

# Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体的光致散射引起的衍射现象

邱怡申 刘文湖 吕团孙 陈方中

徐良瑛

(福建师范大学物理系)

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

**提要:** 本文报告了在 Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体中光致散射引起的衍射现象。根据相位匹配条件和光致折射率变化理论解释了衍射光锥的形式和强度分布的特点。

## Diffraction caused by light-induced scattering in Fe:LiNbO<sub>3</sub> crystals

Qiu Yisheng, Liu Wenhui, Lü Tuansun, Cheng Fangzhong

(Department of Physics, Fujian Teachers University, Fuzhou)

Xu Liangying

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica, Shanghai)

**Abstract:** The diffraction phenomenon caused by light-induced scattering in Fe:LiNbO<sub>3</sub> crystals is reported. The forming process and intensity distribution of the diffractive light cone are explained based on phase matching condition and photorefractive theory.

### 一、引言

用激光束照射某些光折变晶体时, 由于晶体内部缺陷所造成的散射光与入射光发生相互作用, 如果在光照区内有另一束光通过, 则可在置于晶体后面的屏幕上观察到具有确定锥角的衍射环。这种现象在文献[1]中已作过描述。

本文较详细地研究了在 Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体中产生的这种现象。除了在置于晶体后面的屏幕上观察到衍射光环外, 在反射光的方向上也观察到了类似的光环, 并且首次发现衍射光环的数目和强度分布随晶体 *C* 轴的相

对方位不同而改变, 其光环的强度与光的偏振状态有关。根据位相匹配条件和光折变理论, 解释了这种衍射光环的形成及其强度分布的特点。

### 二、实验结果

实验中我们首先观察了用单束激光照射晶体并实时读出时, 在晶体的 *C* 轴分别垂直于入射面和平行于入射面两种情况下光致散射所引起的衍射现象。接着观察了当读出光束的入射角与原记录光束的入射角不同时衍射光环的变化, 并从中得出其强度分布的规

收稿日期: 1986年12月30日。

律。最后还比较了采用不同偏振状态的记录和读出光束时衍射光环强度变化的情况。

我们还观察了用两束光同时照晶体的情况(如通常记录全息那样),其结果虽然复杂一些,但都可由单光束照射的结果来推出,本文从略。

## 2.1 单光束入射(记录),并实时读出

### 2.1.1 晶体C轴垂直于入射面

实验光路如图1所示。He-Ne激光束( $\lambda=633\text{ nm}$ )通过起偏镜后以入射角 $\theta_1$ 及垂直于入射面的偏振状态入射到Fe:LiNbO<sub>3</sub>晶体C上。晶体的掺铁量为0.1 mol%,厚度约为1 mm,C轴垂直于入射面。图中PO为入射光线, $N_0N$ 为法线,OR为晶体后表面的反射光线,OT为经晶体折射后的透射光线。照射一小段时间后,便可在晶体后面的屏幕I上观察到如图2(a)所示的衍射图样。它由一个衍射光环(部分)和一条双曲线衍射光带组成,两者相切于透射光点。若将屏幕移到晶体前面的位置II,则同样可看到相切于反射光点的类似的衍射图样,并且两个衍射图样是与晶体成镜对称的。图2(b)所示的衍射图样是位于晶体侧面位置III拍摄的照片。它由一个衍射光环和分别与环相切于透射光点和反射光点的一对双曲线衍射光带组成。显然,这些图样是来自以O为顶点的两个衍射光锥。

