

文章编号: 1001 - 9014(2008)01 - 0060 - 05

TE 和 TM 模式光折变表面波

张天浩, 李坤, 邵伟伟, 宋伟, 张博, 王秉慧,
胡志健, 任相魁, 朱宝刚, 张力舟, 许京军

(南开大学物理科学学院光子学中心, 弱光非线性光子学教育部重点实验室,
天津市信息光子材料与技术重点实验室, 天津 300071)

摘要:首次研究了 TM 模的光折变表面波, 理论上分别推导了扩散机制下的 TE 和 TM 模式的光折变表面波的非线性波方程. 通过数值计算分别得到不同传播常数下两种模式光折变表面波振幅空间分布. 对 TM 模式表面波和 TE 模式表面波的特性进行了比较. 讨论了背景光和暗辐照等参量对 TM 模式表面波的影响. 研究表明 TM 模表面波由于晶体各向异性使得 E_x 、 E_z 两个光波电矢量分量数值上相差较大, 表面波的能量主要集中于 E_x 分量上; 并且 E_x 分量比 E_z 分量从表面到体内振幅衰减更快速, 能量被更好地约束在表面; 背景光和暗辐照可明显影响 TM 模式光折变表面波从表面到体内的衰减速度. TM 模式表面波随传播常数、背景光和暗辐照等参量的变化的规律与 TE 模类似.

关键词:非线性光学; 光折变表面波; TE 波; TM 波

中图分类号: O437 **文献标识码:** A

TE AND TM MODE PHOTOREFRACTIVE SURFACE WAVES

ZHANG Tian-Hao, LI Kun, SHAO Wei-Wei, SONG Wei, ZHANG Bo,
WANG Bing-Hui, HU Zhi-Jian, REN Xiang-Kui, ZHU Bao-Gang,
ZHANG Li-Zhou, XU Jing-Jun

(Photonics Research Center, The MOE Key Lab of Weak-Light Nonlinear Photonics, Tianjin Key Lab of Photonics
Materials and Technology for Information Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The nonlinear equations and photorefractive surface waves (PR SWs) under the TM mode with diffusion mechanism were studied for the first time. The characteristics of TE mode with that of TM mode was compared. The influences of background illumination and dark intensity were also discussed. It is found that there is great difference between the magnitude of E_x and E_z component of the PR SW and the most energy of surface wave is concentrated on the E_x component due to the anisotropic property of the medium. The decay rate of E_x is sharper than that of E_z . As a result, the energy of the PR SW is well confined to the surface. The decay rate from the surface to bulk of the medium of PR SW is clearly affected by the background illumination and dark intensity. The influence of propagation constant, background illumination and dark intensity on TM mode is analogous to that on the TE mode.

Key words: nonlinear optics; photorefractive surface waves (PR SWs); TE mode; TM mode

引言

近年来一种新型的非线性表面波——光折变表面波 (Photorefractive Surface Wave, PR SW) 逐渐引起人们的关注. 当光束在光折变晶体 (Photorefractive crystal, PRC) 中由于扩散产生的偏折能被全内反射所平衡, 此时能在晶体的表面产生自感应的 PR

SW, PR SW 诱导的空间折射率分布又引起 PR SW 的自导. 光折变表面波又被称为表面孤子. PR SW 可沿光折变晶体表面无衍射地传播, 光场从表面到体内逐渐衰减, 能量被聚集在晶体表面狭层空间, 具有很高的功率密度, 使得各种非线性效应得以增强和利用. 1995 年, G. S. Garcia-Quirino 等人从理论上首次预言了 PR SW 的存在, 并计算了 PR SW 稳

收稿日期: 2007 - 03 - 21, 修回日期: 2007 - 11 - 18

Received date: 2007 - 03 - 21, revised date: 2007 - 11 - 18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, 铁电类晶体非线性表面电磁波与表面光学非线性效应研究 (60208002)、光折变表面非线性波导及其应用研究 (60678026); 长江学者和创新团队资助计划项目, 南开大学本科科技创新工程

作者简介: 张天浩 (1971-), 男, 天津人, 南开大学物理科学学院副教授, 博士, 主要从事表面非线性光学的研究.

