

文章编号:1001-9014(2011)03-0221-04

基于非周期极化铌酸锂晶体产生 任意频率太赫兹辐射

毋雪¹, 朱巧芬², 张岩^{1*}

(1. 首都师范大学 物理系, 太赫兹波谱与成像北京市重点实验室,
太赫兹光子学省部共建教育部重点实验室, 北京 100048;
2. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100124)

摘要:理论上研究并论证了飞秒激光在非周期性极化畴反转的铌酸锂晶体(LN)中由光整流效应产生任意频率、窄带的太赫兹(THz)波辐射的可行性. 为实现对THz波谱的整形, 文中利用模拟退火(SA)算法设计出铌酸锂晶体的极化畴反转结构的最佳模型, 由此可产生任意预置时间波形的THz辐射场. 结果表明, SA算法是一种有效的通过设计晶体极化畴反转结构, 实现对THz时间波形整形的方法.

关键词:光学; THz波; 模拟退火算法; 极化畴反转结构; 光整流效应; 准相位匹配
中图分类号: O437.1 **文献标识码:** A

Generation of arbitrary terahertz pulse in non-periodically poled lithium niobate

WU Xue¹, ZHU Qiao-Fen², ZHANG Yan^{1*}

(1. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China;
2. College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The narrowband terahertz (THz) generation on lithium niobate (LN) crystals with non-periodically poled domain structures was demonstrated. To realize THz pulse shaping, the optimal domain structures were designed by using simulated annealing (SA) algorithm, for arbitrary preset frequency components and intensities of THz radiation generation. It was demonstrated that this method is feasible in THz pulse shaping.

Key words: optics; THz generation; simulated annealing algorithm; poled domain structures; optical rectification; quasi-phase-matching

PACS: 42.65.Ky; 77.80.Dj; 78.20.Ci

引言

近几十年来,太赫兹(THz)波产生源的发展获得了巨大的吸引力和关注. 迄今,关于如何产生宽带和窄带THz波辐射已有众多研究,如采用光电导^[1,2]、光整流^[3,4]、等离子体振荡^[5]、光参量振荡^[6]等多种方法. 另外,THz辐射场在很多方面都具有潜在的重要应用,如遥感^[7]、材料特性表达和控制^[7]、无损探伤估值^[7]、通信^[7]、分子光谱学^[8]等等.

由于高功率、窄带THz波辐射具有极其重要的应用,很多研究报导利用铁电畴结构晶体,通过光整流效应产生THz辐射场,并取得了出色的研究成果. 近几年,研究发现并证明了一种有效的方案,在周期极化铌酸锂晶体中由光整流效应产生窄带,多周期THz光束^[9,10]. 此方案基于准相位匹配技术,其中心频率由晶体畴结构的周期决定.

为得到任意多模THz波辐射,就需要设法提高调谐产生THz波辐射的灵活性,目前研究已发现多

收稿日期:2010-08-30,修回日期:2011-01-25

基金项目:国家973项目资助(2007CB310408, 2011CB308301)

作者简介:毋雪(1984-),女,陕西人,首都师范大学物理系研究生,硕士,主要研究极化反转畴结构铌酸锂晶体产生THz波. E-mail: xuer19840608@163.com.

* 通讯作者: E-mail: yzhangcnu@gmail.com.

Received date: 2010-08-30, revised date: 2011-01-25

项技术可有效整形 THz 波. 比如, 将准相位匹配技术由周期结构延伸至准周期结构, 使光整流效应发生在预制准周期畴结构的铁电质晶体中. 已有很多文献报导了这种获得多模窄带的 THz 波^[11-13]的方法. 在准周期结构中, 其占空比不等于 0.5; 占空比不同, 得到的 THz 波的频率成份也不同^[12]. 由多个周期混合而成的畴结构, 可产生具有等间距、多模、各个模强度相等的 THz 波谱. 通过调节不同周期的占空比, 还可调节各个模的相对强度^[13]. 另一种特殊的准周期结构为 Fibonacci 超晶格结构. 利用 Fibonacci 畴结构的铌酸锂晶体可产生任意多模及任意相对强度的 THz 波^[12]. 除此之外, 还有其他多种准周期结构被用来产生可调谐 THz 波辐射. 通过以上关于窄带, 多模 THz 波产生的研究, 可以发现产生 THz 波的时间波形与晶体畴结构之间存在密切关系. THz 波各频率成份对应的强度大小取决于晶体的畴结构, 也就是说晶体的畴结构影响 THz 波辐射的频谱分布.

