

外加电场对掺杂 KNSBN 晶体 空间电荷场的影响

孙万钧 周忠祥 姜永远 李焱 许克彬

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

祝桂芝

(大连铁道学院物理教研室, 大连 116022)

(1995 年 2 月 20 日收到; 1995 年 4 月 12 日收到修改稿)

利用掺铈 KNSBN 晶体, 在 633 nm 下观察和测试了外加电场对晶体内部空间电荷场的基频和高阶分量的记录和擦除特性的影响, 并对所得实验结果进行了分析.

PACC: 4240; 4270G; 7820; 8140T

1 引言

近年来, 光折变效应及其各种应用, 已被广泛研究, 这一效应是由于空间调制的光场激发了光折变材料中的载流子(电子、空穴), 这些载流子通过扩散或漂移, 最后被深能级所俘获, 在材料中形成空间电荷场, 而这一电荷场又通过线性电光效应导致折射率的空间调制分布. 描述这一过程的最成功的理论是 Kukhtarev 等提出的带导模型^[1], 在这一模型中, 一组非线性微分方程给出并用于描述空间电荷场的建立, 进而给出由电光效应引致的折射率变化. 遗憾的是这组非线性耦合方程一直无法得到严格的解析解, 因而对应于不同特殊情况的各种近似解法陆续被提出, 其中最普遍采用的一种近似条件是当入射的光场是一维正弦空间分布, 即

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(K_g x) \\ &= I_0[1 + m \cos(K_g x)]. \end{aligned}$$

假定条纹的调制深度 $m \ll 1$, 使此组非线性微分方程线性化并导致一阶光栅近似, 即在光折变材料中只有与光场干涉花样具有相同频率 K_g 的正弦位相光栅存在. 由此而得到的空间电荷场的解析解是材料和光栅参数以及外界条件(例如入射光强和施加于材料上的外电场等)的函数. 当 $m \ll 1$ 时, 此结果严格适用, 即使当 $m \approx 0.5$ 时, 它也比较精确. 然而当调制深度 m 再大时, 材料的非线性响应增强, 即空间电荷场中谐波分量的作用不容忽略, 例如二波耦合中增益对入射光强比的依赖性就不能用线性模型解释, 其他一些涉及利用 $m \approx 1$ 的应用同样需要对所得实验结果给以恰当地解释并能预言光折变器件的真实性能, 甚至使之获得新的应用. 因此近几年来, 有关光折变材料非线性响应的理论研究被广泛注意, 包含一些特殊情况(如稳态、极弱响应、施加强外电场等)的数值解或利用微扰展开的近似解法陆续发表^[2-5]. 在实验工作方面, Lee 等^[6]利用 $\lambda = 515$ nm 在一维正弦调制

光场照射下, 测量了 p 型 BaTiO₃ 晶体稳态时其空间电荷场的基频和两高阶分量的幅度。Temple 等^[7]报道了 BaTiO₃ 晶体中体位相光栅的前三阶傅里叶分量的擦除过程。Serrano 等^[8]以 BSO 晶体为例测试了 $m \approx 0.9$ 时记录和擦除时光栅基频和高阶分量的动力学特性, 同时指出了施加直流外电场对其特性的影响。本文利用掺铈 KNSBN 晶体, 在 $\lambda = 633$ nm 时观察与测试了外加电场对其空间电荷场的基频和高阶分量的记录和擦除特性影响, 并对所得结果进行了分析。

