

LiNbO₃ 晶体界面非线性表面波的研究

陈卫军 卢克清 惠娟利 王春香 于会敏 胡凯

Study on nonlinear surface waves along the boundary of LiNbO₃ crystals

Chen Wei-Jun Lu Ke-Qing Hui Juan-Li Wang Chun-Xiang Yu Hui-Min Hu Kai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 014204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.014204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

MoS₂ 纳微薄膜激光非线性透射的调控研究

Research on the controllable nonlinear laser transmission properties of MoS₂ nano-micron film

物理学报.2015, 64(3): 034214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034214>

色散条件下各向同性光纤中拉曼增益对光脉冲自陡峭的影响

Effect of Raman gain on the self-steepening characteristic in isotropic fibers

物理学报.2014, 63(21): 214207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214207>

通信波长频率一致纠缠光源的频谱测量

Measurement of the spectral properties of the coincident-frequency entangled biphoton state at optical communication wavelength

物理学报.2014, 63(19): 194206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194206>

在远离光子晶体光纤零色散波长的正常色散区入射飞秒脉冲产生四波混频及孤子效应的实验研究

Experimental research of four-wave mixing and soliton effects in a photonic crystal fiber pumped femtosecond pulses at the wavelength located normal dispersion regime away from the zero dispersion point

物理学报.2014, 63(16): 164206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164206>

MoS₂ 溶液的波长选择性光限幅效应研究

Wavelength selective optical limiting effect on MoS₂ solution

物理学报.2014, 63(14): 144204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.144204>

LiNbO₃ 晶体界面非线性表面波的研究*陈卫军 卢克清[†] 惠娟利 王春香 于会敏 胡凯

(天津工业大学, 电子与信息工程学院, 天津 300387)

(2014年5月19日收到; 2014年7月6日收到修改稿)

理论和实验研究了扩散和光伏机理下 LiNbO₃ 晶体界面非线性表面波的传播. 改变传播常数可以得到不同振荡周期的表面波模, 光波的能量随传播常数的递增而单调地递增. 本文的实验结果与理论分析能很好地符合. 实验结果还表明, 增加入射光功率可缩短表面波的产生, 增大入射光束与晶体正 *c* 轴的夹角 (小于 90°) 可提高表面波的激发效率.

关键词: 非线性光学, 表面波, 激发效率

PACS: 42.65.-k, 42.65.Tg, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.64.014204

1 引言

光折变晶体中的空间孤子一直是国内外学者研究的热点, 迄今为止已发现的空间孤子主要包括屏蔽孤子^[1,2], 光伏孤子^[3-5], 屏蔽光伏孤子^[6-8], 光折变聚合孤子^[9,10]以及中心对称光折变晶体中的孤子^[11]等. 然而, 这些孤子都形成在光折变晶体内, 在光折变晶体与其他介质界面还存在着表面孤子^[12-14]和非线性表面波 (nonlinear surface waves, NSWs)^[15]. 其中, NSWs 是在界面处由晶体内载流子扩散机理引起的光束自弯曲和全内反射相平衡形成的一种光波. 它的主要特点是将光波传播限制在光折变晶体近表面 (微米量级) 的狭层内, 使得界面处具有很高的光能量和功率密度, 在表面波导制备、谐波产生、材料界面特性检测、光通信及光信息处理等方面具有很高的研究价值和应用价值^[16,17].

1995年 Garcia-Quirino 等首次提出了光折变表面波的概念^[18], 系统地论述了扩散机理下光折变表面波的传播情况^[19]. 2001年 Aleshkevich 等研究了线性介质与光折变晶体界面表面波的形成,

分析了表面波的传播稳定性, 指出表面波稳定性满足 Vakhitov-Kolokolov (VK) 判据^[20]. 2010年 Usievich 等通过实验详细研究了扩散机理下光折变晶体 SBN-75 与空气界面表面波的传播^[21]. 2013年 Yang 等首次在 LiNbO₃:Fe 晶体与空气界面观察到了亮表面波^[22]. 由于高激发效率的表面波在实际应用中具有功耗低, 速度快的优点, 所以研究如何提高表面波的激发效率成为表面波应用的重要前提之一. 目前, Usievich 等观察到的 SBN-75 晶体与金属界面表面波的激发效率最高可达 26.87%^[23]. 近年来, 对于 NSWs 的研究在理论与实验上都受到了极大关注^[24-30]. 但还未发现关于 LiNbO₃ 晶体界面 NSWs 的激发效率的研究.

