

文章编号:1001-5078(2011)10-1154-05

· 光电技术与系统 ·

周期极化 GaAs 晶体中差频产生太赫兹辐射的研究

张成国^{1,2}, 姚建铨^{1,2}, 钟 凯^{1,2}, 缪岳洋^{1,2}, 孙崇玲^{1,2}, 王 鹏^{1,2}, 李敬辉³

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;

3. 天津大学仁爱学院计算机科学与技术系, 天津 301636)

摘要:传统的光学差频产生的太赫兹辐射转换效率低,不能获得高功率太赫兹辐射。本文对周期极化 GaAs 晶体中差频产生太赫兹辐射进行了理论计算,通过温度调谐实现了周期极化 GaAs 晶体中差频获得可调谐太赫兹波的输出。为了提高差频过程的增益和量子效率,在准相位匹配基础上引进了级联差频机理,并对最佳晶体长度和最佳泵浦频率进行了计算。结果表明,利用周期极化的 GaAs 晶体可以获得更高能量更高效率的太赫兹波辐射。

关键词: GaAs 晶体; 准相位匹配; 温度调谐; 级联差频; 太赫兹

中图分类号: O441 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.020

Terahertz sources based on difference frequency generation in quasi-phase-matched GaAs

ZHANG Cheng-guo^{1,2}, YAO Jian-quan^{1,2}, ZHONG Kai^{1,2}, MIAO Yue-yang^{1,2}, SUN Chong-ling^{1,2},
WANG Peng^{1,2}, LI Jing-hui³

(1. College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology(Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China;

3. College of Ren Ai, Department of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 301636, China)

Abstract: The traditional method of optical difference frequency THz radiation with low conversion efficiency can not get high power THz output. In this paper, DFG THz radiation is calculated in quasi-phase-matched(QPM) GaAs. Tunable THz wave is obtained from QPM GaAs crystals using the temperature tuning method. In order to improve the gain of DFG and quantum efficiency, the mechanism of cascaded difference frequency is introduced, and the optimum crystal length and the pump frequency are calculated. It is obviously seen from the results that the terahertz conversion efficiency and the intensity can be greatly enhanced in QPM GaAs.

Key words: gallium arsenide; quasi-phase-matched(QPM); cascaded difference frequency; temperature tuning; terahertz(THz)

1 引言

太赫兹波(Terahertz wave-THz wave)在电磁波谱中位于红外波与微波之间,有时也被称作亚毫米波($\lambda = 0.03 \sim 3 \text{ mm}$),曾被称为“太赫兹间隙”(THz Gap)。太赫兹波在医学成像与疾病诊断、安检与无损探伤、环境监测、天文与宇宙天体学及太赫兹雷达与通讯等领域具有广泛的应用前景。根据不同的辐射机理,产生太赫兹辐射的方法分为电子学技术和

光子学技术两种,其中利用光子学办法产生太赫兹波包括:基于超短激光脉冲的宽带太赫兹波的产生,例如产生亚皮秒太赫兹脉冲的光电导(PC)、光整流(OR)及半导体表面激发等;窄线宽的太赫兹波辐射

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61101058)资助;国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2007CB310403)资助。

作者简介:张成国(1987-),男,硕士研究生,主要从事太赫兹辐射源的研究。E-mail: zcg_rock925@163.com

收稿日期: 2011-04-11

的产生,如太赫兹参量辐射(TPG & TPO)、差频(DFG)及光混频(THz-Photo mixing)等^[1-6]。获得高功率、相干、可调谐的太赫兹辐射是各国科研工作者首要解决的技术瓶颈之一。

准相位匹配^[7-9]由于可以有效解决相位失配的问题,利用晶体的最大非线性系数,增加相干长度,因此,广泛地应用在各种太赫兹波的产生方法之中。而基于准相位匹配晶体,采用非线性光学差频技术产生相干可调谐太赫兹波的方法也凭借其独特的优势,越来越多地受到科研工作者的关注^[9]。差频方法的最大优点是没有阈值,调谐范围宽,并可以实现窄线宽输出。而准相位匹配技术又可以解决各向同性晶体(如 GaAs 晶体, GaP 晶体等)在差频过程中相位不易匹配的问题,充分地发挥这些晶体非线性系数大、对太赫兹吸收小等优点,从而有效地提高太赫兹波的产生效率。本文针对周期极化晶体中差频产生太赫兹波进行了理论分析。为了进一步提高差频过程的增益和量子效率,在准相位匹配基础上引进了级联差频机理。

