

基于铌酸锂平板波导的切伦科夫型太赫兹辐射源的研究

吕跃凯, 袁英豪

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月13日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

研制了一种基于铌酸锂平板波导结构的切伦科夫辐射型太赫兹辐射源。采用一套由光纤准直镜、平凸聚焦镜和圆柱状棒镜等组成的飞秒激光光束压缩光学系统, 成功地将光纤输出的中心波长为1550 nm、重复频率为100 MHz、脉冲宽度为85 fs的飞秒激光脉冲, 耦合进入厚度仅有10 μm 的掺杂5% MgO:LiNbO₃的波导层, 获得了6.52 nW的太赫兹波辐射功率。

关键词

太赫兹, 切伦科夫辐射, 铌酸锂波导

Research on Cherenkov-Type Terahertz Radiation Source Based on Lithium Niobate Slab Waveguide

Yuekai Lyu, Yinghao Yuan

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 13th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

A terahertz (THz) radiation source based on a lithium niobate (LiNbO₃) slab waveguide structure utilizing Cherenkov radiation has been developed. By employing a femtosecond laser beam compression optical system composed of a fiber collimator, plano-convex focusing lens, and cylindrical rod lens, the research team successfully coupled femtosecond laser pulses—with a central wave-

文章引用: 吕跃凯, 袁英豪. 基于铌酸锂平板波导的切伦科夫型太赫兹辐射源的研究[J]. 物理化学进展, 2025, 14(2): 451-459. DOI: 10.12677/japc.2025.142042

length of 1550 nm, repetition rate of 100 MHz, and pulse width of 85 fs—output from an optical fiber into a 10- μ m-thick waveguide layer of 5% MgO-doped LiNbO₃. This achieved a THz radiation power output of 6.52 nW.

Keywords

Terahertz, Cherenkov Radiation, Lithium Niobate Waveguide

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太赫兹时域光谱技术(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)由于具有超宽带的指纹光谱测试能力,以及超快时间分辨性等特点,所以在物质成分分析[1]、无损检测[2]等领域获得了广泛的应用。在 THz-TDS 设备中,宽带太赫兹辐射源是其中至关重要的核心器件,它影响整套系统可获得的光谱宽度和信噪比、动态范围等指标,因此宽带太赫兹辐射源一直以来都是国内外研究的热点。

应用于太赫兹时域光谱系统的辐射源,是一种宽带脉冲式太赫兹辐射源,通常采用光电导天线、光整流等技术来产生太赫兹辐射。光电导天线因其具有良好的工作寿命和低廉的价格,获得广泛的应用。光电导天线通常在低频段(低于 3 THz)有较高的辐射效率[3],虽然有部分研究使谱宽能达到 4 THz 乃至更高[4],在高频段的应用还是较为不便。在基于超快飞秒的 THz-TDS 系统中光整流也是常用的方法[5]。光整流通过非线性晶体中的二阶非线性光学效应来产生太赫兹波,具有相对光电导天线更宽的频谱范围。传统的光整流方案通常采用 ZnTe、GaP 等非线性晶体[6],通过相位匹配条件的优化来提升转换效率。近年来,基于切伦科夫辐射原理的新型光整流方案因其独特的相位匹配机制和优异的宽带特性而受到广泛关注。

对于切伦科夫太赫兹辐射源,相位匹配将直接影响产生太赫兹信号的能量强弱[7]。根据其使用的泵浦源不同,可分为采用强飞秒激光的辐射源以及采用弱飞秒激光的辐射源。在采用强飞秒激光的方案中,通常使用波前倾斜技术满足相位匹配条件,这一方法是 Hebling 等人于 2002 年首次提出[8]。基于波前倾斜相位匹配技术,近些年 L. GUIRAMAND 等人采用 400 μ J 掺镱激光器实现了平均功率 74 mW,转换效率达 1.3%的太赫兹信号输出[9];在国内,北京航空航天大学的吴晓君等人采用波前倾斜技术,通过 30 fs、1.2 J 的钛宝石激光器产生单周期 13.9 mJ 的 THz 脉冲,实现了 800 nm 泵浦源到太赫兹波 1.2%的能量转换效率[10]。这种技术虽可以高功率的太赫兹辐射,但其需要超强功率的飞秒激光光源,并且其重复频率较低,多数仅用于实验室。在面对工业现场级的应用场景时,要求 THz-TDS 具有较小的体积。因此,采用弱飞秒激光的辐射源方案备受关注。该方案使用功率较低的光纤飞秒激光器,通过将激光耦合到特制的非线性晶体波导层(如铌酸锂波导)来发生切伦科夫效应,从而获得太赫兹波,这种方法被称为棱镜耦合切伦科夫相位匹配方法(Prism Coupled Cherenkov Phase Matching, PCC-PM)。以日本 Advantest 公司的产品为代表,通过采用 PCC-PM 法设计铌酸锂脊型波导结构,先后于 2008 年和 2016 年产生了调谐范围为 0.2~3 THz、最大输出单脉冲能量为 80 nJ 的窄带太赫兹波以及频谱范围从 0.1 THz 到 7 THz,最大动态范围达到 80 dB 的宽谱太赫兹信号[11][12],体现了低功率小型辐射源的宽频带优势。尽管 Advantest 的设备能产生近乎业界的最优的信号谱宽质量,但其脊型波导的工艺加工和光学装调的精度要求苛刻,加工难度较高,目前在国内未见相关报道。因此本文设计了一种结构更简单的平板波导形式