态解的可能形式^[1]. 此后国内外学者进一步对扩散机制、漂移机制以及光生伏打效应机制等光折变非线性对 PR SW 的激发和影响进行了系统的理论和实验研究^[1-8]. 在应用方面, Smolyaninov 等人和张天浩等人利用 PR SW 分别在 BaTiO₃ 和 SBN 晶体表面实现了二次谐波产生的增强^[5,6].

以往有关光折变表面波的理论研究都是对于特定偏振相干光形成的 PR SW. 对于各种不同偏振光形成的表面波尚未得到相应的研究, 因此尚未有对 TE、TM 模式的区分和分析研究. 众所周知光折变晶体是各向异性的, 并且其电光效应引起的非线性也是以张量的形式表现. 因而有必要研究不同偏振光对表面波的激发、传播特性产生的不同效果, 尤其对如何有效地利用系数较大的张量元使非线性效应最大化将具有重要的意义. 本文首次就此问题进行了系统的研究, 发现光折变表面波存在 TE、TM 两种模式, 对这两种模式 PR SW 的形态和传播特性进行了比较和分析. 尤其 TM 模式 PR SW 还涉及到电场的两个分量间耦合的非线性作用, 进一步增加了问题的复杂性. 我们利用带输运模型及非线性波方程建立了 TE、TM 模式的表面波非线性方程, 并以 PRC-空气界面为例进行了数值模拟.

1 光折变表面波方程

考虑沿 z 轴传播的线性光束 (其中沿 y 方向的展宽远大于 x 方向), 光轴正方向与 x 轴正方向相同, 沿 PRC 与空气的界面入射, 光波电矢量复振幅 $E(x, z)$ 满足波动方程:

$$\nabla^2 E(x, z) + k^2 E(x, z) = 0, \quad (1)$$

考虑稳态解的情况, $E(x, z)$ 可以表示为 $E(x, z) = E(x) \exp(-iz)$, 为传播常数, 将其代入 (1) 式可得:

$$\frac{d^2}{dx^2} E(x) + (k^2 - \beta^2) E(x) = 0, \quad (2)$$

其中 $k^2 = \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r = \omega^2 \epsilon_0 n_0^2$, $\beta = k_0 \sin \theta$, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 是真空中波长, n_0 是介质的相对介电常数, 对于光折变介质, 折射率的变化与空间电荷场 E_{sc} 的分布有关. 只考虑扩散引起的非线性没有外电场和光生伏打效应的情况下, 对于沿 z 方向传播的稳态 PR SW, 光折变晶体内建空间电荷场可表示为:

$$E_{sc}(x) = -\frac{k_B T}{q} \frac{\partial}{\partial x} \ln[I(x) + I_d], \quad (3)$$

其中 $I(x)$ 对应 $E^2(x)$, I_d 是介质中的暗辐照, k_B 是玻尔兹曼常数, T 是温度, q 是载流子的电量. 由于光轴

正方向与 x 轴正方向相同, 介电常数的变化满足:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ n^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_x \\ E_y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{13} E_{sc} & 0 & 0 \\ 0 & r_{13} E_{sc} & 0 \\ 0 & 0 & r_{33} E_{sc} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

由于 $\mu = -\mu \mu^{-1}$, 所以

$$r = \begin{pmatrix} 11 - \frac{2}{11} r_{13} E_{sc} & 0 & 0 \\ 0 & 22 - \frac{2}{22} r_{13} E_{sc} & 0 \\ 0 & 0 & 33 - \frac{2}{33} r_{33} E_{sc} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

对于单轴晶体, $r_{11} = r_{22} = n_o^2$, $r_{33} = n_e^2$.

由式 (2) ~ (5) 可得到光折变表面波的非线性波方程.

