

铁电晶体畴壁增强非线性性质的研究

陈险峰¹ 邓学伟^{1,2} 任怀瑾¹ 安 宁¹

(¹ 上海交通大学物理系, 上海 200240
² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 通过研究畴壁切伦科夫倍频,发现畴壁存在巨大增强的非线性系数。由此造成的畴壁“定域性”使其可以对非线性极化波产生相速度调制,进而影响切伦科夫倍频。提出并证实了极限切伦科夫倍频的存在,并分析了它和准相位匹配倍频产生的区别。

关键词 非线性光学;铁电晶体畴壁;切伦科夫倍频;定域性;相速度调制

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0900122

Study on Enhanced Nonlinearity in Ferroelectric Domain Wall

Chen Xianfeng¹ Deng Xuewei^{1,2} Ren Huaijin¹ An Ning¹

(¹ Physics Department, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
² Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract By studying Cherenkov second harmonic generation, it is found that there exists significantly enhanced nonlinearity in ferroelectric domain wall. This enhanced nonlinearity leads to locality of domain wall, which will modulate the phase velocity of the nonlinear polarization and further influence the Cherenkov angle. Extreme Cherenkov second harmonic generation is proposed and demonstrated, which is distinguished from quasi-phase-matched second harmonic generation.

Key words nonlinear optics; ferroelectric domain wall; Cherenkov second harmonic generation; locality; phase-velocity modulation

OCIS codes 190.4400; 160.2260; 160.4236; 160.4330; 250.4110

1 引 言

铁电晶体是当前非线性光学研究与应用中极为重要的一种材料。激光技术中最关键的一种频率转换技术——双折射相位匹配技术^[1]与准相位匹配技术^[2],都与铁电晶体材料密不可分。前者利用了铁电晶体较高的非线性系数以及双折射特性;后者通过室温电场极化等技术在铁电晶体上制备人工结构,以补偿基频光与转换光间的相位失配。具有其他人工结构的铁电晶体,如准周期^[3]、非周期^[4]、二维结构^[5]等,同样被广泛应用于参量过程^[3]、脉冲压缩和整形^[6]、相位调制^[7]和滤波器^[8]等领域。

尽管对铁电晶体的研究已经持续了超过 50 年,但人们对这种材料的认识仍有不足之处。这种不足

体现在人们对铁电晶体自发畴结构之间的界面——畴壁认识的缺乏。时至今日,对畴壁的动力学描述^[9,10]仍是研究的主要方向。但近年来,针对畴壁全新的功能性研究却再次成为热点。Fragemann 等^[11]曾于 2004 年报道了周期性极化 KTP 晶体畴壁上发现了新的非线性系数。此后,陆续有文章报道类似的谐波产生过程^[12~19],指出应对畴壁上新的非线性效应做更进一步的研究。最近两年,Nature 系列杂志上连续报道了两篇畴壁新的电学效应,把畴壁的应用前景又向前推进了一步:2009 年初,Seidel 等^[20]在 Nature Materials 上发表了 BFO 晶体中畴壁增强导电性的文章;2010 年初,Yang 等^[21]又在 Nature Nanotechnology 上报道了 BFO 晶体畴壁上存

收稿日期: 2011-07-12; **收到修改稿日期:** 2011-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(61078009)、国家 973 计划(2011CB808101)、上海市优秀学术带头人计划(11XD1402600)和强场激光物理国家重点实验室开放课题资助。

作者简介: 陈险峰(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事新型光子学材料和器件、非线性光学、纳米光子学和超快激光技术以及激光与物质相互作用等方面的研究。E-mail: xfchen@stju.edu.cn

在增强的光伏效应。这些报道表明未来最有价值的研究方向是多铁性材料界面(包括多铁畴壁和外延异质结)。尽管这些现象背后的机制仍有待继续探索,但这些成果表明,铁电晶体畴壁已经成为铁电晶体研究中新的热点,被越来越多的研究人员所关注。在非线形光学方面,畴壁切伦科夫型倍频(CSHG)的研究在近年受到广泛关注^[11,12,14~18],不仅在研究中将其和传统倍频过程区分开,提出纵向相位匹配机制,更将其应用于超短脉冲的特性诊断^[13,19]。