2 周期极化 GaAs 晶体差频产生太赫兹波的理论分析

GaAs 晶体与 ZnTe, CdTe, GaP 晶体同属 43 m 族,为光学各向同性晶体,其光学特性如表 1 所示。

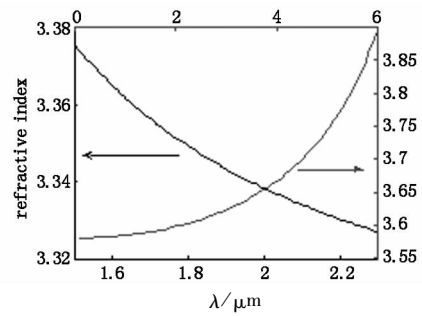
表 1 GaAs 晶体的光学特性^[10]

透光波段 / μm	折射率		Δn	吸收系数/(cm^{-1}) ^[9]		r_{41} pm/V	FOM*	
	2.1 μm	THz		2.1 μm	1~2 THz		长脉冲	超短脉冲
0.9~17	~3.33	~3.6	0.18	<0.02	~1	1.5	0.83	0.64

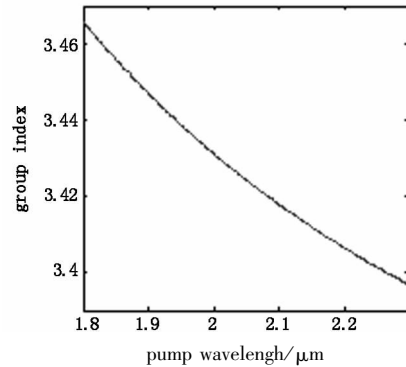
* Figure of Merit

设两泵浦光波长分别为 λ_1, λ_2 , 差频产生的太赫兹波长为 λ_T , 满足能量守恒条件 $1/\lambda_T = 1/\lambda_1 - 1/\lambda_2$ 和动量守恒条件 $n_1/\lambda_1 - n_2/\lambda_2 = n_T/\lambda_T$ 。根据 GaAs 晶体在光学波段和太赫兹波段的 Sellmeier 方程^[11], 可以得到光束在晶体内的折射率的变化曲线, 如图 1 所示。

以上可以看出, GaAs 晶体对太赫兹波的吸收比较小, 在频率转换中光波的群速度和太赫兹的相速度相近, 从而具有很大的相干长度, 而且可以通过多种方式制作适用于准相位匹配的 GaAs 晶体^[10]。因此, 本文以 GaAs 晶体为例, 对周期极化的 GaAs 晶体中差频产生太赫兹辐射进行研究。



(a) 近红外波段及太赫兹波段折射率的变化



(b) 2.1 μm 附近群速度折射率的变化

图 1 GaAs 晶体中不同波长的折射率变化

2.1 差频过程的理论计算

根据准相位匹配理论^[8-9], 极化周期满足:

$$\Lambda = \frac{2\pi m}{k_1 - k_2 - k_T} \quad (1)$$

其中, m 为准相位匹配阶数; $k_i = n_i \omega_i / c$ ($i = 1, 2, T$) 为对应折射率为 n_i 的光波波矢量。我们计算了准相位匹配情况下 GaAs 晶体中差频产生太赫兹辐射时极化周期的变化情况, 如图 2 所示, 固定一泵浦光波长分别为 1.06 μm , 1.32 μm , 1.55 μm , 2.09 μm 和 2.8 μm , 差频产生频率范围在 0.1 ~ 3.5 THz 辐射时 GaAs 晶体极化周期的变化曲线。当泵浦光的频率分别为 143 THz (2.098 μm) 和 142 THz (2.113 μm) 时, 可实现一阶准相位匹配的反转周期为 1.79 mm。

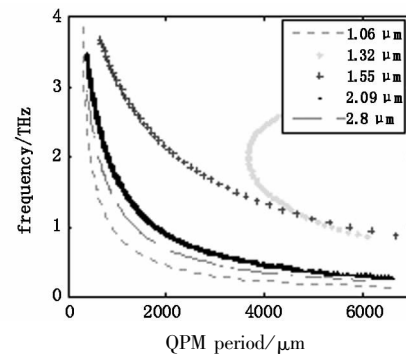


图 2 准相位匹配情况下极化周期的变化曲线

设定每束泵浦光的强度均为 50 mW/mm^2 , 我们分别计算了泵浦波长为 2.1 μm , 1.55 μm 和

1.06 μm 时差频产生太赫兹波强度随泵浦光在周期极化 GaAs 晶体中作用长度的变化关系,如图 3 所示。各泵浦光满足准相位匹配条件下,当晶体长度为 3.78 mm, 3.12 mm 和 2.48 mm 时产生的太赫兹波强度达到最大值,分别为 0.283 mW/mm^2 , 0.219 mW/mm^2 和 0.154 mW/mm^2 ,之后又出现了几个峰值,但由于晶体对太赫兹波的吸收,后面峰值均弱于第一个。

