

波导参数和传播常数对光折变表面波的影响

田宁 卢克清 张先锋 陈卫军 孙彤彤 姚风雪

(天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300160)

摘要 基于质点振荡的模型和数值模拟的方法,研究了波导参数和传播常数对光折变晶体与线性电介质界面光折变表面波类型和局域表面波模的影响。当波导参数大于传播常数时,在光折变晶体与线性电介质界面可以产生非局域表面波。当波导参数小于传播常数时,在光折变晶体与线性电介质界面可以产生振荡表面波和局域表面波。在局域表面波形成的系统内,正波导参数的光波能量比负波导参数的光波能量在光折变晶体内聚集得多。在给定一个局域表面波形成的物理系统,传播常数越大,表面波在线性电介质和光折变晶体中衰减就越快,对应表面波模的波峰离界面就越近。

关键词 非线性光学;表面波;质点振荡模型;表面波模;传播常数

中图分类号 O437.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0117002

Influence of Guiding Parameters and Propagation Constants on Photorefractive Surface Waves

Tian Ning Lu Keqing Zhang Xianfeng Chen Weijun Sun Tongtong Yao Fengxue
(School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract In terms of the particle oscillator model and numerical techniques, the influences of guiding parameters and propagation constants on surface wave types and localized surface modes at the interface between the photorefractive crystal and the linear dielectric medium are studied. When the guiding parameter is greater than the propagation constant, delocalized surface waves can occur at the interface between photorefractive crystal and linear dielectric medium. When the guiding parameter is less than the propagation constant, shock surface waves and localized surface waves can occur at the interface between photorefractive crystal and linear dielectric medium. In localized surface wave systems, the wave energy in the photorefractive crystal for the positive guiding parameter is more collective than the one for the negative guiding parameter. For a given physical system of the localized surface wave, the higher the propagation constant, the faster the surface wave attenuation in the linear dielectric medium and the photorefractive crystal, and the closer the crest factor of corresponding surface mode toward the boundary.

Key words nonlinear optics; surface waves; particle oscillator model; surface modes; propagation constants

OCIS codes 190.4350; 190.5530; 190.4360

1 引言

光折变效应是光致折射率改变的简称^[1~3]。光折变空间孤子是光束在光折变材料中光折变效应与光束衍射发散作用相互平衡而形成的一种无衍射向前传播的光束,由于它在光信息处理、光开关、光集成、光互联及光计算等方面具有广阔的潜在应用前景,因而已成为近年来非线性光学领域的一个研究

热点^[4~8]。另一方面,光折变表面波是在光折变晶体与其他介质(如空气、金属、电介质、另一种光折变晶体等)的界面形成和传播的光波,它能把能量约束在晶体表面的薄层上,在这个薄层上有很高的光能量和功率密度,能使界面的各种光学非线性效应得到显著的增强和利用,有其广阔的应用价值和研究价值^[9~11]。

收稿日期: 2011-06-14; **收到修改稿日期**: 2011-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(10674176)资助课题。

作者简介: 田宁(1985—),男,硕士研究生,主要从事光折变表面波方面的研究。E-mail: tianning2011@163.com

导师简介: 卢克清(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: keqinglu@opt.ac.cn

(通信联系人)

1994年 Ron 等^[12]研究了扩散机制下光在线性介质和光折变晶体界面传播时的光波性质,提出了在线性介质和光折变晶体界面形成表面波的可能性。1995年 Quirino 等^[13]系统地论证了光折变表面波的存在,首次从理论上明确提出了光折变表面波的概念,给出了扩散机制下光折变表面波的解析解和3种典型介质界面(理想金属-光折变晶体、线性电介质-光折变晶体、光折变晶体-光折变晶体)光折变表面波的传播情况,还计算了表面波在介质中的贯穿深度等。此后国内外研究人员对表面波的形成、传播、稳定性等进行了系统的理论和实验研究^[14~16]。