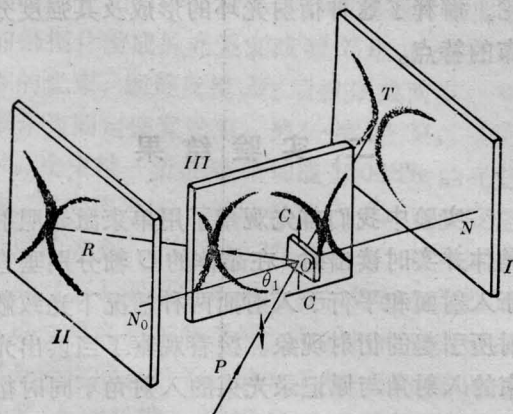


图1 晶体的C轴和入射光束的偏振方向垂直于入射面

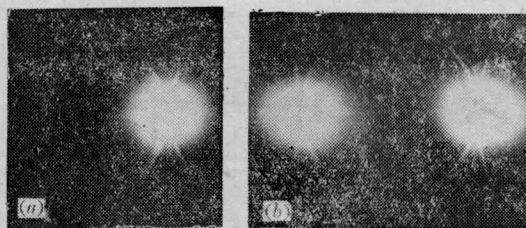


图2

### 2.1.2 晶体C轴平行于入射面

实验光路基本同图1,只是将晶体绕法线 $N_0N$ 转过 $90^\circ$ ,并使入射光在入射面内偏振(见图3)。这时,在晶体后面位置I的屏幕上呈现出如图4所示的衍射图样,图的左方为透射光点,右方为一衍射光环(部分)。不难看出,如果将光环延拓完整,它恰好经过透射光点。与图2(a)比较,除了衍射光环强度分布的位置不同外,最主要的差异是不出现双曲线衍射光带。同样在位置II,也观察到与图4相似的与晶体成镜对称的衍射图样。然而在位置III是观察不到衍射光环的。

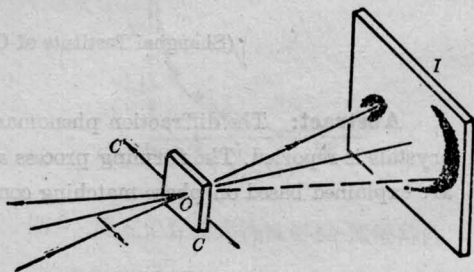


图3 晶体的C轴和光的偏振平行于入射面

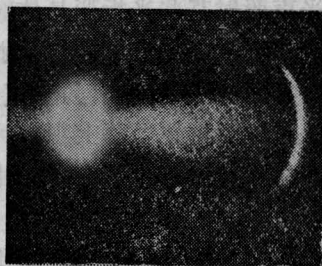


图4

## 2.2 单光束入射(记录),以另一入射角的光束读出

先观察晶体的C轴垂直于入射面的



情况。在上述图 1 所示的实验中, 如果挡住原入射光束, 位于屏幕  $I$  上的原衍射图样便消失。若改用入射角为  $\theta_2$  的另一束光(同一入射面)来读出时, 屏幕上便立即出现一组新的衍射图样, 如图 5 所示。仔细观察可以发现, 它是由四条(一般是两个椭圆、两条双曲线)相切于读出光透射光点的衍射光带所组成。当晶体  $O$  轴平行于入射面时, 即上述图 3 所示的实验中, 改用入射角为  $\theta_2$  的另一束光读出时, 在位置  $I$  的屏幕上即刻呈现如图 6 所示的另一组衍射图样。照片中耀眼的亮点是读出光的透射光点, 如果两个椭圆形衍射光带延伸完整, 可发现它们恰好外切于该透射光点。



图 5

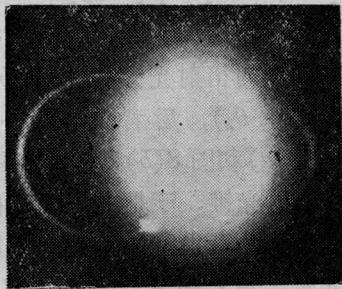


图 6

从上述各实验结果的照片中可以看出, 衍射光环(带)的光强分布有一个共同的特点: 若衍射光环(带)上某点和透射(或反射)光点的连线与晶体  $O$  轴的夹角  $\varphi$  愈小, 该点的衍射光便愈强;  $\varphi$  越大, 衍射光则愈弱; 当

$\varphi$  等于  $90^\circ$  时, 衍射光强为零。事实上, 当  $\varphi$  接近  $90^\circ$  时, 该点的衍射光已十分微弱, 以致于从照片上都只能看到衍射光环(带)的一部分。