的太赫兹辐射源, 极大地降低了铌酸锂波导的加工难度。通过将激光巧妙地耦合进波导层, 成功地产生太赫兹辐射。

2. 切伦科夫太赫兹辐射源工作原理

经典切伦科夫辐射[13]是带电粒子在介质中以超过该介质中光速的速度运动时发出的一种电磁辐射。带电粒子在介质内传播时, 传播路径上的每一点都会发射出成球面的辐射。当带电粒子传播速度高于介质内光的相速度时, 这些球面的辐射会在带电粒子后方叠加, 形成一个锥形的尾场, 产生辐射效应。此时辐射的传播方向与带电粒子运动方向间的夹角为切伦科夫辐射角 θ 。

将切伦科夫辐射应用到太赫兹辐射源时, 切伦科夫型辐射源产生太赫兹辐射的原理图如图 1 所示。切伦科夫型太赫兹辐射的产生机制源于超短激光脉冲作用于非线性晶体时, 泵浦脉冲引发的电子偏离平衡位置所产生的振荡现象, 这种振荡进而向外辐射太赫兹波。

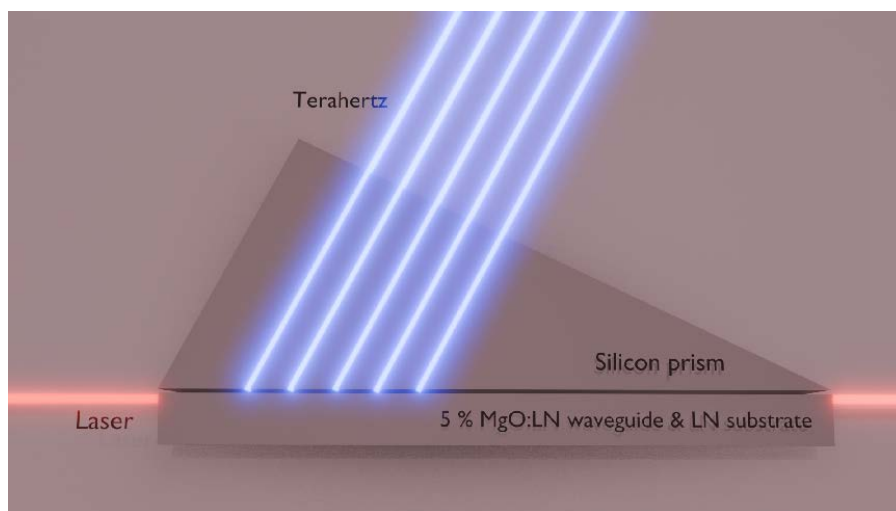


Figure 1. Schematic diagram of Cherenkov-type terahertz radiation generation

图 1. 切伦科夫型太赫兹辐射产生示意图

切伦科夫辐射角 θ 由在非线性晶体中的激发光、太赫兹波折射率 n_g 、 n_{THz} 决定[14]:

$$\cos(\theta) = \frac{\lambda_{\text{THz}}/n_{\text{THz}}}{2L_c} = \frac{\lambda_{\text{THz}}/n_{\text{THz}}}{\lambda_1\lambda_2/(n_1\lambda_2 - n_2\lambda_1)} \cong \frac{n_g}{n_{\text{THz}}} \quad (1)$$

其中 λ_{THz} 是产生的太赫兹波的波长; L_c 是表面激发波的相干长度; λ 表示输入光在差频产生(DFG)过程中的波长, 有 $\omega_1 - \omega_2 = \omega_{\text{THz}}$; $n_1 = n_2 \cong n_g$ 代表泵浦光在晶体中的折射率。由(1)式可知, 要满足切伦科夫型相位匹配条件需让 n_{THz} 大于 n_g 。

