

双光束入射下掺杂 KNSBN 晶体的 各向异性锥形衍射*

姜永远 周忠祥 李 焱 孙秀冬 孙万钧 许克彬

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

万秋玉

(哈尔滨理工大学物理系, 哈尔滨 150080)

摘 要 利用掺杂 KNSBN 晶体, 报道了两束异常偏振光所引起的各向异性锥形衍射现象。首次观察到一种由三个衍射光锥所组成的各向异性衍射图样, 并且提出了由入射光和满足相位匹配条件的前向散射光所参与的光折变四波混频机制。对双光束对称入射这种特殊实验配置情形, 给出了衍射光锥的锥角随入射角的变化关系式, 理论分析和实验结果符合得很好。

关键词 掺杂 KNSBN 晶体, 各向异性锥形衍射, 光折变四波混频。

1 引 言

一束线偏振的激光束照射到光折变晶体上, 入射光和晶体中由不均匀性所引起的同样偏振的散射光相互作用, 并实时读出, 结果产生了不同形式的各向同性^[1~4]或各向异性^[5~13]光衍射。各向异性锥形衍射现象已在 BaTiO_3 ^[5~10], $\text{LiNbO}_3 \cdot \text{Fe}$ ^[11, 12], 掺杂 KNSBN^[13] 等光折变晶体中观察到, 其物理机制主要为光折变多波混频。Ewbank 等^[5], Temple 等^[9], Rupp 等^[10] 利用单光束照射 BaTiO_3 晶体, 分别在晶体 C 轴垂直于入射面和平行于入射面两种实验配置情形下, 观察到了各向异性锥形衍射现象, 并利用光折变三波混频理论进行了机理分析。这种衍射实际上是一种各向异性自衍射过程^[9]。Qiu 等^[7] 利用 BaTiO_3 晶体, 刘思敏等^[12] 利用 $\text{LiNbO}_3 \cdot \text{Fe}$ 晶体薄片, 分别在单光束入射和双光束对称入射时, 观察到一种由环和双曲线所组成的各向异性衍射图样, 并利用入射光、晶体后表面的反射光及散射光之间相互作用的多波混频理论解释了所观察到的实验现象。另外, 据 Ewbank 等^[5] 的报道, 为在 BaTiO_3 晶体中产生多个衍射环, 可采用多光束同时入射的方法。他们指出: 双光束同时入射时应产生四个衍射环——每束入射光都经由各向异性自衍射过程而产生其自身的衍射环; 另外, 每束入射光都会对另外一束入射光与其散射光所产生的噪音栅进行布拉格各向异性衍射读出, 从而产生另外两个衍射环。本文利用掺杂 KNSBN 晶体, 分别在晶体 C 轴垂直于入射面和平行于入

* 山东大学晶体材料研究所开放实验室基金资助项目。

收稿日期: 1995年11月26日

射面两种实验配置情形下，观察了两束异常偏振光以任意角度入射时的各向异性衍射图样，结果发现了一种由三个衍射光锥所组成的各向异性衍射图样，并且提出了由入射光和满足相位匹配条件的前向散射光所引起的光折变四波混频各向异性光衍射机制。对于双光束对称入射这种特殊实验配置情形，本文给出了衍射光锥的锥角随入射角的变化关系式，理论分析和实验结果符合得很好。

2 实验与结果

实验采用 He-Ne 激光为光源 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)，样品为 Ce·KNSBN 晶体，其尺寸为 $0.4 \times 0.4 \times 0.5 \text{ cm}^3$ ，在双光束以任意角度入射下，分别观察了晶体 C 轴垂直于入射面和平行于入射面情形下由光致散射所引起的各向异性衍射现象。

实验光路如图 1 所示。He-Ne 激光束经由半波片调整以保证其为异常偏振光，再由分束镜分成两近似等光强的光束 ($I_1, I_2 \approx 10 \text{ mw}$)，分别以 θ_1, θ_2 的角度入射到 Ce·KNSBN 晶体上。观察屏置于晶体后面，用于观察衍射图样。为了鉴别衍射光的偏振特性，将检偏镜置于晶体和观察屏之间。实验观察到的结果如下：



Fig. 1 Schematic diagrams of the polarization directions of the incident beams

1) 单独一束光入射时，在观察屏上只有一衍射环出现，如图 2 照片中的环 I 或环 II，其偏振方向与入射光的偏振方向是正交的。该环略呈椭圆形状，作者认为，这是由于产生它的入射光相对于晶体和观察屏来说是倾斜入射的，这点与文献[6]的报道结果是一致的。

2) 光束 I_1 单独入射时，在观察屏上只有环 I 存在，这时关闭光束 I_1 而让光束 I_2 单独照射晶体，发现在观察屏上环 I 马上消失，同时衍射环 III 出现。随着时间的推移，衍射环 III 逐渐模糊至消失，而衍射环 II 逐渐出现且渐趋清晰稳定。上述过程反之亦然。形成环 III 的衍射光的偏振方向总是与入射光的偏振方向正交。