对于 TE 波, 光波电矢量只含有 E_y 分量, 取 $E_x = E_z = 0$ 得到 TE 模式的 PR SW 的波方程:

$$\frac{d^2}{dx^2} E_y(x) + 2k_0^2 n_o^4 r_{13} \frac{k_B T}{q} \frac{E_y^2(x)}{I(x) + I_d} \frac{d}{dx} E_y(x) + (k_0^2 n_o^2 - \beta^2) E_y(x) = 0, \quad (6)$$

其中 $I(x) = E_y^2(x)$.

对于 TM 模式, 光波电矢量包含 E_x 、 E_z 两个分量, 取 $E_y = 0$ 得到 TM 模式的波方程:

$$\frac{d^2}{dx^2} E_z(x) + k_0^2 n_o^4 r_{13} \frac{k_B T}{q} \frac{E_z(x)}{I(x) + I_d} \frac{d}{dx} I(x) + (k_0^2 n_o^2 - \beta^2) E_z(x) = 0, \quad (7-a)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} E_x(x) + k_0^2 n_e^4 r_{33} \frac{k_B T}{q} \frac{E_x(x)}{I(x) + I_d} \frac{d}{dx} I(x) + (k_0^2 n_e^2 - \beta^2) E_x(x) = 0, \quad (7-b)$$

其中 $I(x) = E_x^2(x) + E_z^2(x)$.

2 光折变表面波数值计算

2.1 TE 模式 PR SW

我们以 SBN 晶体为例, 考虑 SBN-空气界面形成的表面波, 以 E 表示 SBN 中的表面波电矢量, E' 表示空气介质中的表面波电矢量, 表面波电矢量在空气介质中的分布可表示为:

$$E_y(x) = E_y(0) \exp\left(-\sqrt{\beta^2 - k_0^2} x\right) \quad (x < 0), \quad (8)$$

E_y 分量在 SBN-空气界面处满足连续性条件:

$$E_y(0) = E_y'(0), \quad (9-a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} E_y(0) = -\frac{\partial}{\partial x} E_y(0) \quad (9-b)$$

利用式(9),对方程(6)数值计算可得到对应不同传播常数的 PR SW 光波电矢量沿 x 的分布,如图 1 所示.数值计算中取 $\omega_0 = 633\text{nm}$, $T = 300\text{K}$, $n_o = 2.3117$, $n_{13} = 67\text{pm/V}$, $I_d = 0.0001\text{W/m}^2$.

2.2 TM 模式 PR SW

采用同样方法考虑在 SBN 空气界面处 TM 模式 PR SW, PR SW 光场在左边空气介质中的分布可表示为:

$$E_x(x) = E_x(0) \exp\left\{-\sqrt{k_0^2 - k_{xx}^2} x\right\} \quad (10-a)$$

$$E_z(x) = E_z(0) \exp\left\{-\sqrt{k_0^2 - k_{zz}^2} x\right\} \quad (10-b)$$

$$\frac{E_z(0)}{E_x(0)} = \frac{\sqrt{k_0^2 - k_{zz}^2}}{\sqrt{k_0^2 - k_{xx}^2}} \quad (10-c)$$

光波电矢量 x, z 两个分量在 SBN 空气界面处满足连续性条件:

$$E_x(0) = E_{xx}(0) \quad (11-a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} E_x(0) = -\frac{k_{xx}}{k_0} \frac{\partial}{\partial x} E_x(0) \quad (11-b)$$

$$E_z(0) = E_{zz}(0) \quad (11-c)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} E_z(0) = \frac{k_{zz}}{k_0} \frac{\partial}{\partial x} E_z(0) \quad (11-d)$$

由式(10)、式(11)可得到 SBN 晶体边界处光波电矢量 x, z 两个分量之间的关系:

$$\frac{E_z(0)}{E_x(0)} = \frac{\sqrt{k_0^2 - k_{zz}^2} n_e^2}{\sqrt{k_0^2 - k_{xx}^2} n_o^2} \quad (12)$$