2 实验结果

利用 Ce:KNSBN 晶体, 其尺寸为 0.4 cm × 0.4 cm × 0.5 cm, 来自同一 He-Ne 激光器的两近似等光强光束 ($m \approx 1$) 以 $2\theta = 3.4^\circ$ 对称入射到晶体上, 其偏振方向平行于入射平面。在置于晶体后面的屏上, 首先观察到两透射光斑, 稍后增加到四个光斑, 由于自衍射的存在, 实际上每一透射光斑的强度都是由一光束的 n 级和另一光束的 $n+1$ 级或 $n-1$ 级所贡献。当沿晶体的极化方向施加电场(称正向电场)时, 由低阶到高阶陆续出现更多衍射光斑。当入射总功率 $I_0 = 16-17$ mW 时, 肉眼即可观察到 10 个衍射光斑, 这表明至少 $n = 4$ 级衍射也具有相当的强度水平。从 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ 的各级衍射强度随记录时间变化的动力学过程中可观察到如下特点:

1) 施加正向电场使高阶分量衍射加强, 因而可观察到更多高阶衍射光斑。但高阶衍射分量显示出一视觉上的初始的时间滞后, 随着级次的增高, 这一滞后时间加长。各阶分量随时间演化的过程呈现脉动特征, 在同一外加电场下, 高阶分量相对脉动幅度较大, 如图 1 所示。

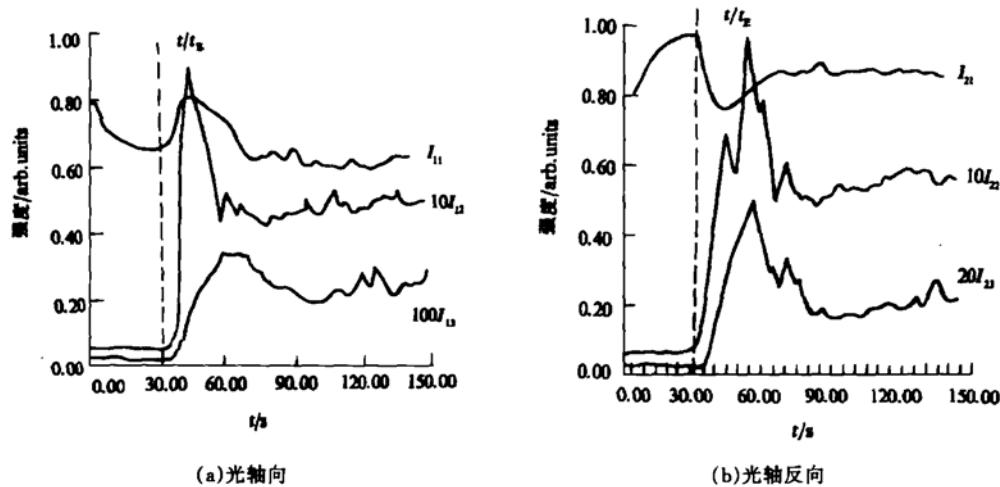


图 1 记录过程中 $n = 1, 2, 3$ 阶衍射强度的动态特性, 在 $t = t_E$ 时加直流电场 $E = 5500$ V/cm

2) 达到稳态时, 随着正向电场的增加, 空间电荷场的各级傅里叶分量(与相应级的衍射效率的平方根成正比)亦增加, 当 $E \approx 7000$ V/cm 时, 基频分量已呈现饱和趋势, 高阶分

量呈增加趋势,如图 2 所示。

3) 法线两侧对应级次的衍射效率明显不等,位于光扇一侧的衍射级次较强,可参考图 2. 当施加反向电场如 $E \approx 4000 \text{ V/cm}$ 时,光轴向的衍射级次加强。

4) 当挡住一束记录光,用另一束擦除时,在初始阶段对高级均观察到明显的衍射自增强现象,如图 3 所示,级次越高,衍射自增强越显著,对第 2 级,当 $E = 5000 \text{ V/cm}$ 时,衍射效率由 6.24% 提高到 11.38%;对于第 3 级衍射效率由 1.14% 提高到 3.42%. 电场的存在使记录光栅的擦除速率明显减慢。