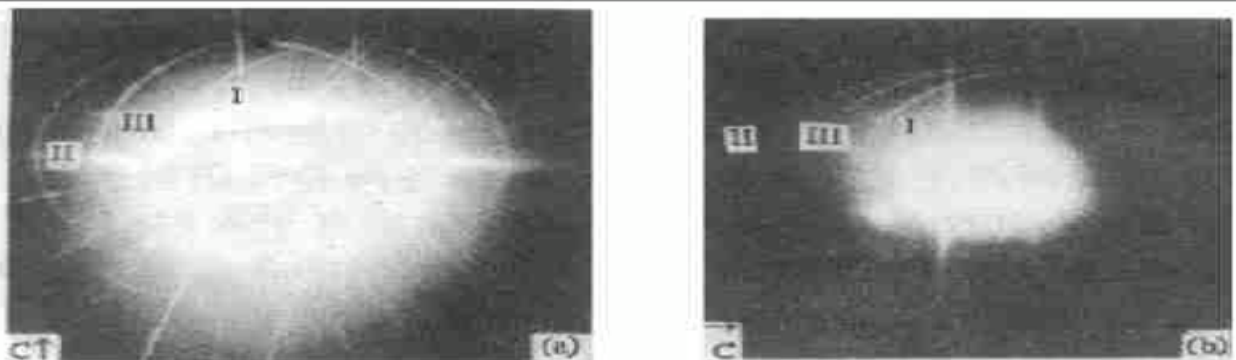


Fig. 2 The rings of the anisotropic diffraction with $2\theta \approx 10^\circ$

3) 两入射光束同时对称或非对称照射时，只有三个衍射环同时出现在观察屏上。入射光夹角在相当大的范围内变化时，都可观察到上述现象。入射光束的功率对衍射图样的形状没

有影响,但是它影响到衍射环的强弱。当入射光束之间存在较明显的能量竞争时,环 I, II 亦分别呈现明显的明暗交替变化过程,但在上述过程中未观察到环 III 强度的变化。

4) 所有衍射环都在观察屏与包含 C 轴的平面相交处出现间断点,这表明各向异性衍射在上述区域是被禁止的,其原因在文献[7]中已经给出了详细的解释。

5) 双光束对称入射时,衍射环 III 在晶体外的锥角对于晶体 C 轴平行于入射面时和晶体 C 轴垂直于入射面时略有不同。

6) 在上述两种实验配置情形下,对 $Mn \cdot KNSBN$ 晶体在 He-Ne 激光 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 照射下, $Cu \cdot KNSBN$, $Co \cdot KNSBN$ 晶体在 Ar^+ 激光 ($\lambda = 514.5 \text{ nm}$) 照射下的各向异性锥形衍射现象作了详细的观察,得到了类似的实验结果。

3 机理分析与讨论

作者认为上述的各向异性锥形衍射现象是由光折变多波混频所产生的。入射光与其自身的散射光相干涉,在晶体中产生了具有多种光栅矢量的复合相位光栅,再将读出光(入射光本身或另外一束入射光)衍射到特定的方向上,从而产生了各向异性锥形衍射现象。图 2 中的衍射环 I, 环 II 实际上是由各向异性自衍射过程产生的,这已在文献[9]中得到了圆满的解释,本文不再赘述。衍射环 III 是一种新观察到的各向异性锥形衍射现象。作者认为衍射环 III 是由晶体内的入射光及其散射光之间的四波混频相互作用的结果,其波矢图如图 3 所示。 k_1, k_2 分别表示在晶体内的两束入射光的波矢, k_s 和 k_d 分别表示散射光和衍射光的波矢。诸

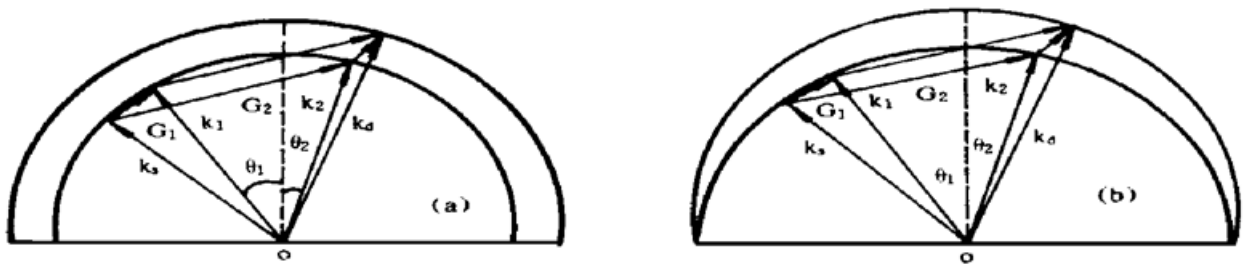


Fig. 3 Wave-vector diagrams for phase matching condition: (a) the c -axis is perpendicular to the incident plane case, and (b) the c -axis is parallel to the incident plane case