其中 $k_{xx} = k_0^2 - k_{xx}^2$, $k_{zz} = k_0^2 - k_{zz}^2$. 利用式(11),对方程(7)数值计算可得到对应不同传播常数的 PR SW 光场沿 x 的分布,如图 2 所示.计算中取 $\omega_0 = 633\text{nm}$, $T = 300\text{K}$, $n_e = 2.2987$, $n_o = 2.3117$, $n_{13} = 67\text{pm/V}$, $n_{33} = 1340\text{pm/V}$, $I_d = 0.0001\text{W/m}^2$.

3 讨论

3.1 TM 模 E_x, E_z 两个光波电矢量分量的比较

由图 2 可以看出:(1) TM 模式 E_x 分量数值上远大于 E_z 分量,两者相差两个数量级,表面波的能量主要集中于 E_x 分量上.由式(11)、式(12)可以看出,对于图 2 所取的参数边界处 $E_x > E_z$, $\partial/\partial x(E_x) > \partial/\partial x(E_z)$, 因此 TM 模式 E_x 分量整体上要远大于 E_z 分量.这正是由于 SBN 晶体的各向异性造成了表面波两个分量数值上的差异,使表面波的能量主要集中于 E_x 分量上.(2) E_x 分量比 E_z 分量从表面到体内振幅衰减更快速, E_x 分量能量被更好地

约束在表面,这是由于电光系数 n_{13} 与 n_{33} 间的差异导致的.式(7)是一对典型的相互耦合的阻尼振动方程组,式(7)中的第二项代表阻尼项.比较(7-a)、(7-b)两式的阻尼系数可以看出,虽然 n_e 略小于 n_o ,但是由于 $n_{33} E_x(x)^2$ 比 $n_{13} E_z(x)^2$ 大很多,因而 E_x 分量较之 E_z 分量受到更强的阻尼作用,衰减更快速.

3.2 TE 模和 TM 模的比较

由图 1、2 可以看出: TE 模和 TM 模 PR SW 光波电矢量振幅都呈现出从表面到体内震荡衰减的形式.随着传播常数的增大表面波的空间频率逐渐减小,空间周期逐渐增加,TE 模和 TM 模具有类似的特征.对于 SBN 晶体, TM 模比 TE 模从表面到体内衰减更快速是由于电光系数 n_{13} 与 n_{33} 间的差异导致的.因而 TM 模更有利于 PR SW 能量在表面的集中.对于 TE 模式 PR SW 光波电矢量只含有 E_y 分量,对应偏振光为 o 光;对于 TM 模式 PR SW 光波电矢量包含 E_x, E_z 两个分量,对应偏振光为 e 光和 o 光.因此在实验上实现不同模式 PR SW 的激发,须采用不同的偏振光.

3.3 暗辐照和背景光的影响

考虑到背景光,式(7)可改写为:

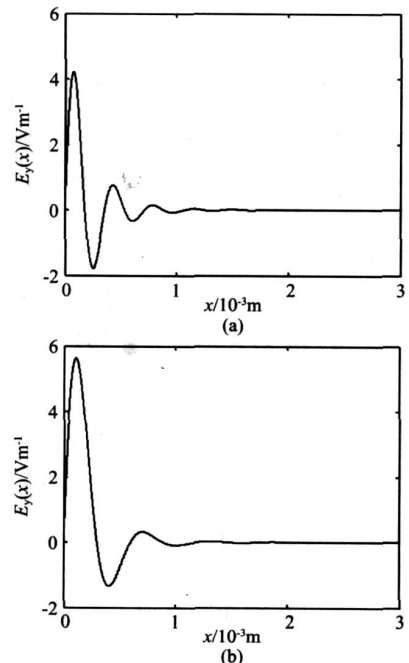


图 1 TE 模式 PR SW 光波电矢量沿 x 的分布 (a) $I_d = 5.269400 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$ (b) $I_d = 5.269402 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$
Fig 1 Profile of TE mode photorefractive surface waves along the x coordinate (a) $I_d = 5.269400 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$ (b) $I_d = 5.269402 \times 10^{14} \text{m}^{-2}$