本文对扩散和光伏机理下 LiNbO₃ 晶体界面的 NSWs 进行了理论和实验研究. 一方面, 采用数值方法对光的波动方程进行求解, 通过调节传播常数, 得到了不同振荡周期的表面波模, 分析了表面波的传播波形及光功率的变化. 另一方面, 搭建表面波激发光路, 通过实验对理论结果进行了验证. 此外, 根据实验结果研究了表面波功率的变化规律, 讨论了影响表面波激发效率的原因.

* 天津市自然科学基金 (批准号: 13JCYBJC16400) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: kqlutj@126.com

2 理论分析

假设一束光波在 LiNbO₃ 晶体界面沿 z 轴传播, 沿 x 轴方向衍射, 其中 x 轴右侧 ($x \geq 0$) 是空气, 左侧 ($x < 0$) 是 LiNbO₃ 晶体, 晶体的 c 轴平行于 x 轴. 在上述情况下, 光波满足的傍轴方程为^[20]

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2k_0} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2}, \quad x \geq 0, \quad (1a)$$

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2k_0} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - \frac{k^2 - k_0^2}{2k_0} A - \frac{k^2}{k_0 n} \Delta n A, \quad x < 0, \quad (1b)$$

上式中 A 为光波的复振幅包络, $k = 2\pi n_e / \lambda$ 为 LiNbO₃ 晶体中的波数, $k_0 = 2\pi n_0 / \lambda$ 为空气中的波数, n_e 和 n_0 分别为光波在 LiNbO₃ 晶体和空气中的折射率, λ 为入射光束的波长. $\Delta n = -n_e^3 r_{33} E_{sc} / 2$ 为晶体折射率的扰动, 其中 r_{33} 为电光系数, E_{sc} 为晶体中光波感应的空间电荷场. 根据 Kukhtarev-Vinetskii 带输运模型, 在无外加电场条件下, 考虑 LiNbO₃ 晶体中的光伏和扩散非线性, 空间电荷场 E_{sc} 的表达式为^[26]

$$E_{sc} = -E_p \frac{I}{I + I_d} + \frac{k_B T}{e(I/I_d + 1)} \frac{\partial(I/I_d)}{\partial x}, \quad (2)$$

其中, $I = |A|^2$ 表示光波的强度, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, e 为电子的电荷, I_d 为晶体中的暗辐射, E_p 为光伏场常数.

为了方便计算, 采用无量纲坐标, 横坐标和纵坐标分别为 $s = x/x_0$ 和 $\xi = z/(k_0 x_0^2)$, 其中 x_0 为任意空间宽度. 将 Δn 的表达式代入方程 (1) 可以得出光波包络 A 满足的演化方程

$$i \frac{\partial A}{\partial \xi} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial s^2}, \quad s \geq 0, \quad (3a)$$

$$i \frac{\partial A}{\partial \xi} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial s^2} - \delta A - \alpha \frac{I}{I + I_d} A + \frac{\mu}{(I/I_d + 1)} \frac{\partial(I/I_d)}{\partial s} A, \quad s < 0, \quad (3b)$$

这里, $\delta = (k^2 - k_0^2)x_0^2/2$ 为波导参数, $\alpha = x_0^2 k^2 n_e^2 r_{33} E_p / 2$ 和 $\mu = k_B T k^2 n_e^2 r_{33} x_0 / (2e)$ 分别代表非线性效应的光伏强度和扩散强度. 方程 (3b) 详细地描述了 LiNbO₃ 晶体中各非线性效应对光波的作用, 右端四项依次为晶体中光波的衍射效应、光束和边界的相互作用、光伏机理的自散焦和扩散机理的自弯曲效应. 光束以一定角度入射到 LiNbO₃

晶体界面处, 当电荷扩散效应产生的光束自弯曲与全内反射相平衡时, 在界面处可以产生自诱导的 NSWs. 对于像 LiNbO₃ 这样的光生伏打光折变晶体, 光激发载流子是电子, 取光伏强度 $\alpha < 0$ ^[3]. 本文中, LiNbO₃ 晶体的相关参数为: $r_{33} = 30$ pm/V; $n_e = 2.2$; $E_p = 5.24$ kV/cm, 其他参数取值为: $n_0 = 1$; $\lambda = 473$ nm; $x_0 = 30$ μ m; $T = 300$ K. 我们求得 $\alpha = -29.24$ 和 $\mu = 0.05$.