实验中, 我们分别改变记录光和读出光的偏振状态( $o$  光或  $e$  光), 都可观察到上述各种衍射现象, 并且发现衍射光环(带)的偏振状态与读出光相同, 只是衍射光环(带)的强度有所不同。对各种配对情况下的稳态定性观察结果发现, 不论记录光的偏振状态如何, 读出光为  $e$  光时, 衍射光环(带)的强度明显增强, 其中以记录光亦为  $e$  光时尤甚。

### 三、理论解释

对上述实验现象的解释是基于非线性光学所必须满足的位相匹配条件和  $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$  晶体的光折变理论。当一束激光射入晶体时, 由于缺陷的存在而发生散射, 散射光与入射光相干涉所形成的干涉光强将使晶体中的电子作相应的激发。光生伏特效应的存在<sup>[2]</sup>使受激电子迁移而被俘获, 从而建立起相应的空间电荷场, 并且通过线性电光效应使晶体的折射率产生调制, 结果便在光照区形成许多空间频率和取向各不相同的位相光栅。当光照区有另一束光通过时, 它能在满足位相匹配条件的那些光栅中发生衍射, 从而产生散射光的衍射现象。

在图 1 所示的实验中, 衍射光环是由入射光在晶体内的折射光(下称记录光)、记录光在晶体后表面的反射光以及它们的散射光的非线性相互作用生成的。如图 7 所示, 设用  $K_1$  和  $K_2$  分别表示记录光及其反射光的波矢,  $K_3$ (或  $K_4$ ) 和  $K_4$ (或  $K_3$ ) 分别表示散射光和衍射光的波矢。它们都有相同的偏振状态( $e$  光), 波矢的大小均为  $\frac{2\pi n_e}{\lambda}$ , 这里  $n_e$  是  $e$  光的主折射率。诸波矢必须满足的位相匹配条件是:

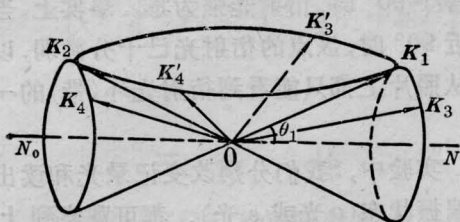


图7 满足位相匹配条件的波矢图(1)

$$\mathbf{K}_3 = \mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_4 \quad (1)$$

或

$$\mathbf{K}_4 = \mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_3 \quad (2)$$

(1)式表示由反射光  $\mathbf{K}_2$  与散射光  $\mathbf{K}_4$  相干涉形成的波矢为  $(\mathbf{K}_4 - \mathbf{K}_2)$  的光栅用记录光  $\mathbf{K}_1$  读出, 得到衍射光  $\mathbf{K}_3$ 。同理, (2)式相当于用反射光  $\mathbf{K}_2$  去读出记录光  $\mathbf{K}_1$  与散射光  $\mathbf{K}_3$  相干涉所形成的波矢为  $(\mathbf{K}_3 - \mathbf{K}_1)$  的光栅, 得到衍射光  $\mathbf{K}_4$ 。显然, 满足上述位相匹配条件的所有衍射光  $\mathbf{K}_3$  和  $\mathbf{K}_4$  分别构成顶点在光照区  $O$ , 以法线  $N_0N$  为轴, 顶角为  $2\theta_1$  的前向和后向衍射光锥(准确地说, 在晶体内其锥角应为  $2\theta'_1$ ,  $\theta'_1$  为折射角。为方便说明, 以下锥角均指空气中而言。), 如图7所示。

如果用  $\mathbf{K}'_3$ (或  $\mathbf{K}'_4$ ) 和  $\mathbf{K}'_4$ (或  $\mathbf{K}'_3$ ) 分别表示侧向的散射光和衍射光。那末, 侧向位相匹配条件可写成:

$$\mathbf{K}'_3 = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 - \mathbf{K}'_4 \quad (3)$$

或

$$\mathbf{K}'_4 = \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}_1 - \mathbf{K}'_3 \quad (4)$$