在非线性晶体中产生的太赫兹辐射传播到晶体-空气界面时, 当角度大于临界角便会发生全反射。可以通过选择折射率低于 n_{THz} 的包覆材料来防止全内反射。此时包层材料的辐射角 θ_c 可以通过斯涅耳公式计算获得。

$$\theta_c = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{n_{\text{THz}}}{n_c} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)\right) = \arccos\left(\frac{n_1\lambda_2 - n_2\lambda_1}{n_c(\lambda_2 - \lambda_1)}\right) \quad (2)$$

其中 n_c 是包覆材料在太赫兹波段的折射率。该方程等效于太赫兹波直接辐射到包层材料中的状况。由于方程中不存在晶体中太赫兹波折射率 n_{THz} , 因此该方法仅需满足条件: 非线性晶体在泵浦光波段下的折

射率 n_g 小于包层材料在太赫兹波段下的折射率 n_c 。这种方法被称为棱镜耦合切伦科夫相位匹配(PCC-PM), 由 Koji Suizu 等人提出[15]。

由于在光泵浦非线性晶体产生切伦科夫型太赫兹辐射的过程中, 存在相位失配和吸收损耗, 并且不能仅通过增加非线性晶体与泵浦光的相互作用长度和光泵浦功率来提高太赫兹强度。因此, 为了有效抑制太赫兹信号产生过程中的相位失配效应, 通常需要设计特定的波导结构。该波导结构的核心功能在于抑制非线性晶体中非线性极化波在垂直于导向模式方向(即垂直于晶体表面方向)上的相位失配。

3. 仿真与设计

基于以上的原理分析, 为了更高效的产生切伦科夫型太赫兹辐射, 需要对波导结构和棱镜材料进行选择。波导要求结构紧凑, 尽可能使泵浦光耦合到波导层表面, 以此降低非线性晶体对太赫兹信号的吸收损耗; 棱镜材料需折射率符合公式(2)要求, 从而满足相位匹配条件。

采用掺有 5 mol% MgO 的铌酸锂晶体作为波导传播介质, 以铌酸锂晶体作为衬底, 用特殊设计的硅棱镜进行太赫兹信号进行耦合。考虑到波导加工和泵浦光耦合中存在的困难, 因此将波导设计为波导层 10 mm (长) $\times$ 5 mm (宽) $\times$ 10 μ m (高), 衬底层 10 mm (长) $\times$ 5 mm (宽) $\times$ 1 mm (高)的结构, 波导俯视图与显微镜下侧视图如图 2 所示, 侧视图能明显分辨出波导层与衬底层; 建模如图 3 所示, 使用 y-cut 掺镁铌酸锂波导, 泵浦光在波导内沿 x 正方向传播。



Figure 2. Lithium niobate slab waveguide physical prototype

图 2. 铌酸锂平板波导实物

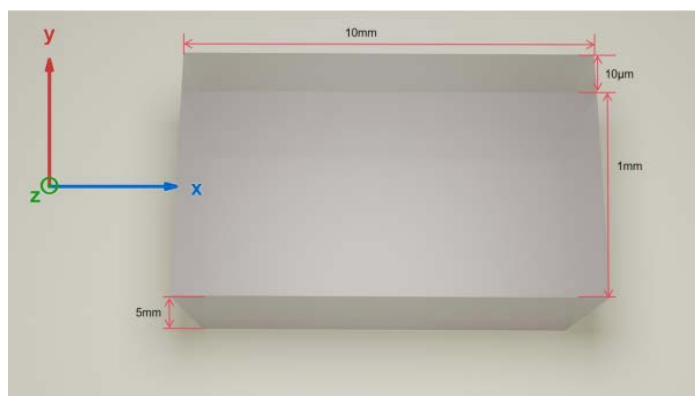


Figure 3. Lithium niobate slab waveguide modeling

图 3. 铌酸锂平板波导建模

由公式(1)(2)可知, 太赫兹信号在包层材料(硅棱镜)中的辐射角度 θ_c 由泵浦光波段的铌酸锂折射率 n_g 以及太赫兹波段的硅棱镜折射率决定 n_c 。在 1560 nm 处和太赫兹处的折射率分别为 2.2 和 3.4, 经计算得辐射角为 50° 。因此, 将硅棱镜的底角分别设置为 50° 和 40° , 以此使耦合产生的太赫兹波能够垂直于硅棱镜表面射出, 便于后续的探测和应用。