波矢必须满足的相位匹配条件是:

$$k_d = (k_1 - k_s) + k_2 = G_1 + k_2 \quad (1)$$

$$k_d = (k_2 - k_s) + k_1 = G_2 + k_1 \quad (2)$$

从方程(1)、(2)可以得到

$$k_d = k_1 + k_2 - k_s \quad (3)$$

从上面的相位匹配条件可以看出,衍射光 k_d 是由两部分组成的。即一部分来自于 k_2 读出 k_1 和 k_s 相干涉形成的光栅 $G_1 = k_1 - k_s$ 时所得到的衍射光;另一部分来自于 k_1 读出 k_2 和 k_s 相干涉形成的光栅 $G_2 = k_2 - k_s$ 时所得到的衍射光。于是所有满足(3)式的衍射光 k_d 便构成了以 O 为顶点,以 k_1, k_2 的夹角平分线为轴,锥角为 φ 的衍射光锥,因此在垂直于锥轴的观察屏上截得的衍射图样是一圆环。同时,衍射环 III 的能量来自于两入射光束的共同作用,所以,当入射光束之间存在能量竞争时,其由各向异性自衍射所产生的环 I, 环 II 之间亦分别存在明显的明暗交替变化现象,而衍射环 III 却能保持相对稳定的状态,这正是本文实验中所观察到的结果。

对于双光束对称入射这一特殊情形, 取 $\theta'_1 = \theta'_2 = \theta'$, 当晶体 C 轴垂直于入射面时, 从相位匹配条件(3)式, 可以得到晶体外的衍射锥角为:

$$\sin \varphi = \left[n_0^2 - \left[\frac{n_0^2 - n_e^2 + (2n_e \cos \theta)^2}{4n_e \cos \theta} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中 θ 为在晶体内的入射角, n_0, n_e 为掺杂 KNSBN 晶体的主折射率。当晶体 C 轴平行于入射面时, 采用类似的分析方法, 同样可以推得晶体外的衍射锥角为:

$$\sin \varphi = \left[n_0^2 - \left[\frac{n_0 \sqrt{(n_0^2 - n_e^2)^2 + 4n_e^2 n_e^2 \cos^2 \theta} - 2nn_e \cos \theta}{n_0^2 - n_e^2} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中 n 是晶体沿入射方向的折射率。掺杂 KNSBN 晶体在 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 时的寻常光和非常光的主折射率分别为 $n_0 = 2.31, n_e = 2.27^{[14]}$, n_0 与 n_e 的差值很小, 可以取 $(n_0^2 - n_e^2)^2 \approx 0$ 。由于掺杂 KNSBN 晶体的折射率较大, 入射光束在晶体内的入射角 θ 很小, 所以在上述推导过程中可以取 $n = n_e$ 。这时(5)式可简化为:

$$\sin \varphi = \left[n_0^2 - \left[\frac{2n_e^2 \cos \theta}{n_0 + n_e} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

由(4)式可以求出入射光束在晶体内的入射角的最大值为 $\theta_{\max} = 24.8^\circ$, 对应于晶体外的入射角的最大值为 $\theta'_{\max} = 76.0^\circ$; 同理, 由(6)式可以求出 $\theta_{\max} = 24.6^\circ, \theta'_{\max} = 73.9^\circ$ 。

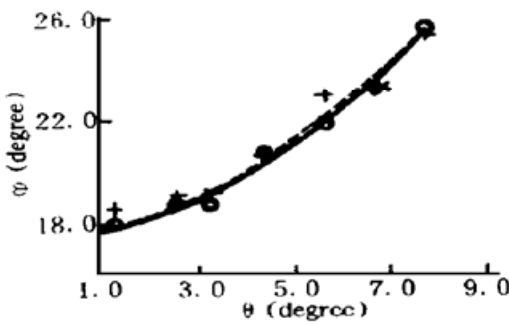


Fig. 4 Dependence of the external diffraction angles φ and φ_2 on the incident angle θ inside the crystal. Circles and asterisks are the measured data corresponding to the φ and φ_2 , respectively. The solid and dashed lines are the theoretical curves obtained from Eqs. (4) and (6), respectively.

