

光折变晶体 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 中的特殊散射现象

张燕 赵曰峰 赵丽娜 郑立仁 高垣梅

Special scattering in photorefractive crystal $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$

Zhang Yan Zhao Yue-Feng Zhao Li-Na Zheng Li-Ren Gao Yuan-Mei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 084206 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.084206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

线性吸收介质非局域线性电光效应的耦合波理论

Wave coupling theory of nonlocal linear electro-optic effect in a linear absorbent medium

物理学报.2017, 66(6): 064202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064202>

少模光纤的不同模式布里渊散射特性

Characterization of Brillouin scattering in a few-mode fiber

物理学报.2017, 66(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024207>

饱和非线性介质中艾里-高斯光束的传播与交互作用

Propagation and interactions of Airy-Gaussian beams in saturable nonlinear medium

物理学报.2016, 65(24): 244202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.244202>

在单零色散微结构光纤中一次抽运同时发生两组四波混频的实验观察

Experimental studies of two sets of four-wave mixing processes in a single-zero-dispersion microstructured fiber by the same pump

物理学报.2016, 65(21): 214201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214201>

高效频率转换下双波长外腔共振和频技术研究

Double resonant sum-frequency generation in an external-cavity under high-efficiency frequency conversion

物理学报.2016, 65(7): 074202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074202>

光折变晶体 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 中的特殊散射现象*张燕¹⁾ 赵曰峰¹⁾ 赵丽娜¹⁾ 郑立仁²⁾ 高垣梅^{1)†}

1)(山东师范大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

2)(泰山学院物理与电子工程学院, 泰安 271021)

(2016年9月26日收到; 2016年11月22日收到修改稿)

用柱面透镜把经针孔滤波器扩束的激光束沿某一个方向聚焦成细丝状(或长条状), 细丝状光束垂直入射到 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体上, 在远场位置观察散射光. 我们发现光散射的方向与晶体的 c 轴方向不一致, 不仅沿着晶体的 c 轴方向有散射光出现, 沿光束的条形方向也出现很强的散射光.

关键词: 非线性光学, 光折变效应, 光散射

PACS: 42.65.-k, 42.65.Hw, 42.68.Mj

DOI: 10.7498/aps.66.084206

1 引言

光折变效应 (photorefractive effect) 是光致折射率变化效应 (photo-induced refractive index change effect) 的简称, 是指电光材料在光辐照下由光强的空间分布引起材料折射率相应变化的一种非线性光学现象^[1]. 晶体中的光折变效应自发现以来, 就引起人们广泛的研究和关注. 目前, 光折变非线性光学已经发展成为当今非线性光学中的一个重要而活跃的分支. 光感应光散射 (light induced scattering) 是指光折变材料被照射时, 由光折变效应引起的散射光放大, 起因是入射光与光折变材料中的缺陷引起的散射光相干涉, 写入了噪声相位光栅, 通过噪声栅的衍射, 使入射光向散射光转移了能量, 从而放大了散射光. 在光感应光散射中, 写入光就是晶体中的入射光与周围的散射光. 由于晶体中存在着多束散射光, 故同时写入了多组相位栅, 散射光在空间无规则地分布着, 因而这些相位栅的叠加被称为噪声栅. 光感应光散射就是入射光被噪声栅的自衍射. 光感应光散射是广泛存在于光折变晶体中的一种重要现象, 在光学处理、光学通

讯、干涉仪、激光器耦合及其锁定等领域都有广泛的应用^[2,3]. 但同时, 它还是许多光学应用中的不利因素. 例如: 在图像处理中, 光感应光散射的存在使得背景噪声大大增加, 信噪比降低, 图像模糊; 在信号放大中, 由于散射光消耗了抽运光的能量, 使得信号光得不到应有的增益^[4]. 正是由于这些原因, 对光感应光散射——扇形效应的研究也得到了越来越多的重视.