本文着眼于铁电晶体畴壁新的非线性光学性质,研究了畴壁产生增强切伦科夫型二次谐波的特性。基于这些特性,提出了畴壁的“定域性”,并分析了该性质对非线性极化波产生的调制作用。利用畴壁的调制作用,提出并证明了极限切伦科夫倍频的存在并分析了这种类型的二次谐波对传统的倍频过程的影响。这些研究表明畴壁不仅具有增强的非线性效应,而且因其极窄的空间分布,会产生特殊的“尺寸效应”。畴壁的这些新特性使其不仅具有进一步研究的价值,也存在相当巨大的应用潜力。

2 畴壁增强的非线性系数

在正常色散的非线性材料中,基频光除了可以激发共线的倍频光外,还能激发切伦科夫倍频^[22]。但是通常切伦科夫倍频的转换效率非常低,难以观测到,导致单畴介质中的切伦科夫倍频相关研究较为缺乏。实验中发现,切伦科夫倍频过程中,铁电晶体畴壁相对单畴表现出了不同的特性。如图1所示,在Z切铌酸锂(LN)晶体上制备了高质量的畴壁(DW)。将中心波长为800 nm的飞秒脉冲沿畴壁入射时,可以在纸屏上观测到一对非共线的倍频光。这对倍频光沿切伦科夫角出射,并且关于畴壁对称。通过测量倍频的转换效率,得到每一束倍频光的转换效率为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 。作为对比,在保持光

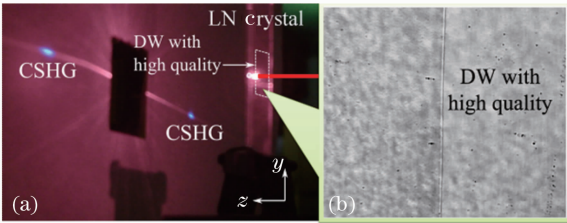


图1 (a)畴壁激发增强切伦科夫倍频实验;
(b)高质量单畴壁

Fig. 1 (a) Experiment of enhanced Cherenkov second harmonic generation in ferroelectric domain wall;
(b) highly qualitative single domain wall

源不变的前提下移动样品,使基频光照射在铌酸锂晶体的单畴区域。理论上来说,此时应在纸屏上观测到环形的切伦科夫倍频^[23],但实际上由于转换效率太低,并没有观测到这一环形的切伦科夫倍频。据文献报道,在与本实验条件类似的情况下,单畴铌酸锂中切伦科夫倍频的转换效率为 $10^{-10} \sim 10^{-9}$ ^[23]。将之与本实验结果对比表明,铁电晶体畴壁上的切伦科夫倍频过程有了巨大的增强。

由于通常认为畴壁只是材料中不同畴向区域间的分界面,其本身性质与畴壁两侧的畴性质一致,因此畴壁处表现出的增强的切伦科夫倍频现象十分奇特。由麦克斯韦方程组可以推导出描述介质中切伦科夫倍频过程的非均匀矢量波方程为

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - \frac{\omega_h^2}{c^2} \epsilon \mathbf{E} = \omega_h^2 \mathbf{P}, \quad (1)$$

式中 ω_h 是倍频光的频率, ϵ 是材料的介电常数, \mathbf{P} 是非线性极化波(NP)。由此可以解出在距离为 r 处的切伦科夫倍频光场为^[24]

$$\mathbf{E}(r) = \frac{1}{r} \frac{\omega_h^2}{4\pi\epsilon_0 c^2} \mathbf{P} V X(n, n') D(n, n') \times \exp\left(-i \frac{\omega_h}{c} n' r\right), \quad (2)$$