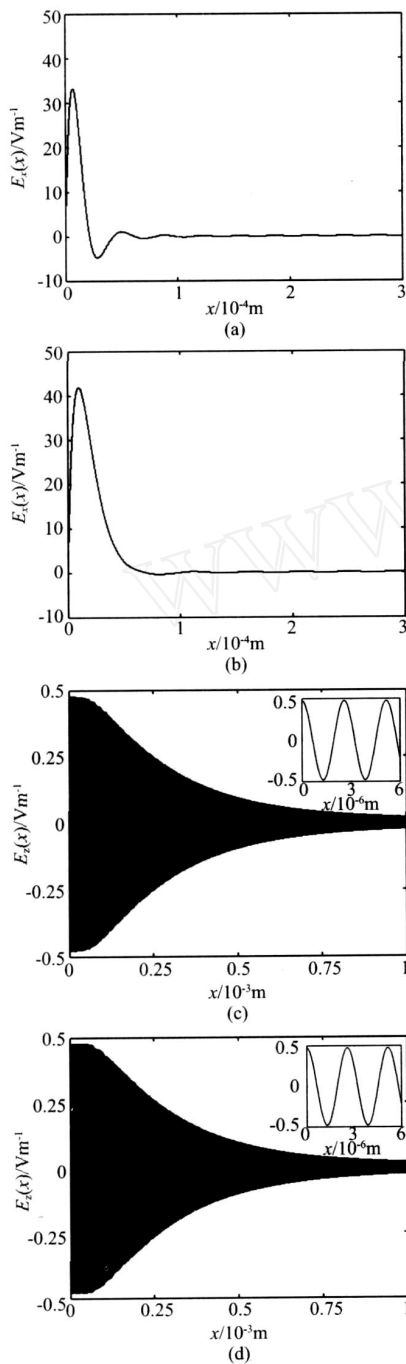


图 2 TM 模式 PR SW 表面波光场沿 x 的分布。 $I_d = 0.0001 \text{ w/m}^2$ (a) $n_0^2 = 5.2100 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ E_x 分布 (b) $n_0^2 = 5.2102 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ E_x 分布 (c) $n_0^2 = 5.2100 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ E_z 分布 (d) $n_0^2 = 5.2102 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ E_z 分布。 (c)、(d) 中的插图是对应 (c)、(d) 两图的精细图像

Fig 2 Profile of TM mode photorefractive surface waves with different n_0^2 along the x coordinate. $I_d = 0.0001 \text{ w/m}^2$ (a) distribution of E_x for $n_0^2 = 5.2100 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ (b) distribution of E_x for $n_0^2 = 5.2102 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ (c) distribution of E_z for $n_0^2 = 5.2100 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ (d) distribution of E_z for $n_0^2 = 5.2102 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$. Inserts in (c) and (d) are the fine structures for (c) and (d), respectively

$$\frac{d^2}{dx^2} E_z(x) + k_0^2 n_0^4 n_{13} \frac{k_B T}{q} \frac{E_z(x)}{I(x) + I_d + I_b} \frac{d}{dx} I(x) + (k_0^2 n_0^2 - \beta^2) E_z(x) = 0 \quad (13 - a)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} E_x(x) + k_0^2 n_0^4 n_{33} \frac{k_B T}{q} \frac{E_x(x)}{I(x) + I_d + I_b} \frac{d}{dx} I(x) + (k_0^2 n_0^2 - \beta^2) E_x(x) = 0 \quad (13 - b)$$