光折变表面波有扩散、漂移、光伏3种激发机制^[17]。本文基于质点振荡模型和应用数值模拟的方法,分析了光折变晶体和线性电介质界面光折变表面波的形成和传播,讨论了波导参数和传播常数对光折变晶体与线性电介质界面表面波类型和局域表面波模的影响,给出了扩散和漂移机制下光折变局域表面波的各阶模。

2 理论模型

假设一光束在线性电介质和光折变晶体界面沿 z 方向传播,该光束具有低的强度,只沿 x 方向进行衍射。在 x 方向左侧($x < 0$)为非线性光折变晶体,右侧($x \geq 0$)为线性电介质。在这种情况下,这束光满足傍轴方程^[14,18~20]:

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

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2k_0} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - \frac{k^2 - k_0^2}{2k_0} A + \frac{k^2 n_c^2 r_{33} E_{sc}}{2k_0} A, x < 0 \quad (2)$$

式中 A 为光场慢变化振幅, r_{33} 为有效电光系数, E_{sc} 为光波感应的空间电荷场, $k_0 = \frac{\omega n_0}{c}$ 和 $k = \frac{\omega n}{c}$ 分别为线性电介质和光折变晶体中的光波数, n_0 为线性电介质中光的折射率, n 为晶体中没有扰动的线性折射率。根据 Kukhtarev-Vinetskii 的带运输模型,考虑扩散和漂移机制,这束光感应的空间电荷场为 $E_{sc} = E_0 \left(1 - \frac{I}{I_d}\right) + \frac{K_B T}{e} \frac{\partial(I/I_d)}{\partial x}$ ^[20,21], 其中 E_0 为外加电场, I 为光束的强度, I_d 为暗辐射度, K_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度。将空间电荷场 E_{sc} 代入(2)式得

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

$$i \frac{\partial q}{\partial \xi} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial s^2} - pq - |q|^2 q + \mu \frac{\partial |q|^2}{\partial s} q, x < 0 \quad (4)$$

式中 $q = A(E_0 x_0^2 k^2 n_c^2 r_{33})^{1/2}$ 为无量纲光波振幅, $\xi = \frac{z}{k_0 x_0^2}$ 和 $s = \frac{x}{x_0}$ 分别为规范化纵坐标和横坐标, 系数 $p = \frac{x_0^2(k^2 - k_0^2)}{2} - \frac{x_0^2 E_0 k^2 n_c^2 r_{33}}{2}$ 表示波导参数, $\mu = \frac{K_B T}{e x_0 E_0}$ 表示非线性响应中扩散部分的相对强度。(4)式很好地描述了光折变晶体中各种非线性效应对光波的作用,右端各项依次表示光折变晶体中光波衍射的色散、有导向结构(边界)的折射、漂移机制的自聚焦、扩散机制的自弯曲效应^[14,17]。

3 表面波

以铌酸锶钡(SBN)为例,相关参数假设为 $\lambda = 633 \text{ nm}$, $x_0 = 50 \text{ }\mu\text{m}$, $r_{33} = 2.35 \times 10^{-10} \text{ m/V}$, $n_c = 2.33$, $E_0 = 6 \times 10^3 \text{ V/m}$, $T = 300 \text{ K}$ 。为了找到(2)式表面波的解,展开无量纲光波振幅 $q = u(s) \exp(ib\xi)$, 其中 b 为传播常量。这样,由(3)和(4)式得

$$\frac{d^2 u}{ds^2} = 2bu, s \geq 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^2 u}{ds^2} = 2(b-p)u - 2u^3 + 4\mu u \frac{du}{ds}, s < 0 \quad (6)$$