设光波振幅 $A = \sqrt{I_d} u(s) \exp(ib\xi)$, 其中 $u(s)$ 是光波的模, b 是传播常数, 将该表达式代入方程 (3) 得

$$\frac{d^2 u}{ds^2} = 2bu, \quad s \geq 0, \quad (4a)$$

$$\frac{d^2 u}{ds^2} = 2(b - \delta)u - 2\alpha \frac{u^3}{1 + u^2} + 4\mu \frac{du}{ds} \frac{u^2}{1 + u^2}, \quad s < 0, \quad (4b)$$

上述方程满足 u 和 du/ds 在界面 $s = 0$ 处的连续性. 对方程 (4a) 进行求解, 可以得到 $u(s) = m \exp[-(2b)^{1/2}s]$, 其中 m 为非线性作用强度的可变参量 (由入射光束初始强度决定). 方程 (4b) 无法求得解析解, 可进行数值求解. 通过调节参数 b , δ 和 m , 对方程 (4b) 进行数值积分, 在 LiNbO₃ 晶体界面可以得到不同模式的表面波. 我们通过数值计算得到传播常数取不同值时的表面波模如图 1 所示.

从图 1 (a) 可以看出, 表面波在 LiNbO₃ 晶体中沿着负 s 轴方向呈周期性的阻尼振荡形式, 具有较长的振荡末尾, 在空气中衍射衰减. 当波导参数 δ 和可变参量 m 一定时, 随着 b 值的逐渐增大 (见图 1 (b) 和 (c)), 表面波的振幅逐渐变大, 在空气中其衰减强度到坐标原点的距离逐渐减小, 同时, 表面波衰减振荡的周期 (相邻波峰或波谷间的距离) 逐渐变长.

光波功率的表达式为 $P = \int_{-\infty}^{\infty} u^2(s) ds$, 图 2 给出了光波功率随 b 值增大而变化的走势图, 可以看出, 光波功率随 b 值的增大而单调地递增. 此外, 随着光波功率的递增, 受扩散非线性的影响, 晶体内的表面波衰减的距离逐渐缩短, 大部分能量逐渐向晶体界面集中. 实验中, 主要通过控制入射光束与晶体正 c 轴的夹角 θ (在 $0^\circ - 90^\circ$ 范围内) 调节 b 值的大小, b 随 θ 的增大而增大^[21].

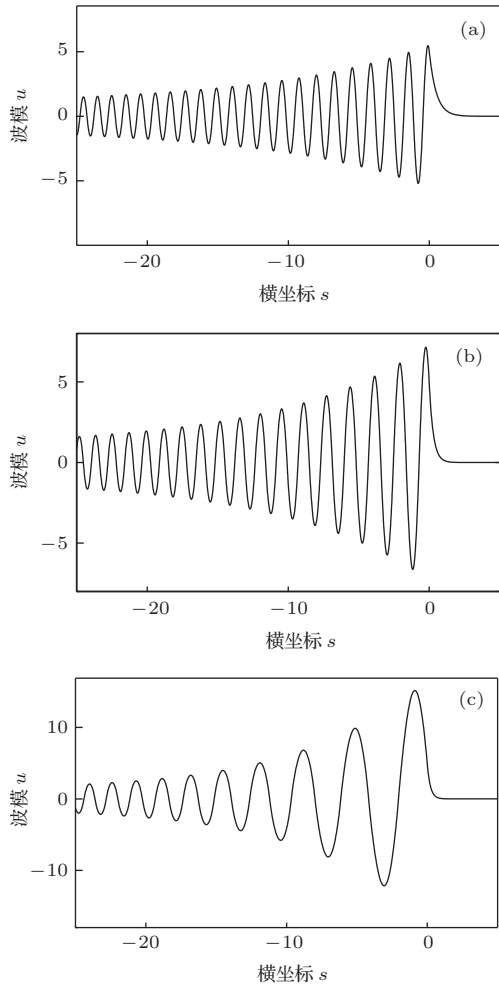


图1 传播常数 b 取不同值时的表面波模轮廓图 (系统参数: $m = 5, \delta = 40$) (a) $b = 2$; (b) $b = 6$; (c) $b = 10$