其中 I_b 表示背景光强,由式 (13)可以看出暗辐照和背景光在方程中的作用相同,它们都起影响阻尼项的作用,因而背景光和暗辐照对 PR SW 的影响将是类似的可以通过 $I_d + I_b$ 来考察.图 3 与图 2(a), (c) 为相同传播常数不同 $I_d + I_b$ 情况下 TM 模式 PR SW 光波电矢量沿 x 的分布.随 $I_d + I_b$ 的增大, TM 模式 PR SW 振幅从表面到体内的衰减速度减慢.这意味着背景光不利于低频模的形成,同时不利于 PR SW 能量在表面的集中.所以为了得到能量在表面相对集中的 TM 模式 PR SW,应该尽可能地避免背景光.另外从式 (7)可以看出 TM 模式 PR SW 的 E_x 、 E_z 两个分量彼此以背景光的作用相互影响,构成了 E_x 、 E_z 间的非线性耦合,这是两个正交偏振光相互作用的一个有趣的现象.

总之,本文建立了扩散机制下的 TE、TM 模式光折变表面波非线性波方程,以空气—SBN 晶体界面为例数值计算并比较分析了 TE、TM 模式 PR SW 的

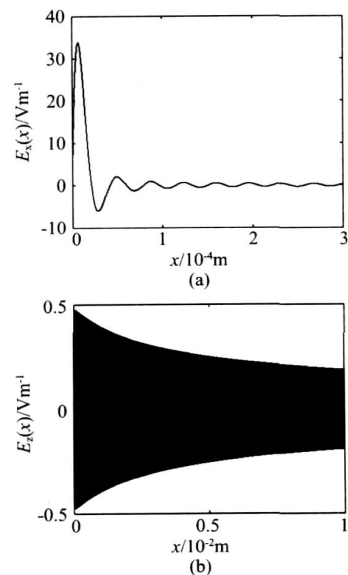


图 3 暗辐照和背景光对 TM 模式 PR SW 的影响。 $I_d + I_b = 1 \text{ w/m}^2$, $n_0^2 = 5.2100 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ (a) 为 $E_x(x)$ 的分布 (b) 为 $E_z(x)$ 的分布

Fig 3 Influence of background illumination and dark intensity on TM mode photorefractive surface waves. $I_d + I_b = 1 \text{ w/m}^2$, $n_0^2 = 5.2100 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ (a) distribution of E_x (b) distribution of E_z

特点. TM模与TE模的主要区别在于考虑的电场分量不一样,两种传播模式又有一定的相似性,都是震荡衰减的形式.对于SBN晶体通过激发TM模式,可以有效的利用最大的电光张量元 k_{33} ,得到能量在表面相对集中的表面波.对于其它的晶体如 $BaTiO_3$,若要利用最大的电光张量元 k_{51} ,可采用45度角切割的方法制备样品使其得以有效利用.当空气介质换为其他介质时,表面波的模式和特征将会由于介质的不同而略有差别,但总体原理和特性与本文的结果相类似.本文对于光折变表面光波导的研究具有指导意义,而光折变表面光波导因为存在于表面具有与普通波导^[9]相比特殊的价值,所以本文的研究具有很重要的意义.