式中 n 和 n' 分别为基频光与倍频光的折射率, $X(n, n')$ 和 $D(n, n')$ 是 n 与 n' 的函数,并且在小辐射源近似的情况下等于1, V 是体积常数。由(2)式可以看出,导致切伦科夫光场增强的唯一可能原因是非线性极化波 \mathbf{P} 增强了。考虑到 $\mathbf{P} = d_{\text{eff}} \mathbf{E} \mathbf{E}$,则畴壁上的有效非线性系数 d_{eff} 有了巨大的增强。从本实验结果和文献数据对比的结果看,畴壁上的非线性系数增大了2~3个数量级。

3 畴壁对极化波的调制作用

和体材料中激发出的环形切伦科夫倍频不同,畴壁激发的切伦科夫倍频并不具有环形结构,而是关于畴壁对称的一对准直的倍频光。产生这种现象的原因是增强的非线性性质只存在于畴壁上。而畴壁又非常薄,通常为100 nm量级或更小^[25],远小于光场的 $10 \mu\text{m}$ 量级。因此这个区域激发的非线性极化波在空间上具有平面型的结构。由于这样平面型结构非线性极化波产生的倍频光在空间上是相干的,因此干涉的结果是形成一对关于畴壁平面对称的准直的倍频光束。

由于畴壁相对光场范围来说是极窄的,而增强的非线性性质又只存在于畴壁上,本文认为畴壁对

于光场的响应具有“定域性”——在畴壁切伦科夫型倍频产生的过程中，由基频光激发的非线性极化波被牢牢地束缚在畴壁这一层薄薄的平面内，而由于畴壁处非线性系数的提升非常巨大，即使基频光在畴壁区域之外也产生了非线性极化波，但由于这种极化波相对于畴壁内部来说非常小，几乎可以忽略，因此可以认为基频光仅在畴壁处产生了有效的非线性极化波。畴壁的定域性将对非线性极化波的波前产生重要影响。

在畴壁切伦科夫倍频过程中，能量守恒由两个频率为 ω 的光子转化为一个频率为 2ω 的光子来满足，动量守恒由切伦科夫相位匹配条件来满足。如图 2(a) 所示，基频光沿畴壁方向入射时，它在畴壁上激发了有效非线性极化波，该极化波将随着基频光一起，以相同的相速度在畴壁上运动 $v_{np} = v$ ， v_{np} 表示非线性极化波的传播相速度， v 是基波相速度。如果自由二次谐波在同样材料中以稍慢的速度 v' 传播，则倍频光出射的切伦科夫角为 $\theta_c = \cos^{-1}(v'/v)$ 。如果把速度 v 和 v' 转换到动量空间，则可以得到切伦科夫相位匹配条件为

$$\cos \theta_c = \frac{2|\mathbf{k}|}{|\mathbf{k}'|}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{k} 和 \mathbf{k}' 是基频和倍频光的波矢。图 2(a) 中也给出了典型的切伦科夫相位匹配矢量三角形关系，这种关系也可以称为纵向相位匹配关系，与体材料中的切伦科夫倍频过程完全一致。此时由基频光激发的非线性极化波可以写成

$$P = d_{\text{eff}} E_1^2 \exp[-i(2|\mathbf{k}|r - 2\omega t)]. \quad (4)$$

考虑到非线性极化波只能在畴壁上激发，当基频光沿着畴壁方向入射时，非线性极化波可以在畴壁方向上随着基频光自由传播；当基频光入射方向和畴壁方向有一个夹角 γ 时，基频光也能在畴壁上激发非线性极化波，与(4)式相同。但此时，由于非线性极化波被约束在畴壁上，将不能沿着基频光入射方向传播，如图 2(b) 所示。在时间 t_0 ，入射基频光的等相面(EP)在 A 点激发非线性极化波。基频光等相面以相速度 v 向前传播，并在时间 t 时到达 B 点位置。该被畴壁约束的非线性极化波可以写为

$$P_r = d_{\text{eff}} E_1^2 \exp[-i(2|\mathbf{k}|r \cos \gamma - 2\omega t)], \quad (5)$$