近年来, 在很多高增益光折变晶体中人们都观察到了扇形散射现象^[5-8], 如吕团孙等^[5]观察到, 当光入射 BaTiO_3 晶体时, 会出现各项异性散射^[5]. 文献^[9-11]的研究认为, 光折变晶体内的光束自身的多波耦合是光扇形成的一个可能原因, 并以四波耦合模型代替多波耦合, 通过四波混频过程给出的稳态光强分布, 说明了光扇的形成过程. 考虑到高增益光折变晶体内的二波混合会产生高阶衍射光, 入射光束中不同空间频率成分与它们相应的高阶衍射光将发生四波耦合作用, 这种作用将光能有效地从光束中低频成分转移至高阶衍射上, 从而形成了宽角分布的扇形输出光^[12-14]. 同时, 基于前向简并三波作用, 从理论上解释了具有局域非线性响应的光折变晶体 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 中的对称扇

* 国家自然科学基金 (批准号: 11304187, 11374108, 11404196, 11574185, 11404194)、中国博士后科学基金面上项目 (批准号: 2015M582126) 和山东省高等学校科技计划 (批准号: J14LA55) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gaoyuanmei@sdu.edu.cn

形效应^[11-15]. 所有以上研究都是用激光的圆光斑垂直入射到晶体中, 扇形的方向都是沿着晶体的 c 轴方向. 这也是我们判断晶体 c 轴的一个重要实验依据.

本文中, 一束线偏振的激光束经针孔滤波器扩束后被柱面透镜聚焦成长条状光束^[16,17], 该光束垂直入射到 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 上, 在远场位置上观察到了特殊散射光. 我们研究了条状光束的方向与晶体的 c 轴平行和垂直两种配置下的远场散射光, 发现沿晶体 c 轴方向和细光束方向 (f 方向) 均有很强光散射. 当晶体 c 轴和细光束 f 方向平行时, 散射光沿着二者方向迅速变化; 当二者方向垂直时, 散射光先沿 c 轴方向出现, 而后在 f 方向出现. 我们发现光的散射方向会与晶体 c 轴方向不一致, 并就该现象的产生原因进行了简单的解释.

2 实验装置与结果

2.1 实验装置

本文介绍的是对一块 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体 (0.03%, $5\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 光轴沿 5 mm 棱方向) 的研究结果. 实验所用的光是线偏振光, 在晶体的入射面上入射的长条光束宽 0.3 mm , 入射光的功率是 11 mW , 实验装置图如图 1 所示. 一束功率为 50 mW 的 Nd:YAG 激光器 (波长为 532 nm) 经过空间滤波器 (SF) 和透镜 L_1 ($f_1 = 300\text{ mm}$) 后变成了一束均匀的准直平行光, 这束准直平行光经矩形孔遮挡周围圆弧部分后入射到柱面透镜, 经过两个柱面透镜 ($f_2 = f_3 = 200\text{ mm}$) 后先会聚成一条水平方向尺寸大于 10 mm , 垂直方向尺寸约 0.3 mm (在水平方向上光束能够完全覆盖晶体) 的矩形光条, 紧接着又会聚成一条水平方向尺寸约 0.3 mm , 垂直方向尺寸大于 10 mm 的长条状光束后入射到晶体上. 在光的远场位置 (约 1 m 处) 放置光屏, 单反相机用来记录光屏上的散射图样.

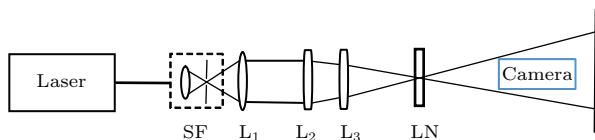




图 1 实验装置图 SF 为空间滤波器; L_1 为透镜; L_2, L_3 为柱面透镜; LN 为掺铁铌酸锂晶体

Fig. 1. Experimental setup: SF is the spatial filter; L_1 is a lens; L_2, L_3 are cylindrical lenses; LN iron-doped lithium niobate crystal.