由此易得(5)式的解为 $u(s) = m \exp[-(2b)^{1/2}s]$, 其中 m 表示非线性作用强度的任意参量(由入射光束初始振幅确定)。用打靶法,能够求出(6)式的数值解。采用文献[14]的方法,对(6)式进行转换得

$$\frac{d(T+U)}{ds} = 4\mu u \left(\frac{du}{ds}\right)^2, \quad (7)$$

式中 $U = (p-b)u^2 + \frac{1}{2}u^4$ 相当于运动质点的势能, $T = \frac{1}{2}\left(\frac{du}{ds}\right)^2$ 相当于运动质点的动能。(7)式右端项相当于质点振荡模型中的非线性摩擦力,该摩擦力与质点运动速度 $\left(\frac{du}{ds}\right)$ 的平方成正比。根据振荡理论,势能 U 应关于平衡位置($u = 0$)对称。波导参数 p 和传播常数 b 的大小将直接影响势能 U 的变化。图1给出了在平衡位置一侧波导参数 p 和传播常数 b 不同值时势能 U 和质点振幅 u 的变化情况,在做图中均采用无量纲单位。

由图1可以看出,当 $p > b$ 时,势能 U 在质点远离平衡位置的过程中是一直增大的,只在平衡位置处($u = 0$)有一个稳定驻点 $\left(\frac{dU}{du} = 0\right)$ 。根据振动理

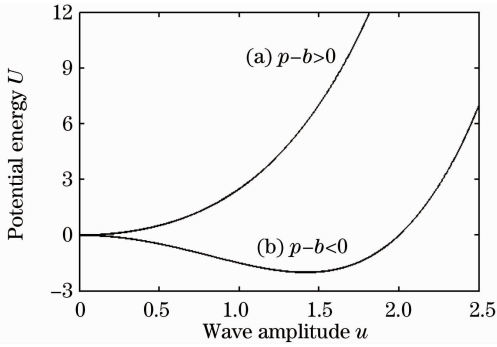


图 1 波导参数 p 与传播常数 b 不同值时势能 U 的变化轮廓图

Fig.1 Profiles of the potential U for different values of guiding parameter p and propagation constant b

论,在质点运动过程中动能和势能将周期性地相互转化,由于摩擦力的存在,其动能将逐渐减小,直到不能支持质点越过驻点为止。光波在光折变晶体与线性介质界面的传播类似于质点振荡模型,在界面附近光波振幅振荡衰减,形成表面波。这种情况下形成的表面波在光折变晶体内有长的振荡末尾,被称为非局域表面波^[13],如图 2 所示。从图 2 可以看出,非局域表面波在光折变晶体中传播时,光波振幅非常缓慢地衰减,振幅越来越小,最后光波停留在平衡位置。

图 1 中的另一种情况为 $p < b$ 。势能 U 在质点远离平衡位置的过程中是先减小后增大的。在这种

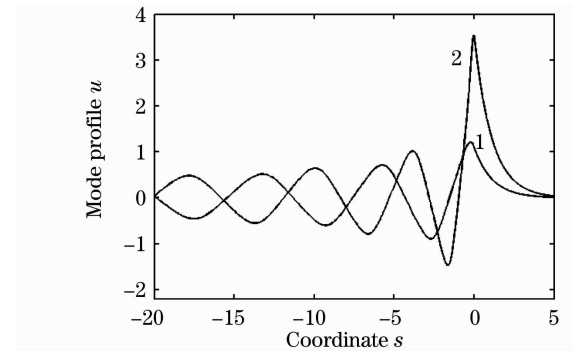
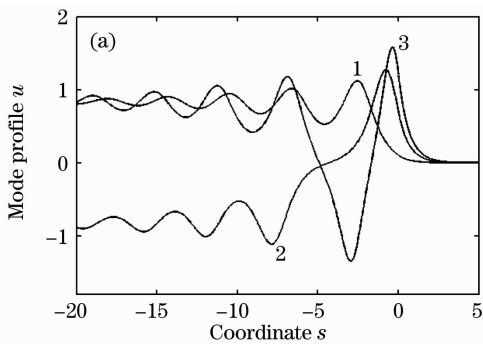