从(5)式可以看出，被畴壁约束的真实的非线性极化波的波矢实际上是基频光引起的非线性极化波在畴壁平面内的投影 $|\mathbf{k}_{np}| = |\mathbf{k}| \cos \gamma$ 。很显然，图中所示的非线性极化波相速度被畴壁所调制并且速度变快为 $v_{np} = v / \cos \gamma$ 。由于介质中的自由倍频光仍然

以相速度 v' 传播，可以得到此时的畴壁调制后的切伦科夫相位匹配条件为

$$\cos \theta_c = \frac{2|\mathbf{k}_{np}|}{|\mathbf{k}'|} = \frac{2|\mathbf{k}| \cos \gamma}{|\mathbf{k}'|} = \frac{n_1 \cos \gamma}{n_2}, \quad (6)$$

式中 n_1 和 n_2 是基频光与倍频光的折射率。(6)式就是畴壁调制切伦科夫角的定义，同时也是畴壁调制的切伦科夫相位匹配条件。

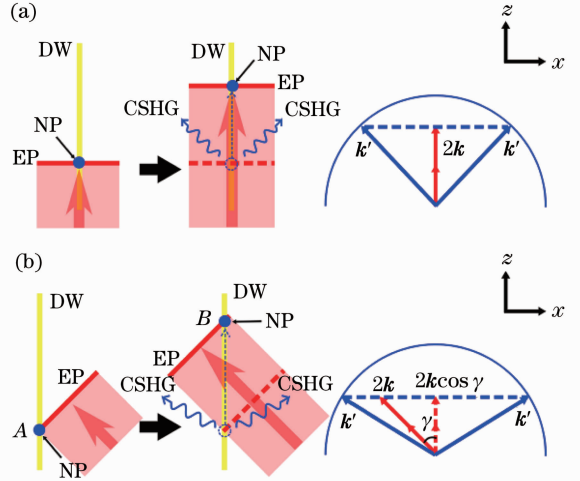


图 2 切伦科夫倍频过程图解及相应的相位匹配条件。(a)入射光沿畴壁方向；(b)入射光与畴壁方向存在夹角

Fig. 2 Schematic of CSHG and the corresponding phase matching condition. (a) Incident light along domain wall; (b) incident light has an angle with domain wall

实验中通过旋转样品同时测量切伦科夫倍频光的出射角来验证(6)式的正确性。如图 3(a)所示，保持基频光入射在畴壁上，旋转样品，同时测量倍频光角度随入射角的变化。随着基频光入射角逐渐增大，倍频光的切伦科夫角也随之增大。测量结果如图 3(b)所示，实验结果与用(6)式计算的理论结果非常吻合。

4 极限切伦科夫倍频

从(6)式可以看到，当入射光与畴壁角度为 90° 时，切伦科夫型倍频光也将以 90° 的切伦科夫角出射。此时对应着切伦科夫倍频的极限情况，即非线性极化波的相速度被调制到无穷大。这意味着入射光垂直于畴壁入射时，产生的切伦科夫型倍频将与入射光共线出射。这一过程与传统准相位匹配(QPM)过程的入射光与畴壁方向一致。

制作了圆形的周期为 $6.72\mu\text{m}$ 的周期性极化铌酸锂(PPLN)，维持光源不变。此时的 PPLN 周期

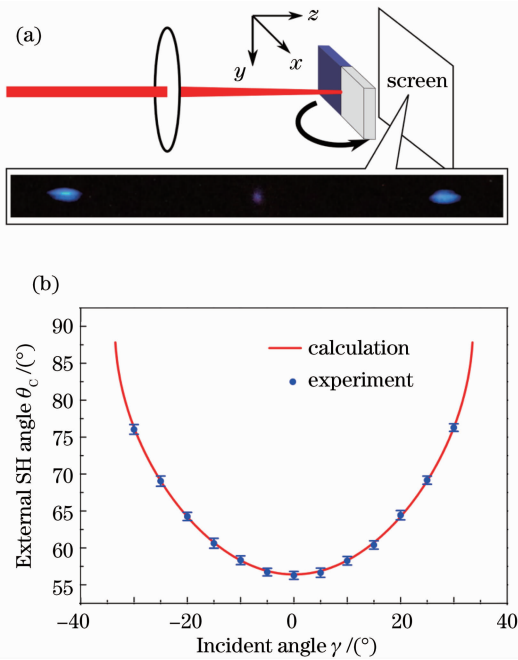


图 3 (a)实验示意图及光斑形态;(b)实验结果与理论计算对比

Fig. 3 (a) Schematic of the experiment and the CSHG pattern; (b) experimental results and theoretical calculation