2.2 实验结果

首先, 我们研究晶体的 c 轴和细光束均为水平方向 (定义为第一种配置) 下的特殊光散射, 入射到晶体上的细光束为横条时, 实验结果如图 2 所示, 从图中可以看出, 初始时刻的光强分布是很均匀的; 10 s 左右, 在水平方向上逐渐出现了周期性条纹, 条纹较宽, 由竖直向的细丝组成; 随着辐照时间的继续增加, 周期性条纹越来越清楚, 并且条纹在水平方向迅速地向外延伸; 辐照时间为 10 min 时, 远场屏上的图样达到了一个稳定状态, 不再随辐照时间的加大而发生变化, 晶体内部的光强大幅度减弱. 反射方向也有如上的现象, 随着入射时间的增加, 晶体出射面的透射方向光强减弱, 反射方向光强增强. (详见 video-1 )

晶体的 c 轴为竖直方向, 入射到晶体上的细光束为横条 (定义为第二种配置) 时, 实验结果如图 3 所示. 从图中可以看出初始时刻的光强分布均匀; 30 s 左右, 由于调制不稳定性的出现, 在晶体内部逐渐出现了周期性横向条纹, 条纹较窄, 横条纹由竖直方向的细丝组成; 随着辐照时间的继续增加, 周期性横向条纹越来越清楚, 在竖直方向数目越来越多, 并且有沿着 c 轴方向延伸出晶体界面的趋势. 辐照时间为 2 min 后, 光开始溢出晶体的边界, 其形状与晶体内部形状一致. 辐照 30 min 后, 散射图样保持稳定, 不再发生变化.

辐照过程中, 散射光先在晶体出射面外部的上下两侧, 随着辐照时间的继续增加, 当超过 30 min 时, 散射光在垂直于晶体 c 轴的方向上也慢慢出现. 此时在晶体左右两侧的界面临界处比较暗, 越向外越亮; 并随着辐照时间的增加散射光光强越来越强. 在左右两侧出现的条纹是由竖直方向的细丝组成, 随辐照时间的增加, 竖直细丝在竖直方向越来越长, 当辐照时间超过 2 h 后, 光屏上图样趋于稳定. (详见 video-2 )

第三种配置: 只用一个柱面透镜时, 晶体的 c 轴为横向, 入射到晶体上的细光束为横条时 (在远场方向为竖条), 远场散射图样随辐照时间的变化.

只用一个柱面透镜时, 晶体的 c 轴为横向, 入射到晶体上的细光束为横条时 (在远场方向为竖条) (定义为第三种配置), 实验结果如图 4 所示 (因光屏放置位置较远, 以及柱面透镜的关系, 聚焦到晶体上的横条状光束在光屏上变为竖条状). 由光屏上图样变化可看出, 当使用一个柱面透镜时, 与