从(3)式可以看出, 单从满足位相匹配条件而言, 衍射光  $\mathbf{K}'_3$  由两部分组成: 一部分来自  $\mathbf{K}_1$  与  $\mathbf{K}'_4$  相干涉形成的光栅用  $\mathbf{K}_2$  去读出, 另一部分是用  $\mathbf{K}_1$  去读出  $\mathbf{K}_2$  与  $\mathbf{K}'_4$  相干涉形成的光栅。同理, 对衍射光  $\mathbf{K}'_4$  亦可由(4)式作出相似的解释。于是满足(3)、(4)式的所有衍射光  $\mathbf{K}'_3$  和  $\mathbf{K}'_4$  便构成以  $O$  为顶点、以  $\mathbf{K}_1$  和  $\mathbf{K}_2$  所夹角的平分线为轴, 顶角为  $(180^\circ - 2\theta_1)$  的侧向衍射光锥, 见图7。不难看出, 上述图2(a)和2(b)所示的衍射图样正是照相底片分别在不同位置所截取前向、后向和侧

向这三个衍射光锥的结果, 而图4是只与前向衍射光锥相截的结果。

当挡住原入射束而改用入射角为  $\theta_2$  的另一光束读出时, 其位相匹配的波矢图要复杂一些。为分析方便, 把波矢图分解为两幅, 其中图8(a)仅画出与记录光(及其相应的散射光)相关的那部分衍射; 图8(b)仅画出与反射光(及其相应的散射光)相关的另一部分衍射。在图8(a)中,  $\mathbf{K}_1$  为原记录光波矢,  $\mathbf{K}'_1$  为读出光波矢,  $\mathbf{K}_3$  和  $\mathbf{K}'_3$  为散射光波矢, 相应的衍射光波矢为  $\mathbf{K}_4$  和  $\mathbf{K}'_4$ 。它们满足如下位相匹配条件:

$$\mathbf{K}_4 = \mathbf{K}'_1 + \mathbf{K}_1 - \mathbf{K}'_3 \quad (5)$$

和

$$\mathbf{K}'_4 = \mathbf{K}'_1 + \mathbf{K}'_3 - \mathbf{K}_1 \quad (6)$$

满足(5)式的衍射光  $\mathbf{K}_4$  构成以  $O$  为顶点、以  $\mathbf{K}_1$  和  $\mathbf{K}'_1$  的夹角的角平分线为轴, 顶角为  $(\theta_1 - \theta_2)$  的前向衍射光锥。而满足(6)式的衍射光  $\mathbf{K}'_4$  构成顶角为  $[180^\circ - (\theta_1 - \theta_2)]$  的侧向衍射光锥(见图8(a))。在图8(b)中, 若用  $\mathbf{K}_2$  表示原反射光波矢,  $\mathbf{K}'_1$  仍为读出光波矢,  $\mathbf{K}'_3$  和  $\mathbf{K}_3$  为散射光波矢, 则衍射光波矢  $\mathbf{K}''_4$  和  $\mathbf{K}''_3$  分别满足:

$$\mathbf{K}''_4 = \mathbf{K}'_1 - \mathbf{K}_2 + \mathbf{K}'_3 \quad (7)$$

和

$$\mathbf{K}''_3 = \mathbf{K}'_1 + \mathbf{K}'_2 - \mathbf{K}''_4 \quad (8)$$

满足(7)式和(8)式的  $\mathbf{K}''_4$  和  $\mathbf{K}''_3$  分别构成另外一对前向和侧向衍射光锥(见图8(b))。前者的顶角为  $(\theta_1 + \theta_2)$ , 后者为  $[180^\circ - (\theta_1 + \theta_2)]$ 。组合图8(a)和图8(b)即可得到图8(c)所示的四个衍射光锥。于是在位置  $I$  的照相底片与这四个光锥相截便可得到图5所示的四条衍射光带。若只与两个前向光锥相截, 就得图6所示的结果。