并不满足飞秒光中心波长的准相位匹配条件。当该圆形的 PPLN 样品旋转时,通过其圆心的基频光将与畴壁产生夹角,这样就能观察到切伦科夫倍频光从正常状态逐步被调制到极限情况的过程。如图 4 所示,随着圆片逐渐旋转,基频光与其中一束切伦科夫倍频光间的距离越来越小,最终将达到共线情况

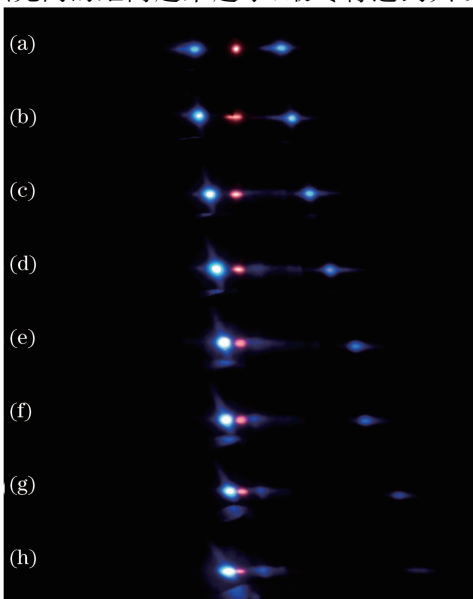


图 4 极限切伦科夫倍频情况实验结果

Fig. 4 Experimental results of extreme CSHG

时的切伦科夫倍频极限情况。图中没有显示基频光与倍频光共线的情况,但共线时,倍频光的强度达到最强。

首先对 PPLN 中极限切伦科夫倍频的光谱进行分析,图 5 中给出了共线倍频时的基频光及倍频光的光谱强度图。可以看到,图中带宽为 30 nm 的基频光的所有频率分量几乎被等效地倍频了。这种宽带等效倍频的结果与准相位匹配的理论结果是相违背的。准相位匹配只能满足分立频率的匹配条件从而实现高效倍频,图中虚线给出了这些分立峰的包络线。很显然,即使是包络线显示的转换效率也不能和实验结果相符合。这表明,在共线情况下,倍频中的主要贡献来自畴壁切伦科夫倍频。插图 5(a)和 (b)显示了在单畴铌酸锂和 PPLN 中产生倍频效率的差异。另外使用了 3 块不同周期不同长度的 PPLN 来检验这个实验。如插图 5(c)中所示,1,2 和 3 分别表示 10 mm 长的非周期铌酸锂,15 mm 长、周期 30 μm 的 PPLN 和 5.8 mm 长、周期 6.5 μm 的 PPLN 样品。从准相位匹配理论上来说,这些周期不同、长度不同的 PPLN 样品产生的倍频光将没有可比较性,且由于周期都不满足准相位匹配条件,效率都应非常低。但如果考虑畴壁极限切伦科夫倍频,这些样品产生的倍频光不仅应该是宽带高效的,同时,由

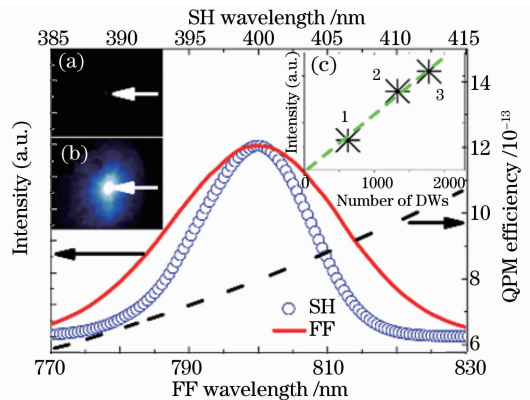


图 5 基频光(FF)与倍频光(SH)的光谱强度。虚线是准相位匹配方法计算出的倍频光效率。插图 (a)和 (b)是单畴 LiNbO₃ 晶体和 PPLN 中倍频效率的对比,(c)显示了倍频效率随畴壁数量线性增大