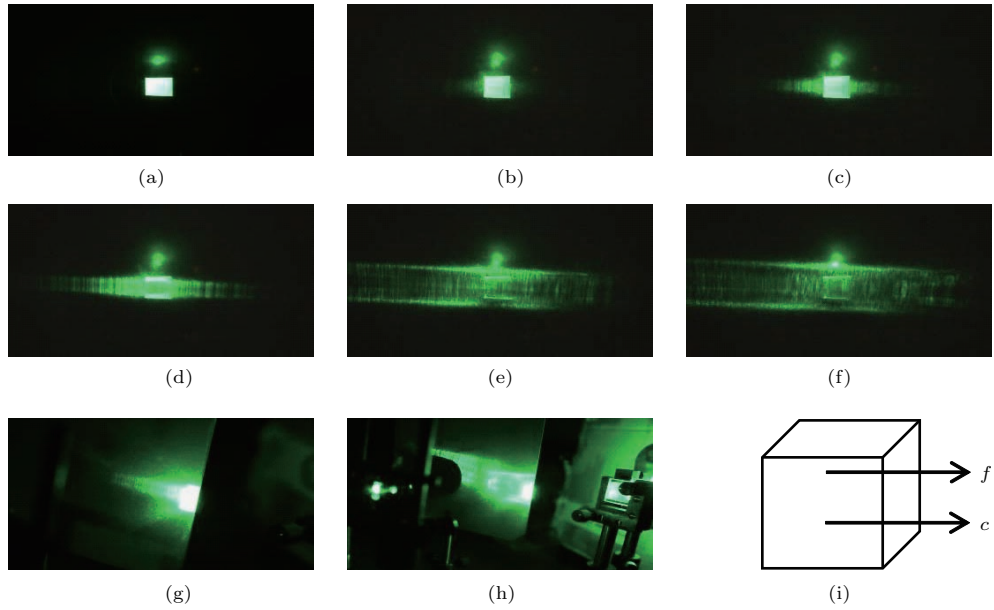


图2 (网刊彩色) 第一种配置下, 远场屏上图样随入射光辐照时间 t 的变化 (a)–(f) 对应 $t = 0, 10 \text{ s}, 30 \text{ s}, 1 \text{ min}, 3 \text{ min}, 10 \text{ min}$; (g) 为 (d) 对应的反射光, (h) 为 (f) 对应的反射光

Fig. 2. (color online) Pattern changes on the far-field screen with the incident irradiation time: (a)–(f) Correspond to the irradiation time $0, 10 \text{ s}, 30 \text{ s}, 1 \text{ min}, 3 \text{ min}, 10 \text{ min}$; (g) is the reflected light pattern of (d); (h) is the reflected light pattern of (f).

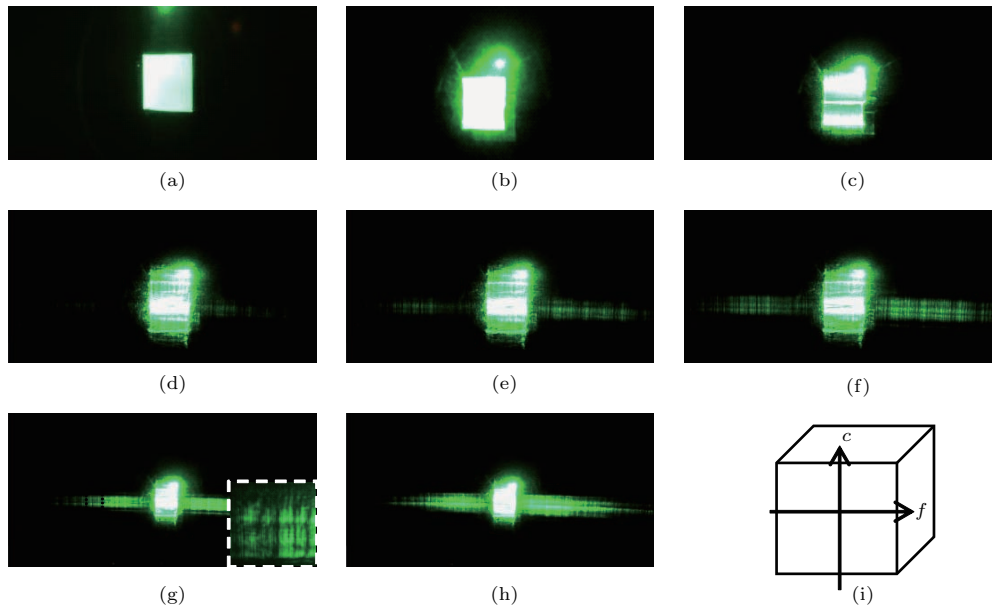


图3 (网刊彩色) 第二种配置下远场屏上图样随入射光的辐照时间 t 的变化 (a)–(h) 分别对应 $t = 0, 0.5, 2 \text{ min}, 35, 40, 45, 50, 68 \text{ min}$

Fig. 3. (color online) Pattern changes on the far-field screen with the incident irradiation time in the second configuration: (a)–(h) $t = 0, 0.5, 2, 35, 40, 45, 50, 68 \text{ min}$, respectively.