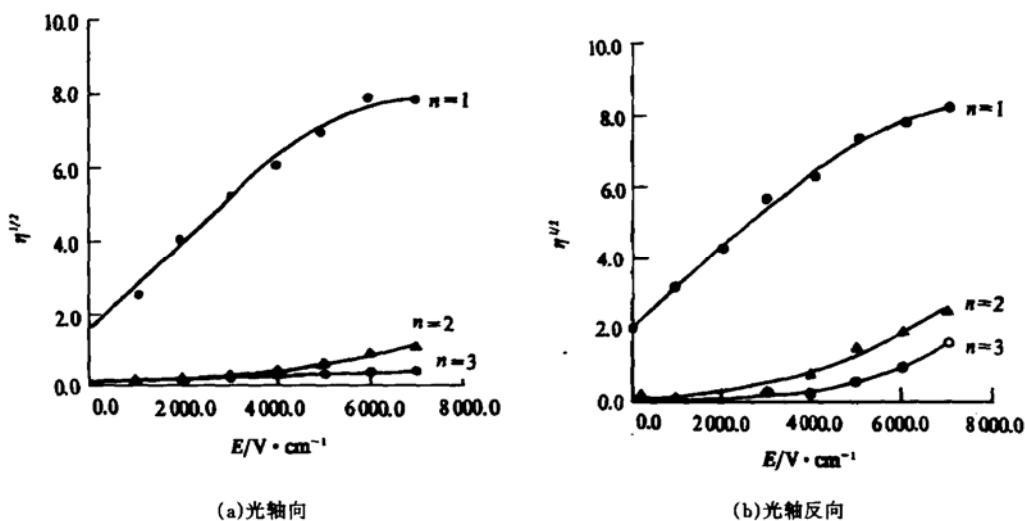


图 2 空间电荷场各阶分量随外加直流电场变化关系

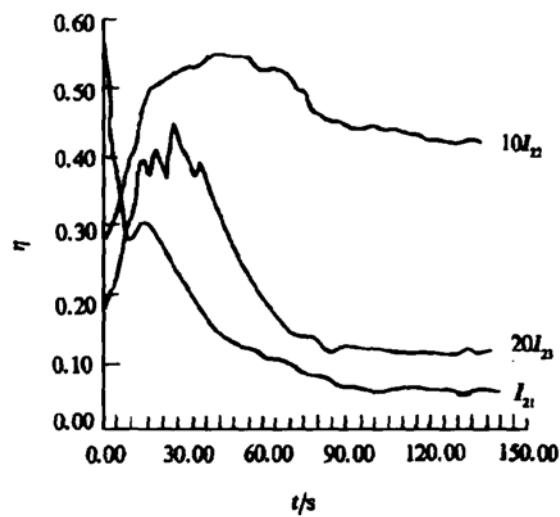


图 3 光轴反向 $n = 1, 2, 3$ 阶衍射分量的衰减特性 $E = 5500 \text{ V/cm}$

3 分析与讨论

有关大调制深度下,材料的非线性光折变响应的理论研究,Vachss 等^[9]采用一种非微扰方法于带导模型,当扩散场可忽略时,给出了非光伏材料非线性响应产生的稳态空间电荷场的谐波分量表示式

$$e_n = (-1)^n e_A f(n, e_A, m)$$

式中 $e_n = \frac{E_n}{E_q}$, $e_A = \frac{E_A}{E_q}$, E_n 为空间电荷场的第 n 级傅里叶分量, E_A 为方向与光栅矢量平行的外加电场, E_q 为材料中响应电场可达到的最大值(饱和场),函数 $f(n, e_A, m)$ 的数值随 n 或 e_A 的增加或 m 的减小而减小,其具体函数形式与 $R = \frac{N_A}{N_D}$ 有关,其中 N_A 为带负电的受主密度, N_D 为施主总密度.