本实验采用波长为 1550 nm 的飞秒激光器作为泵浦光源, 其输出光功率为 123 mW, 脉冲宽度为 85 fs。为实现通过 Zemax 光学仿真软件, 我们成功将激光在水平方向上的光斑宽度压缩至 $10\ \mu\text{m}$ 以内, 如图 4 所示。具体光路设计如下: 1550 nm 光纤飞秒激光器产生的激光通过光纤传输至光纤准直器(图 4(a))进行准直(Thorlabs, F230APC-1550), 随后通过柱面镜(图 4(b))进行第一次光束聚焦(Thorlabs, LJ1960L1-C)。接着, 利用棒镜(图 4(c))对光斑在水平方向上进行二次聚焦(Edmund Optics, #54-087)。图 5(a)为泵浦光到达波导表面(图 4(d)中用橙色标亮处)时的光斑点列图(原始图像), 为更好观察光斑水平方向压缩情况, 适当调整图 5(a)的 x 轴坐标后如图 5(b)所示。当激光耦合进入波导层(图 4(d))时, 水平方向的光斑宽度压缩至约 $5.2\ \mu\text{m}$, 仿真光斑的宽度低于波导层厚度。



Figure 4. Optical path simulation diagram
图 4. 光斑压缩光路图

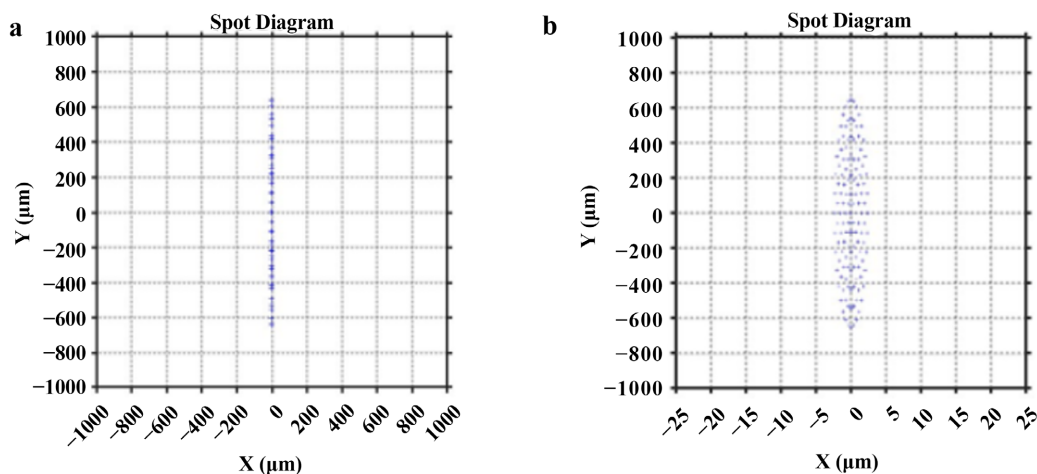


Figure 5. (a) Laser spot diagram (raw data); (b) Magnified laser spot diagram (X-axis adjusted)
图 5. (a) 光斑点列图(原始图); (b) 光斑放大点列图(x 轴调整图)

在该技术方案中, 如何将激光耦合进厚度仅有 $10\ \mu\text{m}$ 的掺镁铌酸锂波导层是决定产生太赫兹波效率的关键要素。因此设计了一套基于光纤准直镜、柱面镜以及棒镜的激光耦合系统。光路耦合三维图如图 6、光路实际搭建如图 7 所示。通过调节六轴调节架使泵浦光通过准直器以水平偏振态[16]射出。采用斩波器对激光进行调制, 斩波器的频率控制在 10 Hz, 这样高莱盒能在 10 Hz 处采集到信号。随后分别通过一片柱面镜和一片棒镜将激光在水平方向上尽可能压缩, 以此便于将激光耦合进波导中。太赫兹探测器高莱盒垂直于硅棱镜表面放置, 用于探测产生的太赫兹信号。为了判断激光耦合状态, 再采用一片柱面镜将光斑聚焦到 CCD 相机上。