以上关于窄带 THz 波的产生技术都有各自的优势, 但还存在不足之处: 准周期结构限制了对 THz 波的可调谐度, 不能对 THz 波进行任意调谐. 为了提高对 THz 波的可调谐度, 文中利用与 Ref. 12 中相似的方法实现了对 THz 波的任意整形. 此方案基于模拟退火(SA)算法, 可根据预期的 THz 波形, 反推出所需要的晶体的非周期畴结构. 文中设计出了铌酸锂晶体的几种理想畴结构, 用于产生需要的 THz 波形.

1 理论推导

如图 1 所示, 当一束飞秒激光沿 Z 轴入射到非线性介质(如铌酸锂晶体)上, 由于二阶非线性极化作用, 强光脉冲在非线性晶体中产生光整流效应, 此过程产生一个瞬时极化场, 极化场的二阶非线性极化强度在频率为 ω 时由下式决定:

$$P^{(R)}(z, \omega) = \varepsilon_0 d(z) \int E_{opt}(z, \omega + \Omega) E_{opt}^*(z, \Omega) d\Omega, \quad (1)$$

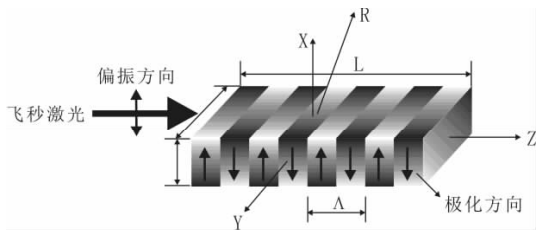


图 1 飞秒激光入射到极化畴反转 LN 晶体上
Fig. 1 A femtosecond laser pulse propagates through a poled LN crystal along Z-axis

式中, ε_0 是真空中介电系数, $d(z)$ 是磁化系数的空间调制, $E_{opt}(z, \Omega)$ 是飞秒激光时域脉冲中频率为 Ω 的傅立叶分量. 在时域内, 方程(1)服从下式

$$P^{(R)}(z, t) = \varepsilon_0 d(z) E_{opt}(z, t) E_{opt}^*(z, t) = \varepsilon_0 d(z) I_{opt}(z, t), \quad (2)$$

由这个极化场辐射出的 THz 场在晶体中位置 Z 处的值可通过解下面的方程得到:

$$\frac{\partial^2 E_{THz}(z, \omega)}{\partial z^2} + \varepsilon(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} E_{THz}(z, \omega) = -\omega^2 \mu_0 P^{(R)}(z, \omega), \quad (3)$$

式中, c 为真空中光速, $\varepsilon(\omega)$ 是产生的 THz 波在 LN 晶体中的相对介电系数. 假设飞秒激光功率谱呈高斯分布, 则晶体位置 Z 处对 THz 场的贡献为

$$E_{THz}^{local}(z, \omega) = \frac{\tau}{2\sqrt{\pi}} \frac{I_0 \omega^2}{n_{THz}^2 - n_{opt}^2} d(z) \exp\left(-\frac{\tau^2 \omega^2}{4}\right) \times \exp\left[-i\left(\frac{z}{v_{opt}} + \frac{L-z}{v_{THz}}\right)\omega\right], \quad (4)$$

式中, τ 是激光脉宽, I_0 是激光光强的峰值, L 是晶体的总长度, n_{THz} (n_{opt}) 和 v_{THz} (v_{opt}) 分别是 THz 波和飞秒激光在晶体中的折射率和群速度, 对 $E_{THz}^{local}(z, \omega)$ 进行空间积分, 可得到在晶体的出射面 L 位置处, THz 电场中频率为 ω 的成份的电场强度为

$$E_{THz}^{tot}(L, \omega) = \int_0^L E_{THz}^{local}(z, \omega) dz. \quad (5)$$

2 利用模拟退火算法设计晶体畴结构

2.1 思路方法

将晶体平均分割成 N 段, 每段长度为 $\Delta z = L/N$, 则式(5)可写为 N 段积分之和

$$E_{THz}^{tot}(L, \omega) = A_0 \omega^2 \frac{1 - \exp(-iQ\Delta z)}{iQ\Delta z} \exp\left[-\left(\frac{\tau^2 \omega^2}{4} + i\frac{\omega L}{v_{THz}}\right)\right] \times \left\{ \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \hat{d}(z_m) \exp(iQz_m) \right\}, \quad (6)$$