根据光折变效应的动力学理论,饱和场 $E_q = \frac{eN_{\text{eff}}\Lambda}{2\pi\epsilon\epsilon_0}$, 扩散场 $E_D = \frac{2\pi kT}{\Lambda e}$, 其中 k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, Λ 为光场干涉条纹间距, e 为载流子电荷, N_{eff} 为有效光折变电荷密度.在我们的实验条件下,由于掺杂 KNSBN 晶体中光激发载流子主要是电子, N_{eff} 约为 10^{16} cm^{-3} 级次.当 $2\theta = 3.4^\circ$ 时,可求得 $E_D \approx 1.52 \times 10^2 \text{ V/cm}$, $E_q \approx 10^4 \text{ V/cm}$.当 m 和 E_A 不变时,空间电荷场高阶分量的幅度随级次 n 的升高而降低以及高阶衍射分量出现的视觉时间滞后均可由 $f(n, e_A, m)$ 随 n 变化的函数关系定性说明.

由光折变效应的动力学理论可知,在一級光栅近似下,外加直流电场使空间电荷场沿电场方向发生运动并呈衰减波形式^[10],此衰减波的振幅随外加电场的增加而增加,随时间的增长而趋于零.对各级衍射分量的测量结果表明,在它们趋于稳态的时间演化过程中均显示出不稳定性,这种不稳定性随外加电场的增加而加剧,高阶较基频显著.各级空间电荷场的幅度随外加电场的变化关系与 Vachss 等给出的 $R = 0$ 和 $R = 1$ 的理论结果也不完全符合,实验中所施加的最大场强 $E_{\text{max}} \approx 7 \times 10^3 \text{ V/cm}$, 相当于 $e_A = \frac{E_A}{E_q} < 1$ 的情况,但对空间电荷场的高阶分量未见任何饱和迹象.产生上述差别的原因,除掉理论分析的一些先决条件不能完全满足外,晶体中基频与高阶分量之间的耦合作用、光致散射的影响等均未考虑,事实上我们在记录过程中已观察到由各向同性散射所形成的光环链,这说明了各阶分量之间确实存在耦合.由各阶分量的时间演化中可以看出,对于 I_{11} (0, 1 级)和 I_{21} (0, -1 级)当 $t = 0$ 时, $I_{11} = I_{10}$, $I_{21} = I_{20}$, 即只有一束光入射到晶体上,当 $0 < t < t_E$ 时两束光入射晶体,则 I_{11} 减少而 I_{21} 增加,这是 I_{11} 和 I_{21} 之间耦合发生稳态能量转移的结果.当 $t > t_E$,即开始施加直流电场,这时由于光栅与干涉条纹之间暂时的位相失配, I_{11} 和 I_{21} 之间发生瞬态能量转移,这种能量转移的方向总是从强光到弱光,因而 I_{11} 增加 I_{21} 减少,直到逐渐趋于稳态.直流电场的施加有效地提高了空间电荷场高阶傅里叶分量的幅度,各阶分量演化的非稳定性与它们之间的耦合、竞争的复杂相互作用有关,也与光致散射有关,因而随外加电场的增强而加剧.施加反向电场可测得类似的规律,只要反向电场不足以破坏晶体的单畴性.

观察并测得的法线两侧对应级次的衍射效率明显不等,我们认为这是晶体光折变光致散射的不对称性影响所致.在一级光栅近似下,对这一现象的理论分析和实验测量已作报道^[11].对于掺杂 KNSBN 晶体,当一束非常光入射其上时,通常可观察到朝向光轴反向的各向同性光扇,随着正向电场的增加可使光扇增强,而反向电场的施加使光扇减弱,因而有利于光轴向一侧的散射光对相应衍射级次的贡献.