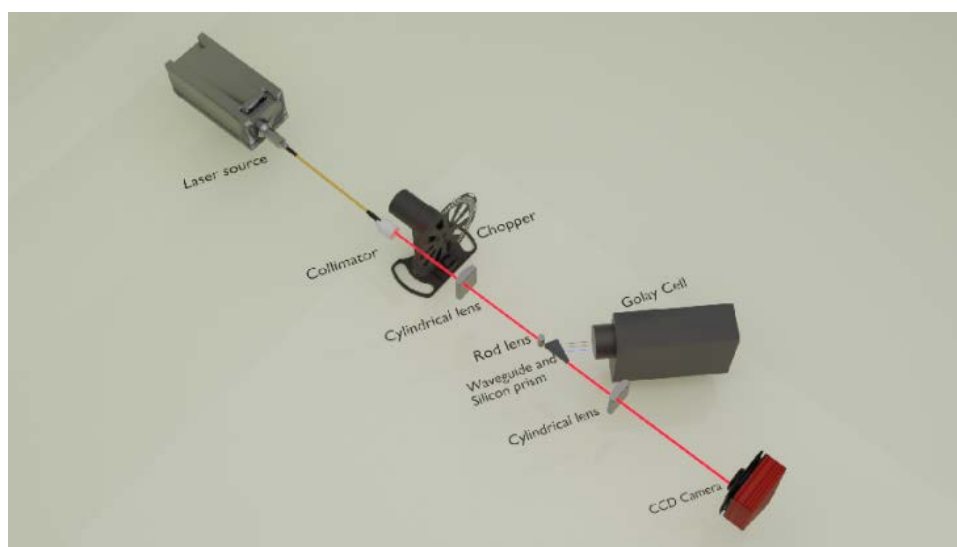


Figure 6. Optical path design diagram

图 6. 光路设计图

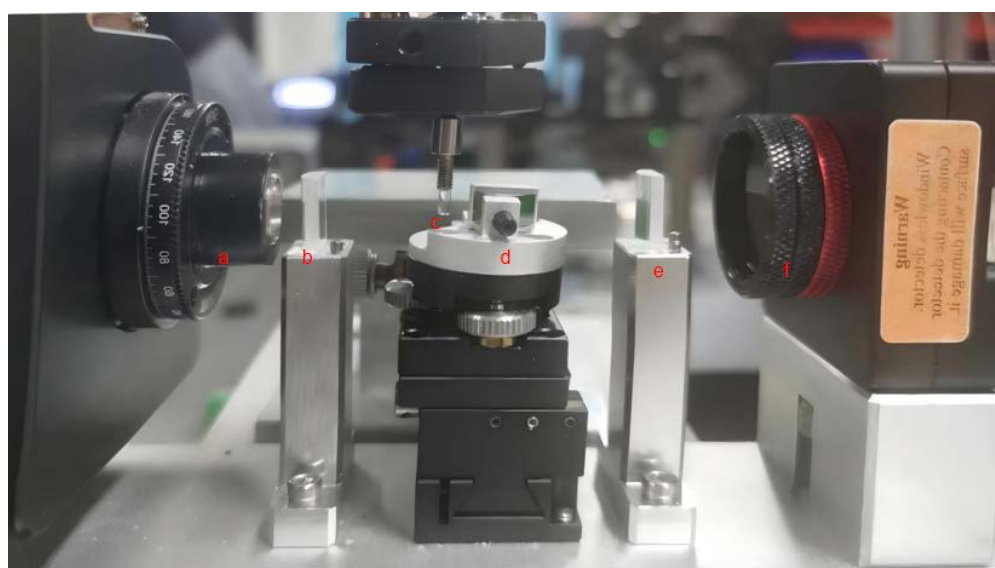


Figure 7. Assembly diagram of optical path. (a) Collimator; (b) Cylindrical mirror; (c) Rod mirror; (d) Lithium niobate waveguide; (e) Cylindrical mirror; (f) CCD camera

图 7. 光路装配图(a) 准直器; (b) 柱面镜; (c) 棒镜; (d) 铌酸锂波导; (e) 柱面镜; (f) CCD 相机

4. 实验

基于以上所设计的光路结构, 和实验中包含的光学元件, 需要将其进行固定和高精度调节。因此根据实验所需设计对应的工装结构, 以此来满足实验中的调节精度和方便紧凑结构的安装。在工装结构的基础上搭建实验系统, 对切伦科夫型太赫兹辐射进行研究, 通过调节光学元件和非线性晶体, 使飞秒激光耦合到贴近掺 5 mol % $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 的波导层表面的位置, 并通过 CCD 相机对激光耦合情况进行观察。

实验采用高莱盒(Tydex, GC-1P)来探测太赫兹信号。高莱盒属于热膨胀式探测器, 是一种通过内部的气体腔受热膨胀程度来模拟出被测信号的辐射功率大小的能量探测器件[16]。高莱盒具有优秀的灵敏度, 能对宽波长范围内的光线做出响应。但与之相对的, 高莱盒信号的探测容易受到环境光的干扰; 为降低