图 2 当任意参量 m 为 1.1 和 3.5 时非局域表面波模的轮廓图。系统参数: $p=0.5, b=0.4, \mu=0.3$

Fig.2 Profiles of the delocalized surface waves with free parameters m is 1.1 and 3.5. The system parameters are $p=0.5, b=0.4$ and $\mu=0.3$

情况下,图 1 给出了势能 U 有 2 个驻点,一个是 $u > 0$ 点的驻点,另一个是 $u = 0$ 点的驻点。考虑到势能关于坐标轴的对称性,这时还有一个 $u < 0$ 点的驻点。当初始能量 $U + T \neq 0$ 时,质点从势井的一边到另一边来回运动。由于非线性摩擦力的作用,这个质点将不断地损失本身的能量。当运动能量对通过不稳定点 $u = 0$ 变得太小时,这个质点不是逐渐接近不稳定点 $u = 0$,就是保持在势井的一边,而逐渐接近稳定点 $u \neq 0$ 。这样,在不稳定点 $u = 0$ 就形成振荡表面波。图 3 给出了不同任意参量 m 光波收敛在系统两个稳定驻点时形成振荡表面波模的轮廓图。

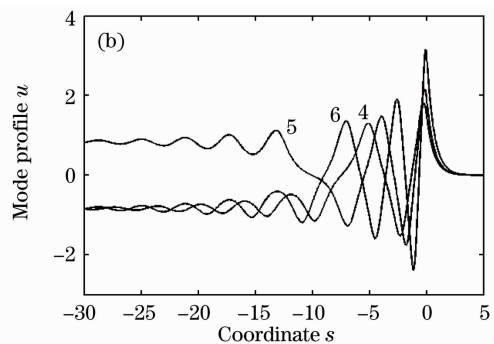


图 3 当任意参量(a) m 为 0.1、0.7、1.2 时 1~3 阶和(b) m 为 1.5、1.9、3.0 时 4~6 阶振荡表面波模的轮廓图
系统参数: $p=0.5, b=1.2, \mu=0.1$

Fig.3 Profiles of shock surface waves of the (a) first three orders when m is 0.1, 0.7, and 1.2 and (b) second three orders when m is 1.5, 1.9 and 3.0. The system parameters are $p=0.5, b=1.2$ and $\mu=0.1$

在空间谱中,这种振荡表面波有零谐波,由于调制不稳定的影响,它们是极不稳定的^[14]。如果按照光波任意参量 m 从小到大对其模进行排序依次标注为一阶表面波、二阶表面波等,连续相邻阶数的振荡表面波总是交替地收敛于系统的两个稳定性驻点,而且它们通过平衡位置的次数也是依次递增的。由于系统的两个稳定性驻点是关于平衡位置($u =$

0)对称的,相邻阶振荡表面波的两个振幅之间必定有一个振幅值使光波最后收敛于平衡位置,如图 4~6 所示。在这种情况下形成的表面波称为局域表面波,产生局域表面波仍然要求 $p < b$ 。如果波导参数 p 的符号为正,传播常数 b 必须大于 p (图 4)。如果波导参数 p 的符号为负,则 $b > 0$ 的任意 b 均可满足条件(图 5 和图 6)。注意:波导参数 p