式中 $A_0 = \frac{\tau}{2\sqrt{\pi}} \frac{I_0 L d_0}{n_{THz}^2 - n_{opt}^2}$, $Q = \frac{\omega}{c} (n_{THz} - n_{opt})$.

根据式(6), 只要给定 $\{\hat{d}(z_m)\}$, 就容易得到对应 THz 波的频谱. 反之, 若已知 THz 波的频谱, 必有一对应的 $\{\hat{d}(z_m)\}$. 文中利用 SA 算法, 根据预置 THz 波形, 以铌酸锂晶体为例, 成功设计出了四种理想的非周期畴结构. 每种结构以及对应 THz 频谱如图 2 所示.

2.2 SA 算法步骤

(1) 设定一个初始结构 $\hat{d}_0 = \{\hat{d}(z_1), \hat{d}(z_2), \dots\}$,

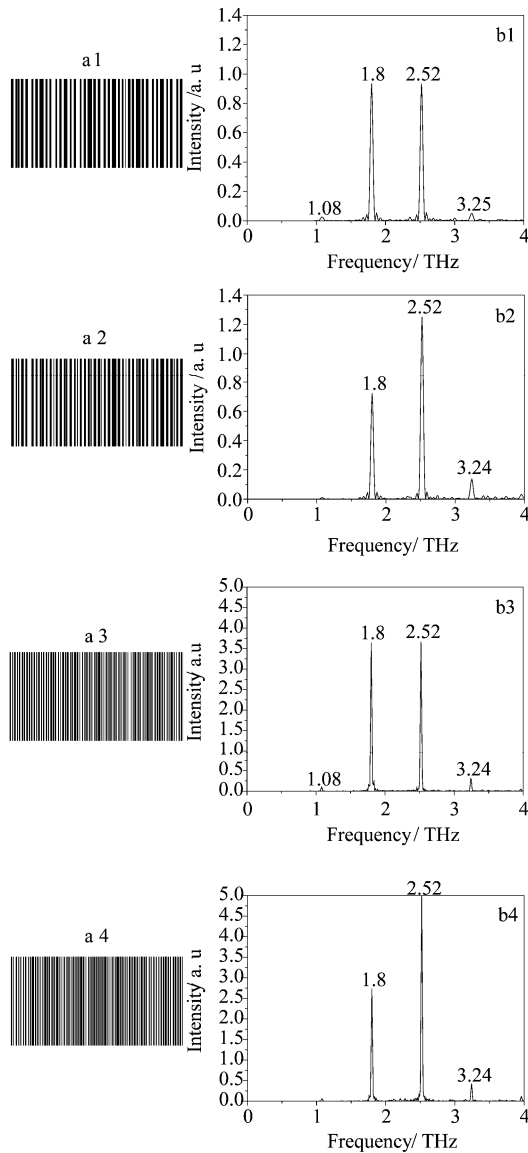


图2 4种铌酸锂晶体畴结构及其对应 THz 频谱
Fig.2 Four different domain structures of LN crystals and the corresponding generated THz spectra

$\hat{d}(z_3), \dots, \hat{d}(z_m), \dots, \hat{d}(z_N)\}$, 如文中假设晶体初始结构为每一段极化方向都向上. 并设一个较高的起始温度 T .

(2) 计算相应的目标函数值 $E_0 = I(\hat{d}_0) - I_{need}$, 文中 $I(\hat{d}_0)$ 为当前结构所对应 THz 波辐射的光强, I_{need} 为预置 THz 波辐射的光强.