Fig. 5 Spectra of second harmonic and fundamental beam. Dashed line is the envelope of calculated side bands of sinc function of QPM efficiency. Insets (a) and (b) are direct comparison of second harmonic spots generated by bulk LiNbO₃ and PPLN. Inset (c) shows the linear increase of second harmonic intensities with DW numbers

于飞秒光脉冲脉宽极短,它在经过畴壁序列时,将产生一串倍频光序列,这些倍频光不能有效地相干叠加在一起,因此倍频光的效率应该与畴壁数量成正比。插图 5(c)中的实验结果表明,倍频光效率的确是样品中的畴壁数量成正比的,并且在实验中观测到高效宽带的倍频。这个结果与畴壁极限切伦科夫倍频的解释符合得很好。这里畴壁效应导致倍频光强度线性变化的实验结果与随机相位匹配^[26]的实验类似。由于不同畴壁产生的极限切伦科夫倍频光非相干叠加,导致了强度随畴壁数量增加而增加。在与此类似的实验过程中,利用飞秒光^[27]和连续光^[28]进行了不同的相干性实验。结果表明,飞秒光产生的倍频信号具有较差的相干性,而连续光产生的倍频信号具有完全的相干性。这也从另一方面证明了图 5 所示的倍频信号为切伦科夫倍频光非相干叠加的结果。

5 结 论

通过实验研究铁电晶体畴壁上的切伦科夫倍频,发现了铁电晶体畴壁上存在增强的非线性系数。通过对比实验数据与文献中报道的数据,对非线性系数增大的估计值在 2~3 个数量级。由于畴壁极窄的空间分布,使得畴壁对光场响应的有效区域具有极强的“区域性”。这将导致畴壁对非线性极化波产生相速度调制,进而影响切伦科夫倍频的出射角度,实验与理论计算符合得非常好。利用这一调制作用,预言并通过实验证实了极限切伦科夫倍频的存在。由于极限切伦科夫倍频与传统准相位倍频的产生方向完全相同,因此在过去的研究中几乎被忽略。从实验上分析了极限切伦科夫倍频与准相位匹配不同的性质,分析了倍频光的光谱特性、强度分布,并以此排除准相位匹配的影响,同时还利用了不同的周期极化晶体,在不同数量的畴壁中验证了极限切伦科夫倍频的效率。铁电晶体畴壁增强的非线性性质是一个全新的发现,它不仅是对传统倍频过程的补充完善,同时也具备其自身非常特殊的性质,具有广泛的研究前景和应用潜力,应在今后的研究应用中引起更大的重视。

参 考 文 献

- 1 F. Zernike, J. E. Midwinter. *Applied Nonlinear Optics* [M]. New York: Wiley, 1973
- 2 M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt *et al.*. Quasi-phase-matched second harmonic generation: tuning and tolerances[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(11): 2631~2654