的正负与光波在线性电介质和光折变晶体中的波数以及外电场有关。

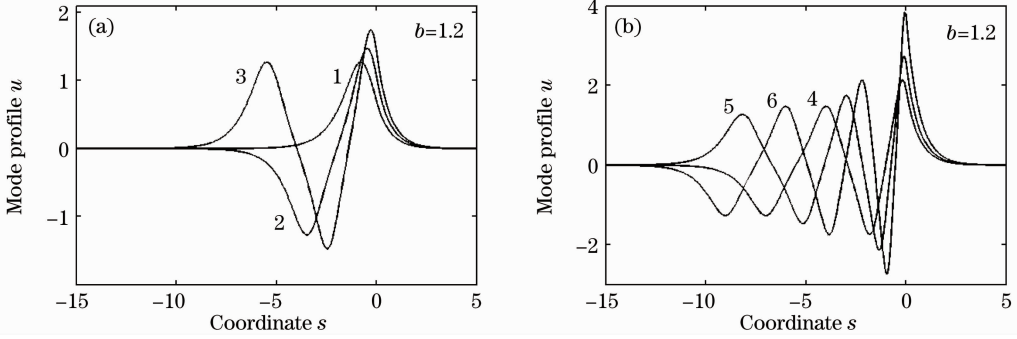


图 4 当任意参量(a) m 为 0.694695、1.04491、1.415399 时 1~3 阶和(b) m 为 1.88004、2.549206、3.70736 时 4~6 阶局域表面波模的轮廓图。系统参数： $p=0.5$ ， $\mu=0.1$

Fig. 4 Profiles of localized surface waves of the (a) first three orders when m is 0.694695, 1.04491, and 1.415399 and (b) second three orders when m is 1.88004, 2.549206, and 3.70736. The system parameters are $p=0.5$ and $\mu=0.1$

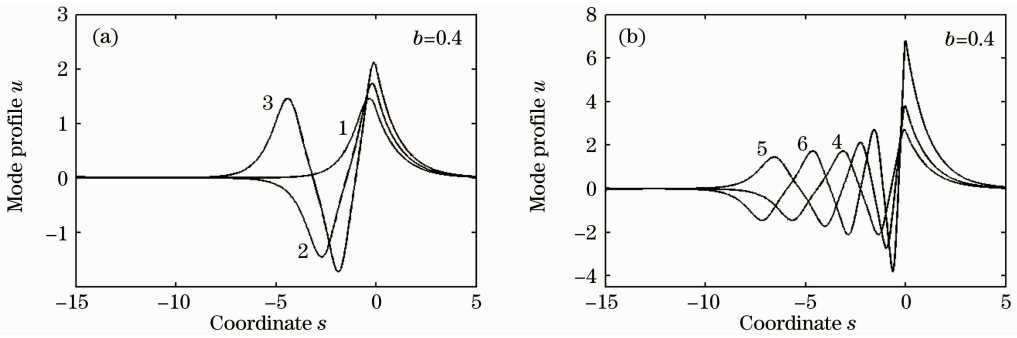


图 5 当任意参量(a) m 为 1.25463、1.58961、2.01762 时 1~3 阶和(b) m 为 2.649601、3.76513、6.76800 时 4~6 阶局域表面波模的轮廓图。系统参数： $p=-0.5$ ， $\mu=0.1$

Fig. 5 Profiles of localized surface waves of the (a) first three orders when m is 1.25463, 1.58961, and 2.01762 and (b) second three orders when m is 2.649601, 3.76513, and 6.76800. The system parameters are $p=-0.5$ and $\mu=0.1$

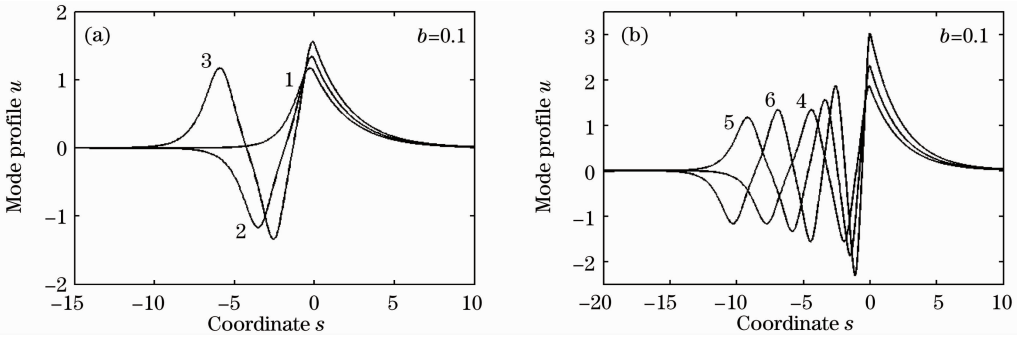


图 6 当任意参量(a) m 为 1.099185、1.28734、1.52215 时 1~3 阶和(b) m 为 1.835325、2.27、3.01145 时 4~6 阶局域表面波模的轮廓图。系统参数： $p=-0.5$ ， $\mu=0.1$