使用两个柱面透镜相比较图样变化是大致相同的, 但此种实验配置下可以明显看出散射光清晰地分成了几条. 从图4中可以看出初始时刻的光强分布均匀; 条纹出现时间由10 s变为30 s; 清晰可见的条纹共分四条, 按自上而下编号为1, 2, 3, 4, 四条条纹在辐照1 min内迅速沿着晶体 c 轴方向延伸.

1号条纹和4号条纹在向外延伸的同时, 竖直方向细丝也在变长, 并且1号条纹慢慢上移, 4号条纹慢慢下移. 随着2号条纹和3号条纹的向外延伸, 竖直细丝在变短, 并且2号条纹下移, 3号条纹上移, 在辐照时间为4 min时, 2号条纹和3号条纹由于竖直方向上的运动合为一条. (详见 video-3)

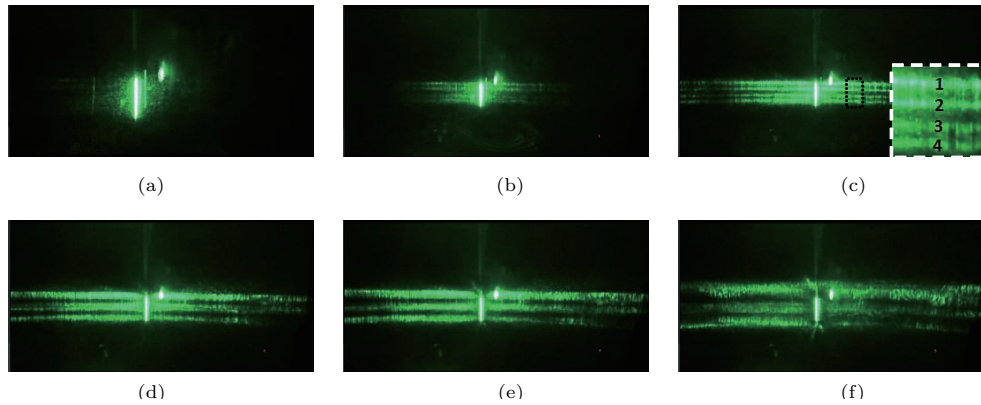


图4 (网刊彩色) 第三种配置下, 远场屏上图样随入射光辐照时间的变化 (a)—(f) 分别对应 $t = 0.5; 3; 6; 12; 16; 30$ min

Fig. 4. (color online) Pattern Changes on the far-field screen with the incident irradiation time in the third configuration: (a)–(f) $t = 0.5; 3; 6; 12; 16; 30$ min, respectively.

条纹状散射光沿晶体 c 轴向外延伸的时间由 1 min 变为 2 min; 达到稳定的时间由 10 min 变为 30 min.

根据上述实验现象, 进行如下讨论. 经柱面透镜聚焦后的长条状光束照射到晶体上时, 可把长条光束看成由若干束紧贴在子光束构成, 这些子光束为垂直于长条方向 (f 方向) 的细丝, 它们会在晶体中记录光栅, 光栅对入射光产生散射, 散射光与入射光形成新的光栅, 新光栅对入射光继续产生散射, 周而复始, 散射光会沿着长条状光束的方向“生长”(如 video-1, video-3 online). 此种现象并非是由调制不稳定性导致的, 由文献 [16, 17] 知同等配置下, 调制不稳定性图样在条形光束照射晶体大约 30 min 后出现, 而本文实验结果的散射现象是在条形光束照射晶体 1—2 min 后就慢慢出现.

聚焦光束入射到 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中时, 光折变效应在光照区平行于 c 轴方向形成了由正、负、正三个透镜组合而成的类透镜组; 而在垂直于 c 轴方向形成了一个负类透镜 [5]. 由于这种类透镜效应, 激光光束在通过晶体时, 光束不同部分的传播方向会发生不同的改变, 而波矢方向相同的光线彼此相干, 这样就沿着晶体的 c 轴方向出现了自衍射 [5,18]. 自衍射的过程是一个光折变效应的过程.