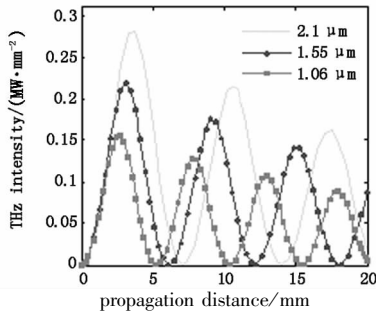


图3 差频产生太赫兹的强度随作用长度的变化

2.2 温度调谐周期极化 GaAs 晶体级联差频产生太赫兹辐射

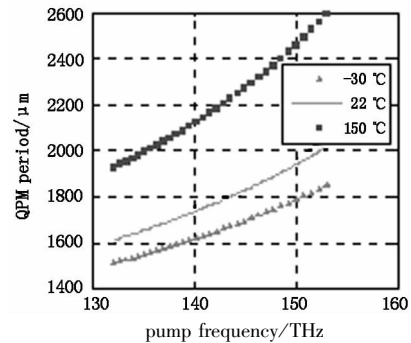
在周期结构的非线性晶体中实现可调谐太赫兹波输出的方法主要有角度调谐和温度调谐等。周期极化的 GaAs 晶体本身的在太赫兹波段和红外波段具有较大的折射率、晶体的全反射临界角很小 ($\theta = \arcsin(1/n)$), 在角度调谐实现可调谐太赫兹波输出过程中,泵浦光和太赫兹波在晶体畴界面处容易发生全反射。因此,本文考虑利用温度调谐法产生可调太赫兹波辐射。

由于泵浦光及太赫兹波在 GaAs 晶体中的折射率随着温度而改变^[11], 并且考虑 GaAs 晶体的热膨胀效应。其线性热膨胀系数 $\alpha = 6.86 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 因此 GaAs 晶体的周期长度将随温度而改变, 满足线性热膨胀公式:

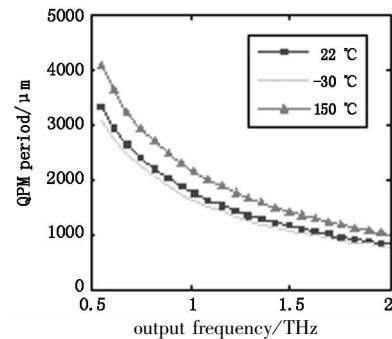
$$\Lambda(\Delta T) = \Lambda_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (2)$$

图 4 所示为晶体温度分别在 -30°C , 22°C 和 150°C 时, 晶体最佳周长的变化曲线。选取泵浦光 $\lambda_1 = 2.0979 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 2.106 \sim 2.135 \mu\text{m}$, 可以通过改变晶体的温度来实现连续调谐太赫兹波输出。在晶体温度为室温 22°C 、极化周期 $\Lambda = 1.79 \text{ mm}$ 时, 输入泵浦光的波长为 $2.097 \mu\text{m}$ 和 $2.1127 \mu\text{m}$, 产生的太赫兹辐射频率为 1 THz; 当晶体的温度为 -30°C 时, 极化周期 Λ 变为 1.7894 mm, 产生的太赫兹辐射频率为 0.93 THz; 当晶体的温度为 150°C 时, 极化周期 Λ 变为 1.7916 mm, 产生的太赫兹辐射频率为 1.206 THz。当温度改变的过程中, GaAs 晶体对红外光及太赫兹波的色散发生改变导致晶体最佳周期长度改变, 另外由于晶体的热膨胀效应可以