REFERENCES

- [1] Garcia Quirino G S, Sanchez-Mondragon J J, Stepanov S Nonlinear surface optical waves in photorefractive crystals with a diffusion mechanism of nonlinearity [J]. *Phys Rev A*, 1995, **51**: 1571—1577.
- [2] ZHANG Tian-Hao, WANG Bing-Hui, REN Xiang-Kui, et al Influence of the external field on photorefractive surface waves [J]. *Optics Communications*, 2006, **265**: 649—654.
- [3] ZHANG Tian-Hao, REN Xiang-Kui, WANG Bing-Hui, et al Modes of photorefractive surface waves [J]. *Journal of Modern Optics*, 2007, **54**: 1445—1452.
- [4] ZHANG Tian-Hao, LU Yan-Zhen, KANG Hui-Zhen, et al Experiment on PR SEW of SBN crystal [J]. *Acta Phys Sin* (张天浩,路彦珍,康慧珍,等.铌酸锶钡光折变表面电磁波实验.物理学报), 2005, **54** (10): 4688—4691.
- [5] Smolyaninov I I, Lee C H Davis C C. Giant enhancement of second harmonic generation in $BaTiO_3$ due to photorefractive surface wave excitation [J]. *Phys Rev L*, 1999, **83** (12): 2429—2432.
- [6] ZHANG Tian-Hao, YANG Jia, KANG Hui-Zhen, et al Surface second-harmonic generation in $Sr_{0.6}Ba_{0.4}NbO_3$ with a nonlinear diffusion mechanism [J]. *Phys Rev B*, 2006, **73**: 153402—153404.
- [7] ZHANG Tian-Hao, KANG Hui-Zhen, LU Yan-Zhen, et al Photorefractive surface electromagnetic waves at the interface between SBN crystal and air [C]. *Proceeding Volume (OSA), Trends in Optics and Photonics Series, Photorefractive Effects, Materials, and Device*, 2005, 412—416.
- [8] ZHANG Tian-Hao, YANG Da-Peng, LU Yan-Zhen, et al Theoretical research of PR SEW at the $LNbO_3/Air$ Interface [C]. *Proceeding Volume (OSA), Trends in Optics and Photonics Series, Photorefractive Effects, Materials, and Device*, 2005, 451—456.
- [9] NIU Xin-Jian, YU Sheng, LI Hong-Fu, et al Design mode coupling for overmoded bent circular waveguide [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (牛新建,喻胜,李宏福,等.过模弯曲圆波导模式耦合设计.红外与毫米波学报), 2006, **25** (1): 67—70.
- [1] Garcia Quirino G S, Sanchez-Mondragon J J, Stepanov S Nonlinear surface optical waves in photorefractive crystals with a diffusion mechanism of nonlinearity [J]. *Phys Rev A*, 1997, **18** (6): 1223—1240.
- [4] Jin Hengzhen, Xu Shanjia Analysis of filter characteristics for a circular periodically corrugated dielectric Rod Waveguide with mode matching method [J], *Chinese Journal of Electronics*, 2003, **12** (2): 301—304.
- [5] Paolo Baccarelli, Paolo Burghignoli, Fabrizio Frezza, et al Fundamental modal properties of surface waves on metamaterial grounded Slabs [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53** (4): 1431—1442.
- [6] ZHANG Zhong-Xiang, ZHU Qi, XU Shan-Jia Application of left-handed microstrip transmission line in the design for millimeter wave microstrip array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张忠祥,朱旗,徐善驾.左手微带传输线在毫米波天线阵中的应用.红外与毫米波学报), 2005, **24** (5): 341—343.

(上接 34页)

International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1997, **18** (6): 1223—1240.

- [4] Jin Hengzhen, Xu Shanjia Analysis of filter characteristics for a circular periodically corrugated dielectric Rod Waveguide with mode matching method [J], *Chinese Journal of Electronics*, 2003, **12** (2): 301—304.
- [5] Paolo Baccarelli, Paolo Burghignoli, Fabrizio Frezza, et al Fundamental modal properties of surface waves on metamaterial grounded Slabs [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53** (4): 1431—1442.
- [6] ZHANG Zhong-Xiang, ZHU Qi, XU Shan-Jia Application of left-handed microstrip transmission line in the design for millimeter wave microstrip array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张忠祥,朱旗,徐善驾.左手微带传输线在毫米波天线阵中的应用.红外与毫米波学报), 2005, **24** (5): 341—343.

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, **53** (4): 1431—1442.

- [6] ZHANG Zhong-Xiang, ZHU Qi, XU Shan-Jia Application of left-handed microstrip transmission line in the design for millimeter wave microstrip array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张忠祥,朱旗,徐善驾.左手微带传输线在毫米波天线阵中的应用.红外与毫米波学报), 2005, **24** (5): 341—343.