当光束的长条方向和晶体的 c 轴平行时, 光束的自衍射方向和由细丝光束产生的散射光的“生长方向”相同, 二者相互促进, 所以很快达到稳定状态 (约 10 min). 当光束方向和晶体的 c 轴方向垂直时, 伴随着光折变效应先沿着晶体的 c 轴方向出现自衍射. 当光折变达到饱和时, 自衍射效应停止. 由于晶体中光斑尺寸较大 [19], 有利于光感应光散射的

形成, 此时沿光束方向出现了散射光的缓慢生长. 也就是说, 这种配置下, 开始时光感应自衍射产生的衍射光从入射光中得到较多的能量, 一段时间后光感应光散射占优势, 形成了 video-2 中所观察到的先在沿着 c 轴的方向出现自衍射, 一段时间后沿着光条 f 方向出现散射的动态现象.

3 结 论

用柱面透镜把经针孔滤波器扩束的激光束沿某一个方向聚焦成长条状, 长条状光束垂直入射到 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体上, 在远场位置观察到了特殊的动态散射光. 我们研究了长条状光束的方向与晶体 c 轴方向平行和垂直的两种配置下的远场散射光. 发现沿 c 轴方向和细光束方向 (f 方向) 均有很强光散射, 当晶体 c 轴方向和长条 f 方向平行时, 散射光沿着二者方向迅速变化; 当二者方向垂直时, 散射光先沿 c 轴方向出现, 而后在 f 方向出现, 并对现象的产生进行了理论解释.

参考文献

- [1] Liu S M, Guo R, Xu J J 2004 *Photorefractive Nonlinear Optics and Its Applications* (2nd Ed.) (Beijing: Science Press) pp1–14 (in Chinese) [刘思敏, 郭儒, 徐京军 2004 光折变非线性光学及其应用 (北京: 科学出版社) (第2版) 第1—14页]
- [2] Li P L, Guo Q L, Zhang J P, Liang B L, Wang Z J, Huai S F, Fu G S 2008 *Progress in Natural Science* **18** 1 (in Chinese) [李盼来, 郭庆林, 张金平, 梁宝来, 王志军, 怀素芳, 傅广生 2008 自然科学进展 **18** 1]

- [3] Yang L S, Liu S M, Zhang G Y, Xu J J, Guo R, Gao Y M, Huang C F, Lu Y, Wang D Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 461 (in Chinese) [杨立森, 刘思敏, 张光寅, 徐京军, 郭儒, 高垣梅, 黄春福, 陆猗, 汪大云 2004 物理学报 **53** 461]
- [4] Liu S M, Zhang G Q, Zhang G Y, Xu J J, Liu J M, Men L Q 1995 *Acta Phys. Sin.* **44** 1035 (in Chinese) [刘思敏, 张国权, 张光寅, 徐京军, 刘军民, 门丽秋 1995 物理学报 **44** 1035]
- [5] Lü T S, Qiu Y S, Xu L L 1991 *Acta Opt. Sin.* **11** 36 (in Chinese) [吕团孙, 邱怡申, 许立新 1991 光学学报 **11** 36]
- [6] Zhao T, Zeng L Z, Wang R P, Jiang Y J 1999 *The J. Light Scattering* **11** 1 (in Chinese) [赵彤, 曾令祉, 王荣平, 蒋毅坚 1999 光散射学报 **11** 1]
- [7] Guo R, Pan S H, Zhang G Y 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 2005 (in Chinese) [郭儒, 潘世宏, 张光寅 1996 物理学报 **45** 2005]
- [8] Wang X Y, Li J, Li W J 2010 *J. Xi'an Technological University* **30** 224 (in Chinese) [王晓颖, 李洁, 李武军 2010 西安工业大学学报 **30** 224]
- [9] Ling Z F, Liu S M, Guo R, Zhang G Y 1991 *Acta Phys. Sin.* **40** 1786 (in Chinese) [凌振芳, 刘思敏, 郭儒, 张光寅 1991 物理学报 **40** 1786]
- [10] Liu S M, Zhang G Y, Wu Y Q 1988 *Acta Phys. Sin.* **37** 268 (in Chinese) [刘思敏, 张光寅, 武原庆 1988 物理学报 **37** 268]
- [11] Guo R, Liu S M, Ling Z F, Xu J J, Zhang G Y 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1593 (in Chinese) [郭儒, 刘思敏, 凌振芳, 徐京军, 张光寅 1997 物理学报 **46** 1593]
- [12] Gao Y M, Liu S M, Zhao H E 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1162 (in Chinese) [高垣梅, 刘思敏, 赵红娥 2003 物理学报 **52** 1162]
- [13] Gao Y M, Liu S M, Guo R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2958 (in Chinese) [高垣梅, 刘思敏, 郭儒 2004 物理学报 **53** 2958]
- [14] Mordechai S, Yoav O, Baruch F 1990 *Opt. Commun.* **77** 265
- [15] Zhang G Q, Guo R 1995 *Chin. Phys. Lett.* **12** 617
- [16] Lin R, Gao Y M 2011 *Phys. Lett. A* **375** 3228
- [17] Lin R, Gao Y M 2012 *Opt. Commun.* **285** 2724
- [18] Chen F S 1969 *J. Appl. Phys.* **40** 3389
- [19] Zhang G Y, Li Q X, Ho P P, Liu S M, Wu Z K, Alfano R R 1986 *Opt. Appl.* **25** 2955