噪声的干扰, 需添加适当的遮挡物来保证实验的可信性。遮挡物选用黑纸、高阻硅、锗片: 黑纸用于遮挡环境光, 锗片用于遮挡 1550 nm 激光, 高阻硅具有反可见光、透太赫兹波的性质。通过调节光路系统中的棒透镜, 使光斑聚焦在铌酸锂波导层。随后仅对非线性晶体进行水平方向的调节, 根据 CCD 相机的光斑变化情况进行耦合判断。记录光斑耦合到衬底层(图 8(a))、衬底和波导层的过段位置(图 8(b))、波导层(图 8(c))。探测不同位置处的太赫兹信号强度。

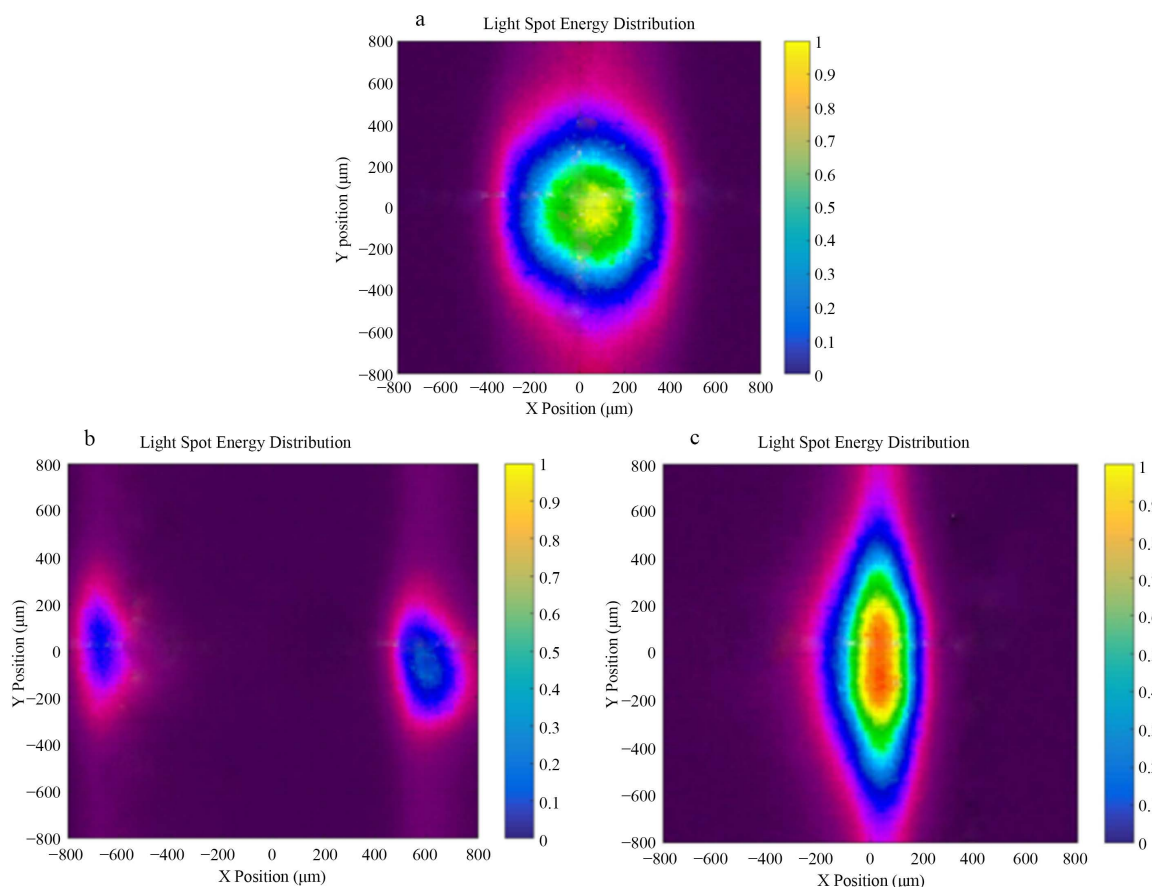


Figure 8. Spot diagram detected by CCD camera

图 8. CCD 相机探测光斑图

用高莱盒在图 8 的三个光斑位置处探测获得信号, 信号强度和拟合曲线如图 9 所示。图 9(a~c)分别对应于在衬底层、衬底与波导间、波导层探测的信号强度(分别与图 8(a~c)相对应); 图 9(d)代表泵浦光几乎全未通过波导的情况, 此时 CCD 相机无法探测到光斑。由图 9 可知, 高莱盒的信号强度随着贴近波导层而逐渐增强, 随后由于通过波导的泵浦光功率减少, 高莱盒信号迅速降低。

当光斑全部耦合进波导层时, 高莱盒所探测到的信号如图 10 红线所示, 此时高莱盒能量探测器在斩波器调制频率 10 Hz 处探测到能量波动。在相同位置关闭激光器获得环境光底噪。高莱盒探测信号强度远高于底噪信号, 证明获得太赫兹信号。