为什么衍射光环(带)上的强度分布随  $\varphi$  而变化? 为什么当晶体  $O$  轴与入射面平行时, 观察不到侧向衍射光锥(尽管满足位相匹配条件)? 要解释这个问题必须进一步根据 Kogelnik 的耦合波理论和  $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$  晶体



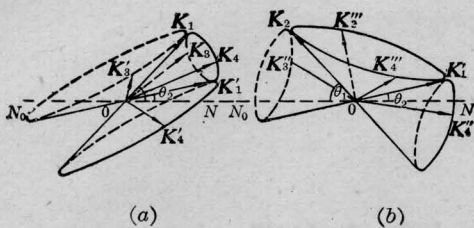


图8 满足位相匹配条件的波矢图(2)

的光折变特性作具体分析。

根据 Kogelink 理论的结果, 位相光栅的衍射效率不太高时可写成如下形式<sup>[3]</sup>:

$$\eta \propto e^{-\alpha l / \cos \theta_0} \cdot \frac{\Delta n^2}{\cos^2 \theta_0} \quad (9)$$

式中  $\alpha$  是光吸收系数,  $l$  是晶体厚度,  $\theta_0$  是晶体内部记录光与某一方向散射光的夹角,  $\Delta n$  是晶体折射率调制的幅值。对于 Fe:LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 当采用同偏振的  $e$  光(或  $o$  光)记录位相光栅时, 光生伏特电流和由此产生的空间电荷场是沿  $C$  轴方向的<sup>[2]</sup>。若取坐标轴  $z$  与  $C$  轴重合, 则稳态时折射率调制的幅值可写成

$$\Delta n \propto e_a^* \cdot [\vec{\varepsilon} \cdot (\vec{R} \cdot \hat{K}) \cdot \vec{\varepsilon}] \cdot e_r m \cos \varphi \quad (10)$$

式中  $e_a$  和  $e_r$  分别表示衍射光和读出光的单位偏振矢量,  $\vec{\varepsilon}$  是主介电张量,  $\vec{R}$  是线性电光张量, 它的前两个指标是对称的。  $m$  是光强调制度,  $\hat{K}$  是单位光栅波矢。  $\varphi$  是所记录的光栅与  $C$  轴的夹角, 见图 9 所示。当读出光和衍射光均为  $e$  光( $e_r = e_a = e_e$ )或均为  $o$  光( $e_r = e_a = e_o$ )时, 根据文献[4]提供的电光张量矩阵元计算(10)式可得到

$$\Delta n_o \propto n_o^3 \gamma_{33} m \cos^2 \varphi \quad (11-a)$$

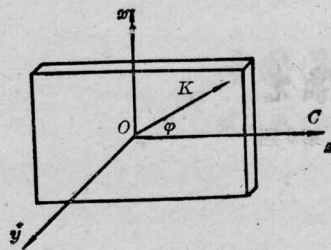


图 9

$$\Delta n_o \propto n_o^3 \gamma_{13} m \cos^2 \varphi \quad (11-b)$$

式中的  $\gamma_{33}$  和  $\gamma_{13}$  是电光系数。由(9)式和(11)式可知, 衍射效率  $\eta$  随记录光和散射光相干涉所形成光栅的波矢与  $C$  轴的夹角  $\varphi$  的增大而降低。这就说明了实验结果中衍射光环(带)的强度随  $\varphi$  的增加而减弱的分布特点。当晶体的  $C$  轴平行入射面时, 与侧向衍射光锥相关的光栅波矢均与  $C$  轴垂直(见图 7)或接近于垂直(见图 8, 由于  $n_e \approx 2.22$ <sup>[4]</sup>, 故在晶体内  $K_1$  和  $K'_1$  的折射角很接近)。因此衍射效率等于零或者很小, 所以屏幕上观察不到侧向衍射光锥产生的衍射光。