Special scattering in photorefractive crystal $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}^*$

Zhang Yan¹⁾ Zhao Yue-Feng¹⁾ Zhao Li-Na¹⁾ Zheng Li-Ren²⁾ Gao Yuan-Mei^{1)†}

1) (College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

2) (College of Physics and Electronic Engineering, Taishan University, Tai'an 271021, China)

(Received 26 September 2016; revised manuscript received 22 November 2016)

Abstract

We observe special scattering light by using a simple experimental device and record the dynamic behavior with a camera. A laser beam from an Nd:YAG laser, which is expanded by the spatial filter (SF) and collimated by the lens L_1 ($f_1 = 300$ mm), is focused into a line light through a pair of cylindrical lenses L_2, L_3 ($f_2 = f_3 = 200$ mm) and irradiates the $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal. On condition that the directions of line beam (f) and c -axis of the crystal are both parallel to the horizontal direction, we observe experimentally that the scattering light spreads gradually in the horizontal direction in the far field as irradiation time goes on. Then the scattering light reaches a steady state after 10 min. The scattering light beam is composed of vertical filaments. When the line beam is horizontal and the c -axis is vertical, the scattering light composed of horizontal filaments firstly appears in the vertical direction. About 30 min later, the scattering light appears and spreads along the horizontal direction to the far field as irradiation time goes on. At this time, the scattering light is also composed of vertical filaments. That is to say, we observe the scattering light whose direction is inconsistent with the c axis of the crystal. We also give the corresponding theoretical explanation to the phenomenon. We suppose that the line beam consists of many close-set thread-like sub-beams, which are vertical to the direction of the line beam. When the line beam irradiates the photorefractive crystal, the sub-beams record the gratings in the crystal according to photorefractive nonlinear effect. The gratings diffract the input beam. The scattering light and the incident beam interfere with each other, thereby recording the new grating. At the same time, the new gratings also diffract the incident beam. It goes full circle. So energy transfers from incident beam to the scattering light beam. The direction of the scattering light beam spreads along the direction of the line beam.

Keywords: nonlinear optics, photorefractive effect, light scattering

PACS: 42.65.-k, 42.65.Hw, 42.68.Mj

DOI: 10.7498/aps.66.084206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11304187, 11374108, 11404196, 11574185, 11404194), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015M582126), and the Science and Technology Plan Projects of Colleges and Universities of Shandong Province, China (Grant No. J14LA55).

† Corresponding author. E-mail: gaoyuanmei@sdsu.edu.cn