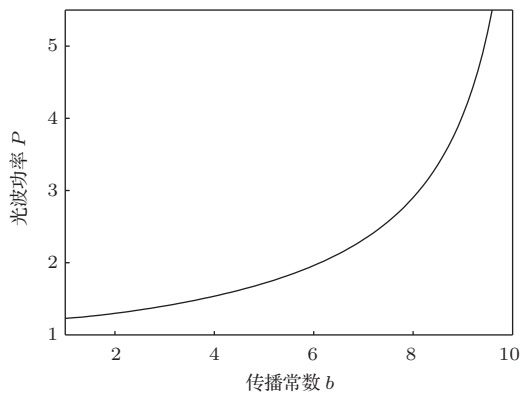


图2 光波功率随传播常数 b 变化的曲线

3 实验结果与讨论

为了观察不同入射角度的表面波, 分析表面波功率的变化情况, 我们做了如下实验, 实验中所用的晶体是折射率为负的 LiNbO_3 晶体, 其尺寸为 $6 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ($x \times y \times z$), 通光厚度为

10 mm.

激发光束来自一波长 $\lambda = 473 \text{ nm}$ 的连续固体激光器, 实验装置如图3所示. 激光器输出的蓝光平行于台面振动的e偏振光, 经平面镜反射, 小孔光阑滤掉杂散光后, 由可调中性密度衰减片控制入射光功率的大小, 再经过焦距 $f = 100 \text{ mm}$ 的透镜聚焦到晶体前表面的负c面(在晶体的正c面不能形成表面波^[21,22]), 焦点位于晶体前表面约2 mm处, 晶体置于旋转台上, 便于调节入射光束的角度. 通过放大倍率为10倍的显微物镜可以清晰地观察从晶体后表面出射的NSWs, 然后通过平面镜反射至CCD相机采集图像, CCD前面加衰减片的目的是防止采集图像时饱和溢出. 最后, 用计算机连接CCD获取采集的图像并提取表面波相关的特征.

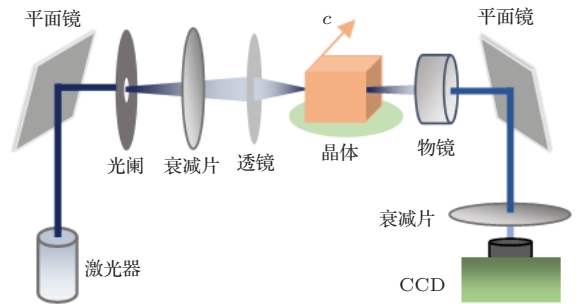


图3 表面波实验装置图

首先, 我们观察入射光功率 P_{in} 对表面波功率和形成时间的影响. 取光束入射角度 $\theta \approx 85^\circ$, 从晶体前表面测量的入射光功率范围为0.9—5 mW, P_{out} 是用光功率计在物镜后测量的表面波达到稳态时的功率, t 是产生稳态表面波的时间, 结果如图4所示.

从图4(a)可以看出, 表面波功率 P_{out} 与入射光功率 P_{in} 呈线性增长趋势, 斜率即为激发效率(保持不变), 约为12.77%. 从图4(b)可以看出, 表面波的形成时间 t 随 P_{in} 的增大而减小, 这主要是由于入射光功率增大时, 晶体内载流子的扩散效应随之增强, 使得光束的自弯曲与全内反射更快地平衡. 因此, 增加入射光功率, 可缩短表面波的形成时间, 提高表面波功率, 但不影响表面波的激发效率.

接下来我们研究夹角 θ 对表面波激发效率的影响, 实验中采用入射光功率 $P_{\text{in}} = 5 \text{ mW}$. 光束从晶体负c面斜入射, 当 θ 取不同值时, 我们观察到了不同的表面波模, 如图5所示.