(3) 对当前结构进行扰动产生一个新的结构, $\hat{d}_1 = \{-\hat{d}(z_1), \hat{d}(z_2), \hat{d}(z_3), \dots, \hat{d}(z_m), \dots, \hat{d}(z_N)\}$, 计算相应的目标函数值 $E_1 = I(\hat{d}_1) - I_{need}$. 根据 Metropolis 准则, 在 $[0, 1)$ 之间产生一随机数 p ,

若 $P \leq \exp(-\frac{E_1 - E_0}{T})$, 则接受这个新状态, 否则舍弃.

(4) 在温度 T 下, 重复 N 次的扰动和接受过程, 即步骤(2)和(3).

(5) 缓慢降低温度 T .

(6) 重复步骤(2)~(5), 直至收敛条件满足为止.

2.3 过程与结果讨论

文中, 设定飞秒激光的脉宽为 100 飞秒, 铌酸锂晶体对飞秒激光和 THz 光的折射率分别为 $n_{opt} = 2.2$, 和 $n_{THz} = 5.2$. 设定 $\Delta z = 5 \mu\text{m}$, 当晶体总长度 $L = 2\text{mm}$ 时, 预置两种 THz 波形 1 和 2, 均包含两个 THz 频率成份: 1.8THz 和 2.52THz, 分别对应爆炸物 HMX 对 THz 波吸收谱上的两个峰值频率. 两个波形中这两个频率成份任意选取两种不同的强度相对值, 波形 1 取 1: 1, 波形 2 取 0.6: 1 (等于 HMX 吸收谱上两个峰值的比值), 这里取两种不同的比值用于研究证明 SA 算法可以成功设计晶体的畴结构, 产生任意预置 THz 模的 THz 辐射. 以此为目标函数得到两种非周期畴结构, 如图 a1 和 a2 所示, 由此得到的 THz 频谱分别如图 b1 和 b2, 与预期波形符合得很好, 只有微小偏移.

当 $L = 4\text{mm}$ 时, 同样预置与上面含有相同频率成份的 THz 波形 3 和 4, 强度相对值分别取 1: 1 和 0.7: 1.2 (与 b2 的比值稍有差别), 得到两种非周期畴结构, 如图 a3 和 a4 所示, 由此得到的 THz 频谱分别如图 b3 和 b4 所示, 也与预期波形相一致. 对比 b1 和 b3, b2 和 b4, 可见, 在不考虑晶体对 THz 光的吸收时, 只要满足准相位匹配, 晶体越长, 光频率转换效率就越高. 由 b2 和 b4 的对比, 还发现晶体长度增加时, 不同 THz 模的转换效率的增幅不同.

观察四种畴结构 a1, a2, a3, a4, 发现畴分布没有明显的周期特性. 与周期或准周期结构相比, 这种非周期结构对 THz 波形具有更强的可调谐性, 可得到任意预置的 THz 波形.

3 结语

基于光整流效应及准相位匹配方法, 由飞秒激光经过铁电质晶体产生 THz 波辐射的理论为 THz 波产生源的发展提供了一种可靠的途径, 这种技术具有很好的应用前景. 而利用模拟退火算法, 可以灵活自由地设计出理想的晶体畴结构, 实现对 THz 波的任意整形, 得到预期的 THz 辐射场. 文中设计的

(下转 283 页)

叠加,仍能获得满足要求辐射精度。

4 结论

由于短波红外高光谱成像仪探测的目标信号主要是太阳反射光谱,长期以来,仪器自身的背景辐射经常被忽视。通过本文的分析研究,认为背景辐射对短波红外高光谱成像仪的辐射精度有显著影响,主要表现为动态范围的漂移和背景噪声。其影响程度取决于仪器工作环境与目标信号的强弱,因此改进方案也需要根据应用场合来确定。主要通过小相对孔径冷屏、高精度温控、冷光学和经常性标定等手段。本文的研究工作对提高高光谱成像仪研制的定量化水平具有重要的参考价值。

REFERENCES

- [1] SUN De-Yong, LI Yun-Mei, WANG Qiao, *et al.* Study on remote sensing estimation of suspended matter concentrations based on in situ hyperspectral data in lake taiwaters [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙德勇, 李云梅, 王桥,

等. 基于实测高光谱的太湖水体悬浮物浓度遥感估算研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(2):124—128.