在擦除初始阶段的衍射自增强现象是起源于入射擦除光与其各阶衍射光之间的耦合形成瞬态能量转移,这种能量转移的方向总是由强光到弱光,因而各高级衍射光均有自增强现象,如图 3 所示.实验结果表明,外加电场越强,衍射自增强越强.在同一外加电场下,高阶分量较低阶分量的衍射自增强显著,这些都进一步证实了瞬态能量转移的机制分析是正确的.Serrano 等^[8]给出的 BSO 晶体在外加电场 $E_A = 5 \times 10^3 \text{ V/cm}$ 下的擦除曲线(数值解)中,基频分量在擦除后期呈振荡特征.我们的实验结果表明基频分量也具有微弱的振荡.由于衍射自增强的存在,各级分量的擦除速率显著变慢.而且只要外加电场存在,空间电荷场不能完全被擦除,较长时间后仍保持较高的衍射效率数值,这表明外加电场在一定程度上具有固定作用,尚待进一步分析.

4 结 论

本文给出了当 $m \approx 1$ 时,外加电场对掺杂 KNSBN 晶体空间电荷场影响的实验结果及记录和擦除的动力学特性.结果表明外加电场进一步增强了材料的非线性光折变响应,即使空间电荷场的高阶傅里叶分量增强.对所得到的记录过程的动力学特性进行了分析,指出各阶分量之间的耦合对空间电荷场的形成具有重要影响.首次观察并测量了法线两侧对应级次衍射效率的不对称性,指出其源于光折变光致散射的不对称性.首次观察并测量了空间电荷场高阶分量的衍射自增强,指出这是入射光与其各级衍射光之间耦合造成瞬态能量转移的结果,随着外加电场和衍射级次的增加,衍射自增强更加显著,因此空间电荷场高阶分量的擦除速率明显减慢.

本文工作所用 KNSBN 晶体由山东大学晶体研究所姜全忠和陈焕臺两位老师提供,作者深表感谢.

- [1] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov, M. S. Soskin and V. L. Vinetskii, *Ferroelectrics*, **22**(1979), 949.
- [2] M. G. Moharam, T. K. Gaylord, R. Magnusson and L. Young, *J. Appl. Phys.*, **50**(1979), 5642.
- [3] T. J. Hall, R. Jaura, L. M. Connors and P. D. Feete, *Prog. Quantum Electron.*, **10**(1985), 77.
- [4] E. Ochoa, F. Vachss and L. Hesselink, *J. Opt. Soc. Am.*, **A3**(1986), 181.
- [5] A. Bledowski, J. Otten and K. H. Ringhofer, *Opt. Lett.*, **16**(1991), 672.
- [6] Y. H. Lee and R. W. Hellwarth, *J. Appl. Phys.*, **71**(1992), 916.
- [7] D. A. Temple and C. Warde, *J. Opt. Soc. Am.*, **B3**(1992), 1800.
- [8] E. Serrano, V. Lopez, M. Carrascosa and F. Agullo-Lopez, *J. Opt. Soc. Am.*, **B11**(1994), 670.
- [9] F. Vachss and L. Hesselink *J. Opt. Soc. Am.*, **A5**(1988), 690.
- [10] 刘思敏、郭 儒、凌振芳,光折变非线性光学(北京:中国标准出版社,1992),25 页.
- [11] Zhou Zhong-xiang, Sun Wan-jun, Sun Xiu-dong, Zhao Hua and Xu Ke-bin, *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, **4**(1995), 420.

EFFECTS OF AN APPLIED ELECTRIC FIELD ON THE SPACE-CHARGE FIELD IN THE DOPED KNSBN CRYSTAL

SUN WAN-JUN ZHOU ZHONG-XIANG JIANG YONG-YUAN LI YAN XU KE-BIN

(*Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

ZHU GUI-ZHI

(*Dalian Railway College, Dalian 116022*)

(Received 20 February 1995; revised manuscript received 12 April 1995)

ABSTRACT

The effects of an applied electric field on the recording and erasing characteristics of the fundamental and higher-order harmonics of the space-charge field inside the crystal are observed and measured at wavelength of 633 nm with a Ce-doped KNSBN crystal. The experimental results obtained are analyzed and explained.

PACC: 4240; 4270G; 8720; 8140T