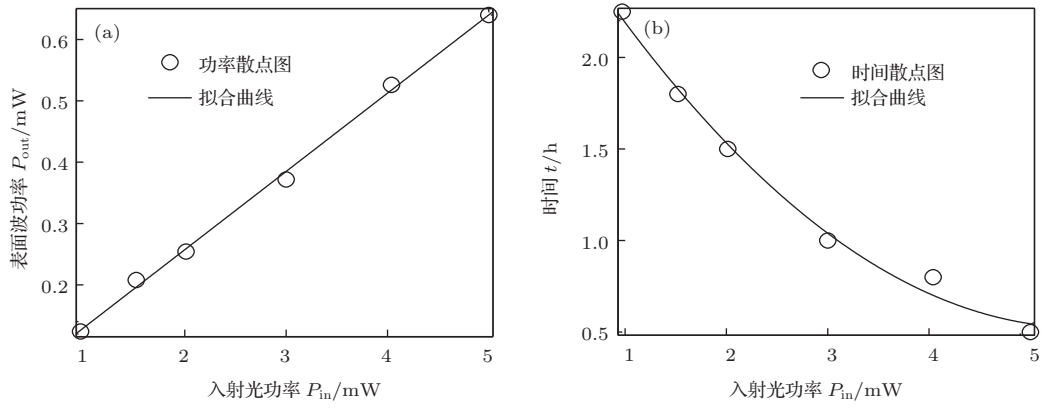


图4 (a) 表面波功率和(b) 表面波形成时间随入射光功率变化关系图(圈为实验数据点, 实线为拟合曲线)

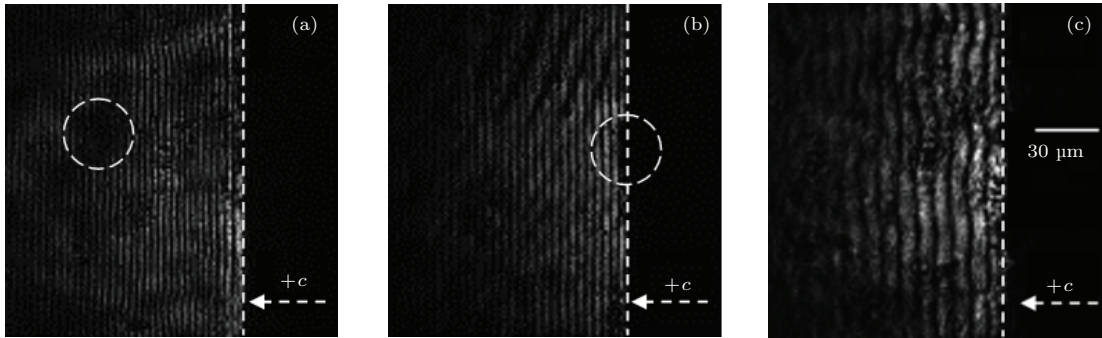


图5 入射角度取不同值时观察到的NSWs(图中白色虚线表示晶体的界面位置, (a)和(b)中虚线圈内分别为晶体内的缺陷和边界处的缺口) (a) $\theta = 76^\circ$; (b) $\theta = 81^\circ$; (c) $\theta = 87^\circ$

从图5可以看出, 随着入射角度 θ 的增加, 表面波的衰减振荡周期逐渐变大, 该结果与图1中的理论结果相符合. 使用光功率计测得的表面波功率 P_{out} 结果分别为(a) 0.364 mW, (b) 0.536 mW, (c) 0.803 mW, 对应的激发效率分别为(a) 7.28%, (b) 10.72%, (c) 16.06%. 因此, 表面波的激发效率随 θ 的增大而增大. 根据图6中表面波功率与夹角 θ 的拟合曲线可以判断, 表面波功率随 θ 的递增而单调地递增, 该结果与图2中的理论分析很好地符合. 当入射光束与晶体正 c 轴方向夹角为钝角时, 由于扇形效应入射光束进入晶体后主要沿正 c 轴方向扩散, 而沿负 c 轴方向扩散的能量非常少^[21], 不能形成表面波. 所以, 当光束掠入射至LiNbO₃晶体负 c 面时, 表面波的激发效率可达到最大. 我们观察了 $\theta \approx 90^\circ$ 时形成的表面波, 测量其功率约为1.043 mW, 激发效率超过20%, 这是目前为止实验得到LiNbO₃晶体界面NSWs的最高激发效率.