双光束对称入射时, 在晶体 C 轴垂直于入射面和平行于入射面的不同实验配置情形下, 所得到的衍射环 III 的锥角都是随入射光束夹角的增大而增大, 且 φ 略大于 φ_2 。图 4 给出了晶体在两种实验配置情况下衍射环 III 在晶体外的衍射锥角随入射角的变化关系。与由(4)式和(6)式所得理论曲线相比较, 可见两者的变化规律是完全一致的。

基于上述的光折变四波混频各向异性光衍射机制的分析, 可以推测出在三光束同时入射时, 应有六个衍射光锥同时存在; 在四光束同时入射时, 应有十个衍射光锥同时存在, 这与本实验中的观察结果是完全一致的。

结 论 本文详细讨论了掺杂 KNSBN 晶体在 C 轴垂直于入射面和平行于入射面两种实验配置情形下, 两异常偏振光束以任意角度入射所引起的各向异性锥形衍射现象, 理论分析和实验结果都表明, 这种各向异性锥形衍射是由入射光和满足相位匹配条件的前向散射光参与的光折变四波混频所产生的。光折变晶体各向异性衍射的研究对于了解光致散射的产生机制和了解晶体内部的结构参量信息有着重要的意义。

参 考 文 献

[1] W. H. Liu, F. Z. Chen, Y. S. Qiu *et al.*, Conical diffraction in $\text{LiNbO}_3 \cdot \text{Fe}$ crystal. *Opt. Commun.*, 1987, **64**(2): 191~ 194
 [2] Z. G. Zhang, G. Hu, X. Wu *et al.*, Isotropic conical scattering in BaTiO_3 . *Opt. Commun.*, 1988, **69**

- (1): 66~ 70
- [3] 吴仲康, 王进雄, 张光寅等, $\text{LiNbO}_3 \cdot \text{Fe}$ 的光致光衍射. 物理学报, 1987, **36**(9): 1203~ 1207
- [4] 许克彬, 徐海英, 洪晶等, 光折晶体 $\text{Fe} \cdot \text{LiNbO}_3$ 中的光致散射效应. 中国激光, 1989, **16**(9): 532~ 534
- [5] M. D. Ewbank, P. Yeh, J. Feinberg, Photorefractive conical diffraction in BaTiO_3 . *Opt. Commun.*, 1986, **59**(5, 6): 423~ 428
- [6] G. Hu, Z. G. Zhang, Y. D. Jiang *et al.*, A new kind of anisotropic conical scattering generated via wave mixing in BaTiO_3 . *Opt. Commun.*, 1989, **71**(3, 4): 202~ 208
- [7] Y. S. Qiu, T. S. Lu, X. Xu *et al.*, Anisotropic scattering generated by photorefractive four-wave mixing in BaTiO_3 crystal. *Appl. Phys. (B)*, 1990, **50**(3): 319~ 322
- [8] N. V. Kukhtarev, E. Kratzig, H. C. Kulich *et al.*, Anisotropic selfdiffraction in BaTiO_3 . *Appl. Phys. B.*, 1984, **35**(1): 17~ 21
- [9] D. A. Temple, C. Warde, Anisotropic scattering in photorefractive crystals. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1986, **3**(2): 337~ 341
- [10] R. A. Rupp, F. W. Drees, Light-induced scattering in photorefractive crystals. *Appl. Phys. B.*, 1986, **39**(2): 223~ 229
- [11] 许京军, 张光寅, 刘思敏等, C 向切割 $\text{LiNbO}_3 \cdot \text{Fe}$ 晶体薄片中的四波混频各向异性光散射. 物理学报, 1994, **43**(12): 2059~ 2064
- [12] 刘思敏, 张国权, 张光寅等, 共享光栅对各向异性散射光锥的增强. 物理学报, 1995, **44**(7): 1035~ 1041
- [13] 边少平, 张景文, 许克彬等, 掺杂钾钠铌酸锶钡光折变晶体的各向异性衍射. 物理学报, 1993, **42**(4): 681~ 689
- [14] X. F. Yue, Z. S. Shao, X. L. Lu *et al.*, Studies on the formation of the self-pumped phase conjugation in a Cu-doped KNSBN crystal. *Opt. Commun.*, 1992, **89**(1): 59~ 62

Anisotropic Conical Diffraction in Doped KNSBN Crystals with Two Incident Beams

Jiang Yongyuan Zhou Zhongxiang Li Yan Sun Xiudong
Sun Wanjun Xu Kebin

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

Wan Qiuyu

(Department of Physics, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

(Received 26 November 1995)

Abstract The anisotropic conical diffraction generated by two extraordinary polarized beams with doped KNSBN crystals is reported. An anisotropic diffraction pattern with three diffraction cones has been observed for the first time. And the mechanism of photorefractive four-wave mixing involved the incident beams and forward scattered beams satisfying the phase matching condition is proposed. For the experimental geometry in which the two beams incident on the sample symmetrically, we presented the dependence of the angles of the diffraction cones on the incident angles. The theoretical analysis agrees well with the experimental results.

Key words doped KNSBN crystals, anisotropic conical diffraction, photorefractive four-wave mixing.