高莱盒探测信号强度约为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ V}$ (V_{rms}), 因为高莱盒探测获得正弦波, 有 $V_{\text{p-p}} = 2\sqrt{2}V_{\text{rms}}$ 。当斩波频率选择 10 Hz 时, 高莱盒的光学响应度约为 108.51 kV/W, 因此高莱盒软件中设定 $W_{\text{input}}/V_{\text{p-p}}$ 比例因子为 9.22×10^{-6} 。其中 $V_{\text{p-p}}$ 是峰峰值电压, 是信号电压的最大值与最小值之差。计算得高莱盒探测信号强度约为 6.52 nW。

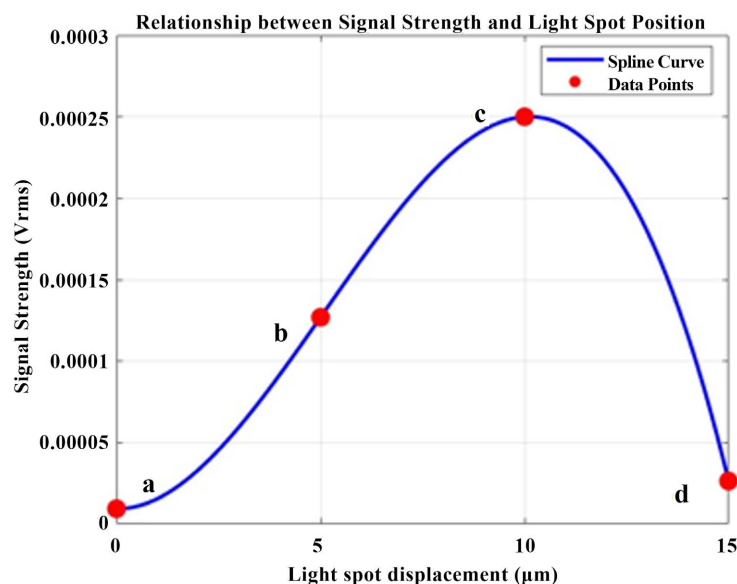


Figure 9. Variation in terahertz signal intensity at different coupling positions of the light spot

图 9. 光斑不同耦合位置时太赫兹信号强度变化

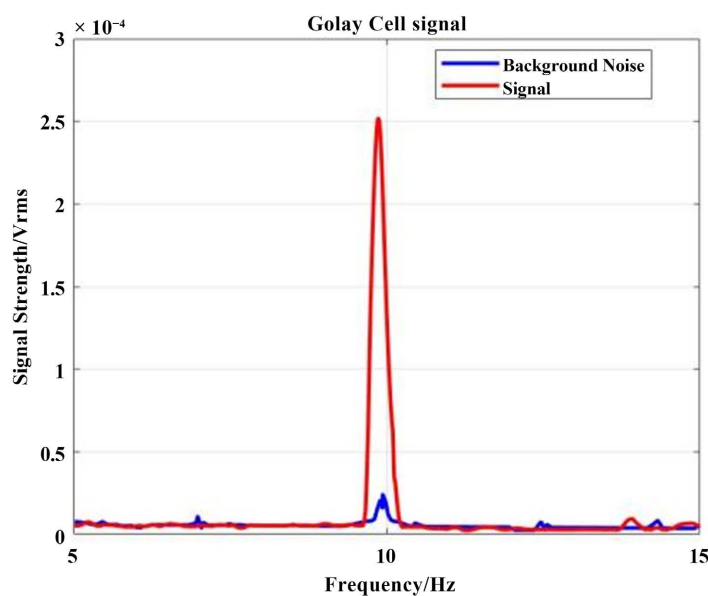


Figure 10. Golay cell: detection signal vs. baseline noise

图 10. 高莱盒的探测信号与底噪对比

5. 结论

本研究设计并实现了一种基于切伦科夫效应的平板波导型太赫兹辐射源, 采用掺有 5 mol% MgO 的铌酸锂晶体作为波导介质, 通过优化波导结构和光路设计, 成功实现了太赫兹辐射的产生并验证了太赫兹信号的有效探测。

本研究的创新点在于提出了一种结构简单、易于加工的切伦科夫型宽带太赫兹辐射源设计方案, 为太赫兹时域光谱系统的实际应用提供了新的技术路径。未来, 可进一步优化波导材料和结构设计, 提升太赫兹辐射的功率和频谱范围。