Fig. 6 Profiles of localized surface waves of the (a) first three orders when m is 1.099185, 1.28734, and 1.52215 and (b) second three orders when m is 1.835325, 2.27, and 3.01145. The system parameters are $p=-0.5$ and $\mu=0.1$

模型中波导参数 p 影响表面波的传播和振幅的衰减。通过对比图 4 和图 5 可知，当波导参数 p 为负值时，光波在线性电介质中衰减得更慢，有一个长长的拖尾，这说明光波在线性电介质中传播的时间更长，能量也较多地集中在线性电介质中。相反波导参数 p 为正值时，光波的能量则更多地集中在光折变

晶体中。因此实际应用中可以通过控制波导参数（外电场）来调节光束传播和能量在光折变晶体与线性电介质中的分布。

传播常数 b 影响表面波的传播波形，特别是线性电介质中的表面波波形 $u(s) = m \exp[-(2b)^{1/2} s]$ 。图 5 和图 6 给出了不同传播参数下前 6 阶表面波模的

轮廓,通过对比图 5 和图 6 可知,传播常数 b 越小,光波在线性电介质和光折变晶体中衰减得就越慢,其传播的时间和距离都会相应地增加。对于确定的传播常数 b 和波导参数 p ,一阶表面波模的外形对称于界面位置。由于扩散非线性的影响,随着表面波阶数的增加其外形也越来越不对称($s = 0$)。同时还发现,传播常数 b 变小时,对应各阶表面波模轮廓的波峰位置逐渐远离界面位置,其形成各阶表面波所要求的任意参量 m 均有不同程度的减小。

4 结 论

基于质点振荡的模型对界面低振幅非局域表面波、振荡表面波、局域表面波进行了数值模拟,发现波导参数与传播常数不同值时可以在线性电介质和光折变晶体界面形成不同类型的表面波,波导参数 p 大于传播常数 b 时可以在界面形成非局域表面波,波导参数 p 小于传播常数 b 时能形成振荡表面波和局域表面波。波导参数 p 影响界面表面波传输和能量分布,传播常数 b 影响表面波的波形。在一个给定的物理系统中,可以通过调节波导参数与传播常数来得到不同类型的表面波,通过控制任意参量 m 来得到不同阶数局域表面波模以及表面波的传播波形。

参 考 文 献

- 1 She Weilong, C. W. Chan, W. K. Lee. Dark and bright photovoltaic spatial solitons in photorefractive crystals with positive refractive-index perturbation [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14): 1093~1095
- 2 Zhao Jianlin, Li Jifeng, Xiang Hongli *et al.*. Polarization-dependent diffraction efficiency of a photorefractive volume grating and suppression of this efficiency[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(15): 3013~3018
- 3 Lu Keqing, Li Jinping, Zhao Wei *et al.*. Evolution of bright-dark vector spatial solitons in biased photorefractive-photovoltaic crystals[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 323~326
卢克清, 李金萍, 赵 卫等. 有偏压光伏光折变晶体中明暗矢量孤子的演化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 323~326
- 4 Zhang Yu, Hou Chunfeng, Wang Fei *et al.*. Temperature effects on the screening spatial solitons in two-photon photorefractive media[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 866~871
张 宇, 侯春风, 王 飞等. 双光子光折变介质中屏蔽空间孤子的温度特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 866~871
- 5 Ji Xuanmang, Jiang Qichang, Liu Jinsong. Separate screening-photovoltaic soliton pairs in series two-photon photorefractive crystal circuit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2370~2376
吉选芒, 姜其畅, 刘劲松. 双光子光折变晶体串联回路中独立屏蔽光伏孤子对[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2370~2376
- 6 Cui Junjie, Yang Lisen, Zhang Baoguang *et al.*. The research of fabricating two-dimensional photorefractive photonic lattice within