此外, 实验中影响表面波激发效率的原因主要还有以下两方面: 其一, 晶体前表面对入射光的反射造成大量的光波能量损失. 其二, 由于实验中用

到的LiNbO₃晶体存在结构性损伤(磨损或晶体生长引起), 在晶体内和边界处分别形成一些缺陷和缺口(见图5(a)和(b)中的虚线圈), 这使得表面波能量可能会由于散射和吸收造成不必要的损失. 因此, 图5中我们观察到在晶体内和边界处存在暗斑. 若采用更为理想的LiNbO₃晶体, 我们预测表面波的激发效率还将提高.

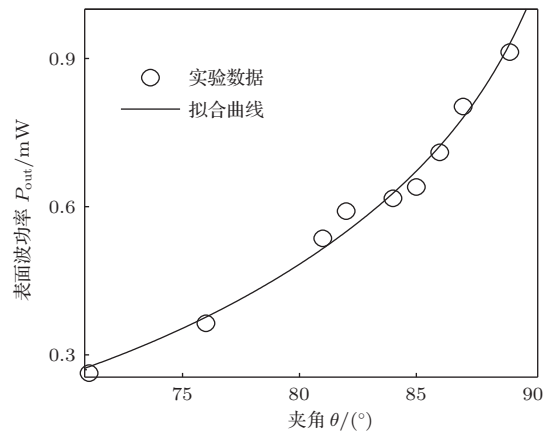


图6 表面波功率随入射角 θ 变化关系图(圈为实验数据点, 实线为拟合曲线)

4 结 论

理论和实验研究了扩散和光伏机理下LiNbO₃晶体界面NSWs的形成及其能量变化,理论分析表明:改变传播常数可得到不同振荡周期的表面波模,表面波在LiNbO₃晶体中沿负 s 轴呈周期性的阻尼振荡形式,在空气中衍射衰减.在给定波导参数 δ 和可变参量 m 的条件下,传播常数 b 增大时,表面波的衰减振荡周期变长,振幅变大.表面波的分布主要集中在LiNbO₃晶体中,表面波功率随传播常数的增大单调地递增.实验观察了不同入射角度的表面波,测量了表面波功率,结果与理论分析相符合.另外,实验结果还表明:增加入射光功率可缩短表面波的产生时间,提高出射的表面波功率,但不影响表面波激发效率;增大入射光束与LiNbO₃晶体正 c 轴的夹角 θ (小于90°)可提高表面波的激发效率,光束沿LiNbO₃晶体负 c 面掠入射时表面波的激发效率达到最大,实验得出当 $\theta \approx 90^\circ$ 时,激发的表面波功率约为1.043 mW,激发效率超过20%.