- 3 S. Zhu, Y. Y. Zhu, N. B. Ming. Quasi-phase-matched third-harmonic generation in a quasi-periodic optical superlattice[J]. *Science*, 1977, **278**(5539): 843~846
- 4 Y. Kong, X. F. Chen, Y. X. Xia. Frequency conversion of femtosecond laser pulses in an engineered aperiodic poled optical superlattice[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 5698~5702
- 5 Y. Q. Qin, C. Zhang, Y. Y. Zhu *et al.*. Wave-front engineering by Huygens-Fresnel principle for nonlinear optical interactions in domain engineered structures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(6): 063902
- 6 R. Huang, X. Chen, J. Shi *et al.*. Pulse shaping by the electro-optic effect in chirped periodically poled lithium niobate[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(5): 795~799
- 7 X. F. Chen, X. L. Zeng, Y. P. Chen *et al.*. Optimal design of broadened flat bandpass electro-optic phase modulator based on aperiodic domain-inverted grating[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**(3): 159~162
- 8 X. F. Chen, J. H. Shi, Y. P. Chen *et al.*. Electro-optic Solc-type periodically poled wavelength filter in lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2115~2117
- 9 T. J. Yang, V. Gopalan, P. J. Swart *et al.*. Direct observation of pinning and bowing of a single ferroelectric domain wall[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(20): 4106~4109
- 10 T. Braun, W. Kleemann, J. Dec *et al.*. Creep and relaxation dynamics of domain walls in periodically poled KTiOPO₄ [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(11): 117601
- 11 A. Fragemann, V. Pasiskevicius, F. Laurell. Second-order nonlinearities in the domain walls of periodically poled KTiOPO₄ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(3): 375~377
- 12 R. Fischer, S. M. Saltiel, D. N. Neshev *et al.*. Broadband femtosecond frequency doubling in random media[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(19): 191105
- 13 S. J. Holmgren, C. Canalias, V. Pasiskevicius. Ultrashort single-shot pulse characterization with high spatial resolution using localized nonlinearities in ferroelectric domain walls[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1545~1547
- 14 S. M. Saltiel, D. N. Neshev, R. Fischer *et al.*. Generation of second-harmonic conical waves via nonlinear Bragg diffraction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(10): 103902
- 15 S. M. Saltiel, D. N. Neshev, W. Krolikowski *et al.*. Multiorder nonlinear diffraction in frequency doubling processes [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(6): 848~850
- 16 S. M. Saltiel, Y. Sheng, N. Voloch-Bloch *et al.*. Cherenkov-type second-harmonic generation in two-dimensional nonlinear photonic structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(11): 1465~1472
- 17 Y. Sheng, S. M. Saltiel, W. Krolikowski *et al.*. Cherenkov-type second-harmonic generation with fundamental beams of different polarizations[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1317~1319
- 18 Y. Zhang, F. M. Wang, K. Geren *et al.*. Second-harmonic imaging from a modulated domain structure[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(2): 178~180
- 19 A. S. Aleksandrovsky, A. M. Vyunishev, A. I. Zaitsev *et al.*. Ultrashort pulses characterization by nonlinear diffraction from virtual beam[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(6): 061104
- 20 J. Seidel, L. W. Martin, Q. He *et al.*. Conduction at domain walls in oxide multiferroics[J]. *Nature Mater.*, 2009, **8**(3): 229~234
- 21 S. Y. Yang, J. Seidel, S. J. Byrnes *et al.*. Above-bandgap voltages from ferroelectric photovoltaic devices [J]. *Nature Nanotechnol.*, 2010, **5**(2): 143~147
- 22 X. Deng, H. Ren, H. Lao *et al.*. Research on Cherenkov second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate by femtosecond pulses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(7): 1475~1480

- 23 A. Zembrod, H. Puell, J. A. Giordmaine. Surface radiation from non-linear optical polarisation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **4**(5): 396
- 24 D. A. Kleinman. Theory of second harmonic generation of light [J]. *Phys. Rev.*, 1962, **128**(4): 1761~1775
- 25 D. A. Scrymgeour, V. Gopalan. Nanoscale piezoelectric response across a single antiparallel ferroelectric domain wall[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **72**(2): 024103
- 26 S. E. Skipetrov. Nonlinear optics-disorder is the new order [J]. *Nature*, 2004, **432**(7015): 285~286
- 27 X. Deng, H. Ren, H. Lao *et al.*. Noncollinear efficient continuous optical frequency doubling in periodically poled lithium niobate [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2010, **100**(4): 755~758
- 28 X. Deng, H. Ren, X. Chen. Phase-matched second harmonic generation by enhanced nonlinearities in ferroelectric domain walls [C]. CLEO:2011 - Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (CD), 2011, JThB58