- linear-defect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3452~3457
崔俊杰, 杨立森, 张宝光等. 具有线缺陷二维光折变光子晶格的制备研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3452~3457
- 7 Xiao Yi, Chen Zhe, Yu Jianhui *et al.*. Propagation of spatial optical solitons at an oblique angle of incidence to nonlocal nonlinear interfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0519001
肖 毅, 陈 哲, 余健辉等. 孤子光束倾斜入射非局域非线性界面的传输特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0519001
- 8 Zeng Chunxiang, Wang Xinghua, Xie Liangxing *et al.*. 1 + 2-dimensional super Gaussian nonlocal spatial soliton[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 213~216
曾春香, 王形华, 谢良星等. 1+2 维超高斯型非局域空间光孤子[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 213~216
- 9 Wang Xiaosheng, Anna Bezryadina, Chen Zhigang *et al.*. Observation of two-dimensional surface solitons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(12): 123903
- 10 Shi Zuoqiang, Wang Jiandong, Chen Zhigang *et al.*. Linear instability of two-dimensional low-amplitude gap solitons near band edges in periodic media[J]. *Phys. Rev. A.*, 2008, **78**(6): 063812
- 11 Dong Liangwei, Li Huijun. Surface solitons in nonlinear lattices [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(6): 1179~1183
- 12 Daisy Ron, Fischer Baruch. Light waves at the interface of linear and photorefractive media [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(6): 1059~1063
- 13 G. S. Garcia Quirino, J. J. Sanchez-Mondragon, S. Stepanov. Nonlinear surface optical waves in photorefractive crystals with a diffusion mechanism of nonlinearity[J]. *Phys. Rev. A.*, 1995, **51**(2): 1571~1577
- 14 V. Aleshkevich, Y. Kartashov, A. Egorov *et al.*. Stability and formation of localized surface waves at the dielectric-photorefractive crystal boundary [J]. *Phys. Rev. E.*, 2001, **64**(5): 056601
- 15 V. A. Aleshkevich, V. A. Vysloukh, Y. V. Kartashov. Optical surface waves at the interface between a linear dielectric and a photorefractive crystal [J]. *Quantum Electron.*, 2000, **30**(10): 905~910
- 16 Zhang Tianhao, Shao Weiwei, Li Kun *et al.*. TE, TM modes photorefractive surface waves and their coupling [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**: 1286~1292
- 17 T. H. Zhang, X. K. Ren, B. H. Wang *et al.*. Surface waves with photorefractive nonlinearity [J]. *Phys. Rev. A.*, 2007, **76**(1): 013827
- 18 Zhang Duying, Liu Jinsong, Liang Changhong. Solitary evolution of Gauss beam in photovoltaic-photorefractive crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 647~651
张都应, 刘劲松, 梁昌洪. 高斯光束在光伏光折变晶体中的孤波演化[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 647~651
- 19 Liu Jinsong, Lu Keqing. Spatial solitaire wave in biased photovoltaic photorefractive crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(9): 1509~1514
刘劲松, 卢克清. 外加电场的光伏光折变晶体中的空间孤子波 [J]. *物理学报*, 1998, **47**(9): 1509~1514
- 20 Zhang Yu, Hou Chunfeng, Sun Xiudong. Temperature effect on the photovoltaic spatial solitons in two-photon photorefractive media [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 694~697
张 宇, 侯春风, 孙秀冬. 温度对双光子光折变介质中光伏孤子特性的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 694~697
- 21 D. N. Christodoulides, M. I. Carvalho. Bright, dark, and gray spatial soliton states in photorefractive media [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(9): 1628~1633