参考文献

- [1] Ferguson, B. and Zhang, X. (2002) Materials for Terahertz Science and Technology. *Nature Materials*, **1**, 26-33. <https://doi.org/10.1038/nmat708>
- [2] Zheng, Z., Fan, W., Li, H. and Tang, J. (2014) Terahertz Spectral Investigation of Anhydrous and Monohydrated Glucose Using Terahertz Spectroscopy and Solid-State Theory. *Journal of Molecular Spectroscopy*, **296**, 9-13. <https://doi.org/10.1016/j.jms.2013.12.002>
- [3] Murakami, H., Takarada, T. and Tonouchi, M. (2020) Low-Temperature Gaas-Based Plasmonic Photoconductive Terahertz Detector with Au Nano-Islands. *Photonics Research*, **8**, 1448-1456. <https://doi.org/10.1364/prj.395517>
- [4] 江情男, 谭智勇, 万文坚, 等. 动态范围超过 75 dB 的 InGaAs/InAlAs 光电导太赫兹探测天线制备与表征[J/OL]. 红外与毫米波学报. <http://202.127.1.39/hwyhmb/hwyhmbcn/article/abstract/2024214>, 2025-05-29.
- [5] Xue, B., Fan, W., Liu, H.L., et al. (2008) THz Generation and Detection Based on the Technology of Ultra-Fast Femtosecond Laser. *Acta Photonica Sinica*, **37**, 1-5.
- [6] Blanchard, F., Razzari, L., Bandulet, H.C., Sharma, G., Morandotti, R., Kieffer, J.C., et al. (2007) Generation of 1.5 μ J Single-Cycle Terahertz Pulses by Optical Rectification from a Large Aperture ZnTe Crystal. *Optics Express*, **15**, 13212-13220. <https://doi.org/10.1364/oe.15.013212>
- [7] Vodopyanov, K.L. (2006) Optical Generation of Narrow-Band Terahertz Packets in Periodically-Inverted Electro-Optic Crystals: Conversion Efficiency and Optimal Laser Pulse Format. *Optics Express*, **14**, 2263-2276. <https://doi.org/10.1364/oe.14.002263>
- [8] Hebling, J., Almasi, G., Kozma, I. and Kuhl, J. (2002) Velocity Matching by Pulse Front Tilting for Large Area THz-Pulse Generation. *Optics Express*, **10**, 1161-1166. <https://doi.org/10.1364/oe.10.001161>
- [9] Guiramand, L., Nneck, J.E., Ropagnol, X., Ozaki, T. and Blanchard, F. (2022) Near-Optimal Intense and Powerful Terahertz Source by Optical Rectification in Lithium Niobate Crystal. *Photonics Research*, **10**, 340-346. <https://doi.org/10.1364/prj.428418>
- [10] Wu, X., Kong, D., Hao, S., Zeng, Y., Yu, X., Zhang, B., et al. (2023) Generation of 13.9-mJ Terahertz Radiation from Lithium Niobate Materials. *Advanced Materials*, **35**, Article ID: 2208947. <https://doi.org/10.1002/adma.202208947>
- [11] Takeya, K., Minami, T., Okano, H., Tripathi, S.R. and Kawase, K. (2017) Enhanced Cherenkov Phase Matching Terahertz Wave Generation via a Magnesium Oxide Doped Lithium Niobate Ridged Waveguide Crystal. *APL Photonics*, **2**, Article ID: 016102. <https://doi.org/10.1063/1.4968043>
- [12] Suizu, K., Shibuya, T., Akiba, T., Tului, T., Otani, C. and Kawase, K. (2008) Čerenkov Phase-Matched Monochromatic THz-Wave Generation Using Difference Frequency Generation with a Lithium Niobate Crystal. *Optics Express*, **16**, 7493-7498. <https://doi.org/10.1364/oe.16.007493>
- [13] Čerenkov, P.A. (1937) Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding That of Light. *Physical Review*, **52**, 378-379. <https://doi.org/10.1103/physrev.52.378>
- [14] Auston, D.H. (1983) Subpicosecond Electro-Optic Shock Waves. *Applied Physics Letters*, **43**, 713-715. <https://doi.org/10.1063/1.94486>
- [15] Suizu, K., Shibuya, T., Uchida, H. and Kawase, K. (2010) Prism-Coupled Cherenkov Phase-Matched Terahertz Wave Generation Using a DAST Crystal. *Optics Express*, **18**, 3338-3344. <https://doi.org/10.1364/oe.18.003338>
- [16] Cao, H., Linke, R.A. and Nahata, A. (2004) Broadband Generation of Terahertz Radiation in a Waveguide. *Optics Letters*, **29**, 1751-1753.