到最大值时的衍射光光强. 然后, 挡住二束写入光, 关掉外加电场, 停止写入过程. 接着开始擦洗, 在擦洗过程中, 实时探测衍射信号. 先用扩束光照射晶体(亦即进行擦洗), 扩束光截面远大于写入光截面, 并且大于晶体截面. 用以产生扩束光的透镜焦距 $f = 10 \text{ cm}$. 晶体位于透镜 3 倍焦距处, 单位面积上的功率为 142 mW/cm^2 , 与写入光单位面积上的功率相同. 当擦洗约 2min 后, 衍射光强下降为零. 此后, 停止擦洗, 重新开始写入实验, 写入光强和外加电场与上次写入过程相比都没有改变, 这时衍射光同样经历了由上升到下降的过程, 记下衍射光强最大值. 发现虽然这次写入所用写入光强和外加电场与前次相同, 但这次的衍射光强最大值不同于前一次(较前次小). 利用强扩束光($\sim 1 \text{ W/cm}^2$) 照射晶体 7 min, 将晶体擦洗“干净”(见后面讨论). 以后多次重复上述实验步骤, 但每一次的擦洗时间不同, 即在保证擦洗到衍射光强下降到零的条件下逐渐增加擦洗时间. 于是, 得到了一组衍射光强最大值随擦洗时间的变化关系, 如图 2 中的实心三角形所描述的规律. 然后, 再按上述方法进行写入、擦洗、重新写入、记下衍射光强最大值的多次过程, 但是, 这一组实验的每次写入光强和外加电场的数值虽然都是相同的(并且同于前一组实验), 但重新写入时的外加电场方向与前一次写入时的外加电场方向相反. 这样, 也测得了另一组衍射光强最大值随擦洗时间的变化关系, 如图 2 中的实心方块所描述的规律. 很明显看出, 对这两组不同的实验, 这种变化关系是不同的. 然后, 又进行了与上述两组实验相似的另两组实验. 其条件和步骤几乎与前两组完全相同, 只是不用扩束光去擦洗, 而是用两束写入光中的一束去擦洗, 这束写入光单位面积上的光功率与那束扩束光单位面积上的光功率相同. 图 3 是这后两组实验测得的衍射光强最大值随擦洗时间的变化关系. 其中实心三角形对应的一组, 是每次写入时外加电场不仅大小相同而且方向也相同的情况; 实心方块对应的一组, 是相邻两次写入所加外电场大小相等方向相反的情况. 可以看出, 这两组实验的衍射光强最大值随擦洗时间的变化要比前两组实验的衍射光强最大值随擦洗时间的变化缓慢得多. 另外, 实心方块对应的那组的衍射光强最大值总是大于实心三角形对应的那组.

接着又进行了如下实验, 在外加电场 $E_w = 3.38 \text{ kV/cm}$ 作用下, 先用一束写入光作用于晶体一段时间, 然后再打开另一写入光束, 进行写入过程, 可以看到实时监测的衍射光同样经历

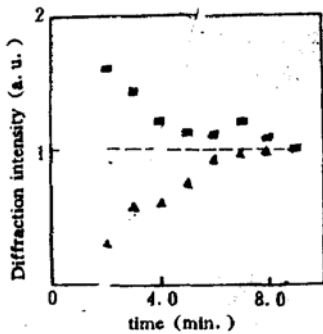


Fig. 2 The maximum of diffraction intensity during rewriting versus erasing time with an expanded beam

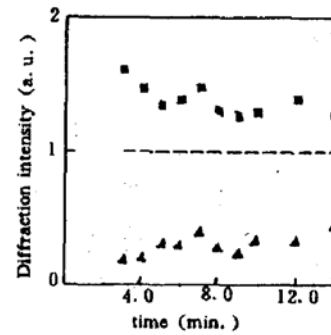


Fig. 3 The maximum of diffraction intensity during rewriting versus erasing time with one of the writing beams

了由上升到下降最后达到稳定的过程,记下衍射光的最大值.然后利用强扩束光($\sim 1 \text{ W/cm}^2$)照射晶体 7 分钟左右,将晶体擦洗干净.以后多次重复这一实验步骤,但每一次先用一束写入光照射晶体不同时间,从实验中发现当照射时间不同时,衍射光强最大值也不同.本文测得了衍射光强最大值随先用一束写入光照射晶体时间之间的关系,如图 4 所示.可以看出,随着这种照射时间的增加,衍射光强最大值逐渐变小,最后几乎趋向于零.在出现这种衍射光最大值几乎为零的状态时,紧接着用强度为 142 mW/cm^2 的扩束光擦洗一段时间,然后同时打开两束写入光进行写入,其条件均与前面所有写入过程中的条件相同,衍射光同样经历上升下降最后达到稳态的过程,记下相应的衍射光强最大值.改变扩束光擦洗时间,重复上述实验步骤,便获得衍射光强最大值与扩束光擦洗时间的关系,如图 5 所示.可以看出,随擦洗时间的增长,衍射光强最大值增大直到饱和.