(9)式和(11)式还表明, 衍射效率  $\eta$  与读出光的偏振状态有关。由于  $\gamma_{33} \approx 30.8$ ,  $\gamma_{13} \approx 8.6$ <sup>[4]</sup>, 且  $o$  光吸收系数  $\alpha_o$  大约是  $e$  光吸收系数  $\alpha_e$  的两倍, 所以对同一光栅, 用  $e$  光读出比用  $o$  光读出的衍射效率要高得多, 故衍射光环(带)的强度明显增强。至于用  $e$  光记录较之用  $o$  光记录所产生的衍射光环(带)更强的原因可以这样解释: 记录光与散射光耦合的结果导致散射光能量增强<sup>[5]</sup>, 达到稳态时, 光折变量  $\Delta n$  愈大, 散射光增强愈多, 从而光强调制度愈大, 根据(9)式和(11)式可知衍射光也较强, 所以用  $e$  光记录能具有较强的衍射光环(带)。

#### 四、讨 论

由上述理论分析可知, 衍射光锥的产生是由于晶体缺陷所造成的散射光与入射光通过非线性相互作用所引起的一种光致折光率

(下转第 340 页)

从以上4表可以看到,使用本装置只要把工作电流控制在一定的值,噪声/功率比可以接近于0.2%,而使用其它电源所得的最低噪声/功率比均在2%以上。使用本装置比使用通常的激励源可以使噪声下降20 dB。

### 3.3 稳定功率结果

图6是激光输出功率的记录曲线(直接由功率计测量),AB段是开机后1小时内激光输出功率的波动曲线,在B点时加上稳功率控制,BC段是加功率稳定控制期间的激光输出功率,其功率稳定度优于0.5%。

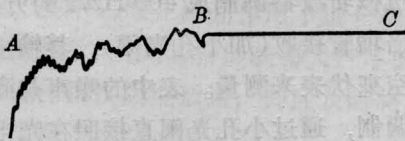


图6 功率稳定效果(6cm/h)

图7是激光器输出功率加反馈和不加反馈的功率稳定性的对照。AB段是激光在不加功率稳定反馈时的输出功率曲线,BC段是

加上功率稳定反馈的结果,CD段是又断开功率稳定反馈的输出功率曲线。从图7中可以清楚地看到激光器工作时,一旦加上功率稳定反馈控制,虽然激光输出功率稍有下降,但功率稳定性大大地得到改善。

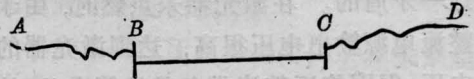


图7 加反馈与不加反馈的功率稳定性对照 (6 cm/h)

### 参 考 文 献

- 1 Sasaki Akira. *Japan J. Appl. Phys.*, 1983; **22**(10): 1538
- 2 Gudelev V G et al. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1982; **12**(7): 904
- 3 Barger R L et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1975; **27**(1): 31
- 4 李同保 et al. *激光杂志*, 1986; **7**(5): 33
- 5 Suzuvi T. *Japan J. Appl. Phys.*, 1970; **9**: 301
- 6 辛振华 et al. *应用激光*, 1982; **2**(2): 9
- 7 殷一贤 et al. *中国激光*, 1985; **12**(2): 124
- 8 徐顺潮 et al. *应用激光*, 1984; **4**(1): 33

(上接第349页)

变化现象,用光生伏特效应的电荷迁移理论能解释衍射光环(带)的光强分布特点。因此,本文的工作将有助于我们对晶体缺陷的某些特性以及晶体光折变特性的进一步了解。另一方面,在使用光折变晶体作为非线性介质的实时全息或四波混频实验中,衍射光环(带)的出现将导致信噪比的下降,这是所不希望。本文的实验结果表明,在保证较高衍射效率的前提下,为尽可能减少散射光衍

射的干扰,可以采用记录光和读出光不同偏振的系统。

### 参 考 文 献

- 1 Magnusson R, Gaylord T K. *Appl. Opt.*, 1974; **13**(7): 1545
- 2 Kurz H. *Opt. Acta*, 1977; **24**(4): 463
- 3 Kogelnik H. *Bell Syst Tech. J.*, 1969; **48**: 2909
- 4 蒋民华编. *晶体物理*, 山东科学技术出版社, 1980
- 5 Kukhtarev W, Markov V et al. *Opt. Commun.*, 1977; **23**: 338