补偿晶体最佳周期长度与实际周期长度间的失配。因此, 在周期极化 GaAs 晶体中可以通过温度调谐的方法获得可调太赫兹波输出。



(a) 差频产生 1 THz 辐射时极化周期随着泵浦光频率的变化



(b) 泵浦光频率在 $2.1 \mu\text{m}$ 附近时产生太赫兹辐射的温度调谐曲线

图4 温度改变时, 晶体最佳极化周期的变化曲线

3 周期极化 GaAs 晶体级联差频产生太赫兹辐射的理论分析

根据差频方法的基本原理^[6,8], 由近红外激光差频产生太赫兹波辐射的转换效率比较低, 即使光子转换效率达到 Manley-Rowe 条件极限的 100%, 相应的能量转换效率也只有 0.33%。级联差频^[12-15]方法产生太赫兹辐射已经有报道, 本文从级联差频的耦合波方程出发, 理论上分析探索这一全新有效的太赫兹辐射产生方法。

3.1 级联差频过程的耦合波方程

设两束泵浦光的频率分别为 ω_n, ω_{n+1} , 差频产生的太赫兹波频率为 ω_T 。级联效应存在时, 通过非线性相互作用有可能产生频率为 $\dots, \omega_{n-1}, \omega_n, \omega_{n+1}, \omega_{n+2}, \dots$ 的一系列波长, 相互间隔均为 ω_T , 其中比注入光频率低的 $\omega_{n+2}, \omega_{n+3}, \dots$ 和比注入频率高的 $\dots, \omega_{n-2}, \omega_{n-1}$ 可以分别认为是斯托克斯光和反斯托克斯光。

根据差频三波相互作用耦合波方程组, 可以导出周期极化 GaAs 晶体中级联差频过程的耦合波方程组:

$$\begin{aligned} \frac{dA_T}{dz} &= -\frac{\alpha_T}{2}A_T - i\kappa_n \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n A_{n+1}^* e^{-i\Delta k_Q z} \\ \frac{dA_n}{dz} &= -\frac{\alpha_n}{2}A_n - i(\kappa_{n-1}A_{n-1}A_T^* e^{-i\Delta k_Q z} + \end{aligned}$$

$$\kappa_n A_{n+1} A_T e^{-i\Delta k_Q z} \quad (3)$$

式中, A_n, A_T 分别表示光波与太赫兹波的复振幅; α_n, α_T 分别表示光波与太赫兹波在非线性晶体中的吸收系数; Δk_Q 为差频过程的波矢失配量; κ 为耦合参量, 表达式分别为:

$$\Delta k_Q = k_n - k_{n-1} - k_T - \frac{2\pi m}{\Lambda}$$

$$\kappa_n = \omega_n d(z) / c n_n$$

$$d(z) = d \left| \frac{2}{m\pi} \right| \quad (4)$$

3.2 级联差频的近似计算

只有在注入泵浦光频率附近较宽范围内波矢失配量 Δk_Q 很小时, 才会发生明显的级联差频效应, 随着级联级数的增加, 斯托克斯光或者反斯托克斯光的强度会随着波矢失配的增加而减小。图5中可以看出泵浦光波长在 $2.1 \mu\text{m}$ 附近差频产生频率为 1 THz 辐射时波矢失配量很小, 符合级联差频的条件。

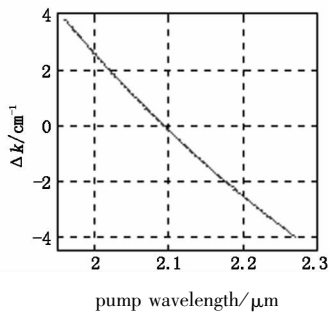


图5 周期极化 GaAs 晶体中波矢失配量随着泵浦光波长的变化关系

在级联差频过程中, 同时考虑准相位匹配以及非线性晶体对泵浦光和太赫兹波的吸收对差频过程的影响。本文计算时采用注入泵浦光的频率为 143 THz 和 142 THz , 强度为 $50 \text{ MW}/\text{mm}^2$, 分别计算了 3, 5, 10, 15 个波长互作用的情况, 所产生的太赫兹波强度如图6所示。图6可以看出, 斯托克斯光

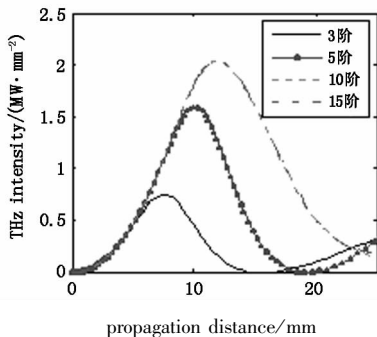


图6 分别考虑 3, 5, 10, 15 级级联近似是产生的太赫兹波的强度变化曲线

的阶数大于 10 时, 产生的太赫兹波最高强度基本不再改变, 因此, 考虑 10 个级联波长就可很好的近似

整个级联过程。我们采用 10 级级联波长进行计算, 当泵浦波长分为 $2.1 \mu\text{m}, 1.55 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$, 采用相同的泵浦强度 $50 \text{ MW}/\text{mm}^2$, 各自满足准相位匹配条件下, 产生太赫兹辐射强度的比较, 如图7所示。图中可以看出采用 $2.1 \mu\text{m}$ 的泵浦光时产生的太赫兹辐射强度最大。