参考文献

- [1] Segev M, Valley G C, Crosignani B, Porto P Di, Yariv A 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 3211
- [2] She W L, Chan C W, Lee W K 2001 *Opt. Lett.* **26** 1093
- [3] Segev M, Valley G C, Bashaw M C, Taya M, Fejer M M 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 1772
- [4] Lu K Q, Tang T T, Zhang Y P 2000 *Phys. Rev. A* **61** 053822
- [5] Wang H C, She W L 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 128
- [6] Liu J S, Lu K Q 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 550
- [7] Fazio E, Renzi F, Rinaldi R, Bertolotti M, Chauvet M, Ramadan W, Petris A, Vlad V I 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2193
- [8] Konar S, Soumendu J, Shwetanshumala S 2007 *Opt. Commun.* **273** 324
- [9] Sheu F W, Shih M F 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 785
- [10] Lu K Q, Li K H, Zhang Y P, Yuan C Z, Miao C Y, Chen L, Xu J J 2010 *Opt. Commun.* **283** 4741
- [11] Segev M, Agranat A J 1997 *Opt. Lett.* **22** 1299
- [12] Alfassi B, Rotschild C, Manela O, Segev M, Christodoulides D N 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 213901
- [13] Zhao C, Ma X K, Wang J, Lu D Q, Hu W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094213 (in Chinese) [赵璨, 马学凯, 王靖, 陆大全, 胡巍 2013 物理学报 **62** 094213]
- [14] Yin G Y, Zheng J B, Yang X Y, Dong L W 2010 *Chin. Phys. B* **19** 044206
- [15] Cronin-Golomb M 1995 *Opt. Lett.* **20** 2075
- [16] Liu S M, Zhang G Q, Sun Q, Xu J J, Zhang G Y, Tong Y C 1996 *Chin. Phys. Lett.* **13** 737
- [17] Kang H Z, Zhang T H, Ma H H, Lou C B, Liu S M, Tian J G, Xu J J 2010 *Opt. Lett.* **35** 1605
- [18] Garcia-Quirino G S, Sanchez-Mondragon J J, Stepanov S 1995 *Phys. Rev. A* **51** 1571
- [19] Garcia-Quirino G S, Sanchez-Mondragon J J, Stepanov S 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 2530
- [20] Aleshkevich V A, Kartashov Y. V, Egorov A A, Vysloukh V A 2001 *Phys. Rev. E* **64** 573
- [21] Usievich B A, Nurligareev D K, Sychugov V A, Ivleva L I, Lykov P A, Bogodaev N V 2010 *Quantum Electron.* **40** 437
- [22] Yang D P, Chen Z P, Zhao F, Yu H Y, Zhang T H, Tian J G, Xu J J 2013 *Opt. Lett.* **38** 3093
- [23] Usievich B A, Nurligareev D K, Sychugov V A, Ivleva L I, Lykov P A, Bogodaev N V 2011 *Quantum Electron.* **41** 262
- [24] Chen W J, Lu K Q, Hui J L, Feng T R, Liu S Q, Niu P J, Yu L Y 2013 *Opt. Express.* **21** 15595
- [25] Sun T T, Lu K Q, Chen W J, Yao F X, Niu P J, Yu L Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 030303 (in Chinese) [孙彤彤, 卢克清, 陈卫军, 姚风雪, 牛萍娟, 于莉媛 2013 物理学报 **62** 030303]
- [26] Luo Z H, Liu F L, Xu Y H, Liu H Y, Zhang T H, Xu J J, Tian J G 2013 *Opt. Express.* **21** 15075
- [27] Lu K Q, Wang C X, Lu P Y, Chen W J, Zhang Y Q, Zhang Y P 2013 *Opt. Commun.* **295** 203
- [28] Kartashov Y V, Vysloukh V A, Torner L 2008 *Opt. Lett.* **33** 773
- [29] Shen M, Ruan L X, Chen X, Shi J L, Ding H X, Xi N, Wang Q 2010 *J. Opt.* **12** 085201
- [30] Feng T R, Lu K Q, Chen W J, Liu S Q, Niu P J, Yu L Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 234205 (in Chinese) [冯天闰, 卢克清, 陈卫军, 刘书芹, 牛萍娟, 于莉媛 2013 物理学报 **62** 234205]

Study on nonlinear surface waves along the boundary of LiNbO₃ crystals*

Chen Wei-Jun Lu Ke-Qing[†] Hui Juan-Li Wang Chun-Xiang Yu Hui-Min Hu Kai

(Institute of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

(Received 19 May 2014; revised manuscript received 6 July 2014)

Abstract

The propagation of nonlinear surface waves along the boundary of LiNbO₃ crystals with diffusion and photovoltaic nonlinearities is investigated theoretically and experimentally. Surface waves with different oscillating period are obtained by changing the values of the propagation constant, and the energy of surface waves would increase monotonically with the propagation constant. Our experimental results are in good agreement with the theoretical analysis. Experimental results show also that the generation of surface waves can be shortened by increasing the power of the input beam; and the excitation efficiency of the surface waves can be enhanced by increasing the angle (less than 90 degree) between the input beam and the crystal *c*-axis.

Keywords: nonlinear optics, surface waves, excitation efficiency

PACS: 42.65.-k, 42.65.Tg, 42.60.Lh

DOI: [10.7498/aps.64.014204](https://doi.org/10.7498/aps.64.014204)

* Project supported by the Natural Science Foundation of Tianjin Province, China (Grant No. 13JCYBJC16400).

† Corresponding author. E-mail: kqlutj@126.com