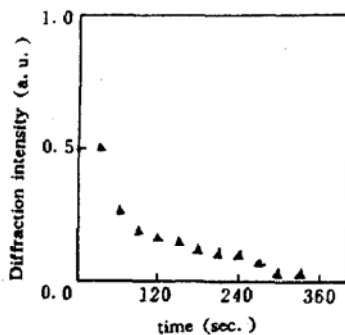


Fig. 4 The maximum of diffraction intensity versus the irradiating time with one of the writing beams under an applied electric field before writing

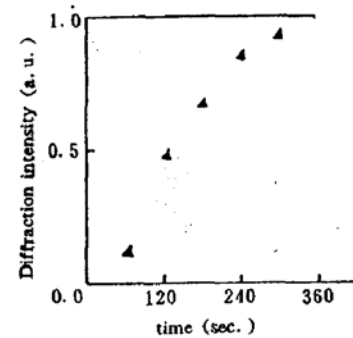


Fig. 5 The maximum of diffraction intensity versus the erasing time with an expanded beam before writing when the saturated DC space-charge field is formed

3 分析和讨论

作者曾经论证了在 KTN:Cu 晶体中在有外加电场作用下进行写入时,不仅会形成周期性的空间电荷场,而且由于光激发载流在光斑边缘的堆积也会形成与外加电场方向相反的直流空间电荷场^[6].本文的实验结果进一步证实了这一物理模型.事实上,如果这一物理模型成

立,而且在同样擦除光强作用下直流空间电荷场衰减速率远小于周期性空间电荷场的衰减速率,则本文的实验结果都可以得到满意的定性解释.

对于立方结构的光折变晶体,衍射效率与光折变栅的振幅 δn 的平方成比例,光折变栅的振幅由下式给出^[2,5]

$$\delta n = n^3 g (\epsilon - 1)^2 \epsilon_0^{-1} \epsilon_{sc} E_r^2$$

其中 n 、 g 、 ϵ 、 ϵ_{sc} 分别是晶体的折射率,电光系数,晶体的静态介电常数,周期性空间电荷场的振幅; E_r^2 则是读出时作用于光折变栅的有效直流电场.当存在感生的直流空间电荷场 E_s 时, $E_r^2 = E_r + E_s$,其中 E_r 是读出时的外加电场.因此,在读出光强度一定的情况下,衍射光强度既与周期性空间电荷场的振幅有关,也与外加电场及直流空间电荷场有关.

首先来解释图 2 的实验结果,在一定的外加电场 E_w 的作用下完成了写入过程后,原来已完全“擦洗干净”的晶体将形成一定大小的周期性空间电荷场和一定大小的直流空间电荷场.前者来自光斑作用区内载流子的空间分布,后者来自载流子在光斑边缘的堆积.当用光斑大于晶体尺寸的扩束光进行擦洗(照射)时,周期性空间电荷场和直流空间电荷场都要逐渐衰减.但后者衰减的速率比前者小得多.当擦洗到衍射光强下降为零的时刻,无疑也是周期性空间电荷场消失的时刻.但此时晶体内的直流空间电荷场仍然存在,并且没有经历很大的衰减.如果紧接着开始重新写入,作用于晶体的电场将不仅仅是外加电场 E_w ,而是 $E_w + E_s$.因为直流空间电荷场 E_s 与写入时形成 E_s 的外加电场反向,所以当重新写入时的外加电场的大小和方向均与上一次写入时的外加电场的大小和方向相同时,则作用于晶体的写入电场将要比上一次写入时的电场小.衍射光强的最大值,也比前一次的小^[5].与实验结果相符.当逐渐增加擦洗时间,直流空间电荷场逐渐衰减,重新写入时的写入电场就逐渐趋向于外加电场,而衍射光强的最大值也就逐渐增加,最后趋近于晶体处于“干净”状态写入时的数值(图 2 中的水平虚线),这正是图 2 中实心三角形的趋向.从这个趋向还可以估计直流空间电荷场的擦洗速率.和上面的分析相类似,当重新写入时的外加电场和前一次写入的外加电场大小相等方向相反时,作用于晶体的写入电场将比上一次写入时大.重新写入时衍射光强最大值也就比前一次的大.当增加擦洗时间,直流空间电荷场逐渐衰减,它在重新写入时起的作用也就逐渐变小,重新写入时的写入电场便逐渐与外加电场相等,因而衍射光强的最大值也就逼近于图 2 中的水平虚线.这正是图 2 中实心方块所描述的趋势.