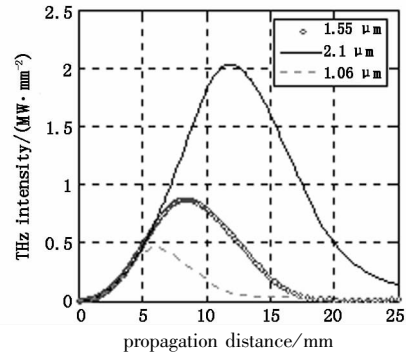
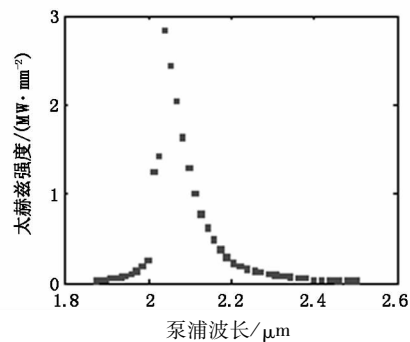


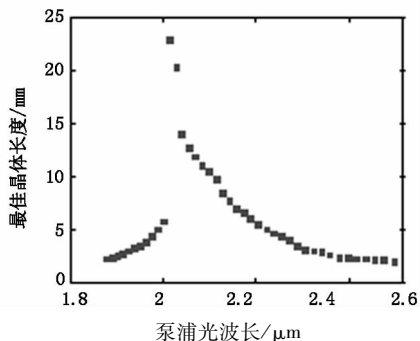
图7 不同波长的泵浦光在各自的准相位匹配条件下产生的太赫兹辐射强度的比较

3.3 最佳晶体长度和最佳泵浦频率的计算

我们只考虑斯托克斯光的影响^[12], 采用 10 级级联波长进行近似计算, 泵浦光的频率从 $120 \sim 160 \text{ THz}$ 变化(波长为 $1.875 \sim 2.5 \mu\text{m}$)时, 我们可以获得差频产生太赫兹波的最大强度及非线性晶体的最佳长度随泵浦光频率的变化关系, 如图8所示。



(a) 差频产生太赫兹波的最高强度与相应最佳晶体长度



(b) 差频产生太赫兹波的最高强度随泵浦光波长的变化曲线

图8 差频产生太赫兹波的最高强度

图8可以看出在满足准相位匹配的波长附近太赫兹波强度有了明显的增加, 相应注入泵浦光波长为 $2.04 \mu\text{m}$ 和 $2.055 \mu\text{m}$ 时, 最大太赫兹辐射强度

达到 2.84 MW/mm^2 。由于 GaAs 晶体的周期反转, 满足准相位条件时光束的作用长度也会变成, 当泵浦光在 $2.013 \mu\text{m}$ 附近时晶体最佳长度为 22.95 mm (约 13 个极化周期)。而不考虑级联效应时, 差频产生的太赫兹波强度为 0.28 MW/mm^2 , 相应的晶体长度为 3.78 mm 。级联差频使得太赫兹波的输出强度提高了近 9 倍。

计算中发现, 在准相位匹配条件下产生的太赫兹辐射强度并不是最大的。图 9 是在图 7 的条件下改变各自的极化周期得到的最大太赫兹辐射强度变化关系, 此时的极化周期分别为 1.75 mm , $4.85 \mu\text{m}$ 和 $0.93 \mu\text{m}$, 相比准相位匹配周期分别为 1.78 mm , 5.5 mm 和 0.89 mm 。因此, 在周期极化晶体中级联差频的情况下, 微小的相位失配可以明显的增加太赫兹辐射强度。