- [2] SHEN Yuan-Ting, NI Guo-Qiang, XU Da-Qi, *et al.* Study on gas exploration by hyperion hyperspectral remote sensing data[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (沈渊婷, 倪国强, 徐大琦, 等. 利用 Hyperion 短波红外高光谱数据勘探天然气的研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(3):210—213.
- [3] TAN Ke-Long, ZHOU Ri-Ping, WAN Yu-Qing, *et al.* Remote sensing monitoring method of hyperspectral and high resolution for underground coal bed combustion [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谭克龙, 周日平, 万余庆, 等. 地下煤层燃烧的高光谱及高分辨率遥感监测方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(5):349—352.
- [4] MA Yan-Hua, JING Zhong-Liang, WANG Jian-Yu, *et al.* Radiation matching technology for wide-view hyperspectral imager based on field-division [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (马艳华, 敬忠良, 王建宇, 等. 基于视场分割方式的宽视场高光谱成像系统的辐射匹配技术. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(6):457—460.
- [5] Hugh H Kieffer, Thomas C Stone, *et al.* On-orbit radiometric calibration over time and between spacecraft using the Moon [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4881**:287—298.
- [6] Livermore T R, Crisp D. The NASA Orbiting Carbon Observatory Mission [J]. *Aerospace Conference*, 2008:1—6.

(上接 223 页)

几种结构可以产生包含两个频率成份的 THz 波,也可以将目标函数确定为含有多个频率成份,具有任意强度相对值的 THz 波谱,利用模拟退火算法仍然可以得到相应的晶体畴结构的理想模型。

REFERENCES

- [1] Hu B B, Darrow J T, Zhang X C, *et al.* Optically steerable photoconducting antennas [J]. *Appl. Phys. Lett*, 1990, **56**(10):886.
- [2] You D, Jones R R, Bucksbaum P H, *et al.* Generation of high-power sub-single-cycle 500-fs electromagnetic pulses [J]. *Opt. Lett*, 1993, **18**(4):290.
- [3] Huber R, Brodschelm A, Tausser F, *et al.* Generation and field-resolved detection of femtosecond electromagnetic pulses tunable up to 41 THz [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2000, **76**(22):3191.
- [4] Hebling J, Stepanov A G, Almási G, *et al.* Tunable THz pulse generation by optical rectification of ultrashort laser pulses with tilted pulse fronts [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(10):593.
- [5] Shikata J, Sato M, Taniuchi T, *et al.* Enhancement of terahertz-wave output from LiNbO₃ optical parametric oscillators by cryogenic cooling [J]. *Opt. Lett*, 1999, **24**(4):202.
- [6] Ding Y J, Khurgin J B. A new scheme for efficient generation of coherent and incoherent submillimeter to THz waves

in periodically-poled lithium niobate [J]. *Opt. Commun*, 1998, **148**(1-3):105.

- [7] Chamberlain J M, Miles R E. *New Directions in Terahertz Technology*, 1997 [C]. Berlin: Springer, 1997.
- [8] Knoesel E, Bonn M, Shan J, *et al.* Charge transport and carrier dynamics in liquids probed by THz time-domain spectroscopy [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2001, **86**(2):340.
- [9] Yun-Shik Lee, Meade T, Perlin V, *et al.* Generation of narrow-band terahertz radiation via optical rectification of femtosecond pulses in periodically poled lithium niobate [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2000, **76**(18):2505.
- [10] Weiss C, Torosyan G, Avetisyan Y, *et al.* Generation of tunable narrow-band surface-emitted terahertz radiation in periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett*, 2001, **26**(8):563.
- [11] Yun-Shik Lee, Theodore B Norris. Terahertz pulse shaping and optimal waveform generation in poled ferroelectric crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(11):2791.
- [12] LIU Xin-hai, WU Jian, DUAN Wen-hui, *et al.* Generation of narrow-band terahertz radiation with preset frequency components in poled ferroelectric materials [J]. *J. Appl. Phys*, 2005, **97**(11):114108.
- [13] QIN Yi-qiang, GUO Hong-chen, TANG Sing-hai. Theoretic considerations for multi-mode terahertz generations in multi-periodically poled dielectric material [J]. *J. Phys. : Condens. Matter*, 2006, **18**(5):1613.