如果不是用扩束光,而是用其中一速写入光进行擦洗,那么只有写入束光斑内的周期性空间电荷场受到有效擦洗,而由该光斑边缘的载流子堆积形成的直流空间电荷场将受不到有效的擦洗.尽管延长擦洗时间,直流空间电荷场衰减仍然很小.所以,当重新写入的外加电场和原来的外加电场同(反)方向时,重新写入电场将比外加电场小(大),而且其大小随擦洗时间增长衰减非常缓慢,重新写入时衍射光强最大值也将比前次写时小(大),并且随擦洗时间变化而变化得很缓慢,如图 3 实验心三角形(实心方块)所示.

下面对图 4 的实验结果进行解释.在写入之前在外加电场作用下用一束写入光照射晶体,也会在光斑边缘形成光激发载流子的堆积而产生直流空间电荷场.在写入之前这样照射的时间愈长,形成的直流空间电荷场就愈大.由于直流空间电荷场的方向与外加电场方向相反,所以当开始写入时写入电场就小于外加电场,而且这样照射的时间愈长,写入电场就愈小.结果,衍射光强最大值也就随照射的时间增长而下降.这正是图 4 中实验点所描述的趋势.当照射的时间很长,以至所形成的直流空间电荷场几乎等于外加电场值时,衍射光强也就几乎趋近于零.此时,如果进行图 5 所描述的实验,即用扩束光进行逐渐增加时间的擦洗,然后进行写入,

则由于直流空间电荷场也逐渐变小,写入电场也就逐渐增大,衍射光强最大值也就逐渐增大.

结论 本文通过几个实验进一步论证了 $\text{KTN} : \text{Cu}$ 晶体在写入过程中同时形成直流空间电荷场的模型,揭示了在光折变的一些实验现象中它所起的不可忽视的作用,此外,这些实验也为研究直流空间电荷场的形成和擦洗规律提供了新的途径.

参 考 文 献

- [1] F. S. Chen, J. E. Geusic, S. K. Kurtz *et al.*, Light modulation and beam deflection with potassium tantalate-niobate crystals. *J Appl. Phys.*, 1966, **37**(1) : 388
- [2] A. Agranat, V. Leyva, A. Yariv, Voltage-controlled photorefractive effect in paraelectric $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 : \text{Cu}$, *V. Opt. Lett.*, 1989, **18**(14) : 1017
- [3] V. Leyva, A. Agranat, A. Yariv, Determination of the physical parameters controlling the photorefractive effect in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 : \text{Cu}$, *V. J. Opt. Soc. Am.*, 1991, **B8**(3) : 701
- [4] Huimin Liu, R. C. Powell, L. A. Boatner, Origin of picosecond-pulse-induced, degenerate four-wave-mixing signals in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystals. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(1) : 20
- [5] Changxi Yang, Dadi Wang, Peixian Ye *et al.*, Photorefractive diffraction dynamic during writing in paraelectric KTN crystals. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(2) : 106
- [6] Changxi Yang, Dadi Wang, Peixian Ye *et al.*, Internal electric field and diffraction dynamics during reading in photorefractive $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 : \text{Cu}$ crystals. *Submitted to Opt. Lett.*,
- [7] Qincui Guan, Jiyang Wang, Wang Min *et al.*, Photorefractive properties of paraelectric copper doped potassium tantalate niobate. *Chinese Phys. Lett.*, 1991, **18**(10) : 515
- [8] P. Günter, Holography, Coherent light amplification and optical phase conjugation with photorefractive materials. *Phys. Rev.*, 1982, **93**(4) : 199

Further studies of DC space-charge field in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 : \text{Cu}$ crystals

YANG Changxi LIAN Yingwu YE Peixian

(*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

GUAN Qingcai WANG Jiyang

(*Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100*)

(Received 29 May 1992; revised 24 August 1992)

Abstract

The photorefractive grating in a $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 : \text{Cu}$ ($x = 0.32$) crystal was erased with an expanded beam and one of the writing beams, respectively. Through the different erasing effects, it was further demonstrated that besides a periodic space-charge field a DC space-charge field was formed simultaneously during writing. Meanwhile the dynamics of erasing a DC space-charge field was also studied. In addition, by irradiating $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 : \text{Cu}$ crystal with one of the writing beams under an applied electric field before writing, the influence of the formation of DC space-charge field on the diffraction intensity was investigated.

Key words photorefractive effect, $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3 : \text{Cu}$ crystal, electro-optic effect.