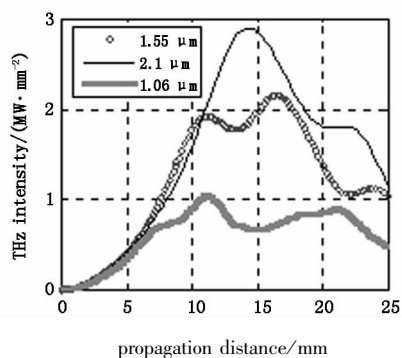


图 9 不同泵浦光产生的最大太赫兹辐射随着传输距离的变化

4 结论

通过对 GaAs 晶体中准相位匹配理论的分析, 我们得到了当泵浦光波长在 $2.1 \mu\text{m}$ 附近, 强度为 50 MW/mm^2 , GaAs 晶体长度为 3.78 mm 时, 太赫兹波辐射强度为 0.283 MW/mm^2 。进而我们选择级联差频的方式, 获得 2.84 MW/mm^2 的太赫兹输出, 太赫兹的强度增加了近 9 倍。因此, 理论上可以得出, 利用周期极化晶体级联差频方法可以实现高效率高能量的太赫兹输出。

参考文献:

- [1] X C Zhang, X F Ma, Y Jin, et al. Terahertz optical rectification from a nonlinear organic crystal [J]. Appl. Phys. Lett., 1992, 61(26): 3080 - 3082.
- [2] X C Zhang, B B Hu, J T Darrow, et al. Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces [J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 56: 1011 - 1013.
- [3] E R Brown, F W Smith, K A McIntosh. Coherent millimeter-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors [J]. J. Appl. Phys., 1993, 73(3): 1480 - 1484.
- [4] Li Zhongyang, Yao Jianquan. Theoretical study of tunable terahertz radiation based on stimulated polariton scattering in zinc blende crystal [J]. Acta Phys. Sin., 2010, 59(9): 6237 - 6242. (in Chinese)
- [5] 李忠洋, 姚建铨. 基于闪锌矿晶体中受激电磁耦合子散射产生可调谐太赫兹波的理论研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(9): 6237 - 6242.
- [6] K A McIntosh, E R Brown, K B Nichols, et al. Terahertz photomixing with diode lasers in low-temperature-grown GaAs [J]. Appl. Phys. Lett., 1995, 67: 3844.
- [7] Sun Bo, Yao Jianquan, Wang Zhuo, et al. Study of tunable terahertz wave generation via difference frequency mixing in isotropic semiconductor crystals [J]. Acta Phys. Sin., 2007, 3(56): 1390 - 1396. (in Chinese)
- [8] 孙博, 姚建铨, 王卓, 等. 利用各向同性半导体晶体差频产生可调谐太赫兹辐射的理论研究 [J]. 物理学报, 2007, 3(56): 1390 - 1396.
- [9] Yao Jianquan. Development of nonlinear optical frequency conversion and quasi-phase matching technology [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2002, 31(3): 201 - 207. (in Chinese)
- [10] 姚建铨. 非线性光学频率变换及准相位匹配技术 [J]. 人工晶体学报, 2002, 31(3): 201 - 207.
- [11] Shi Shunxiang, Chen Guofu. Nonlinear optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006. (in Chinese)
- [12] 石顺祥, 陈国夫. 非线性光学 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [13] David S Hum, Martin M Fejer. Quasi-phase matching [C]. Comptes Rendus Physiques, 2007, 2(8): 180 - 198.
- [14] Konstantin L Vodopyanov. Optical THz-wave generation with periodically-inverted GaAs [J]. Laser & Photon. Rev., 2008, 2(1-2): 11 - 25.
- [15] T Skauli, P S Kuo, M M Fejer. Improved dispersion relations for GaAs and applications to nonlinear optics [J]. J. Appl. Phys., 2003, 94(10): 6447 - 6455.
- [16] Zhong Kai, Yao Jianquan, Xu Degang, et al. Theoretical research on cascaded difference frequency generation of terahertz radiation [J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60(3): 034210 - 1 - 034210 - 8. (in Chinese)
- [17] 钟凯, 姚建铨, 徐德刚, 等. 级联差频产生太赫兹辐射的理论研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(3): 034210 - 1 - 034210 - 8.
- [18] Mark Cronin-Golomb. Cascaded nonlinear difference-frequency generation of enhanced terahertz wave production [J]. Opt. Lett., 2004, 29(17): 2046 - 2048.
- [19] C Lynch, D F Bliss, T Zens A, et al. Growth of mm-thick orientation-patterned GaAs for IR and THz generation [J]. Journal of Crystal Growth, 2008, (310): 5241 - 5247.
- [20] K L Vodopyanova, M M Fejer. Terahertz-wave generation in quasi-phase-matched GaAs [J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 141119 - 1 - 141119 - 3.