

文章编号: 1672-8785(2025)09-0022-10

基于光学差频的太赫兹源设计与校准研究

朱军锋 张桂鸣 张 亭 胡晓宁 王 统
刘 明 杜志强 蒋金春

(中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试
技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘 要: 差频模块是可调谐太赫兹源的核心部件, 其性能直接影响太赫兹波的产生效率。为了提高太赫兹输出功率, 基于光功率放大后的激光参数, 设计了 2:1 和 3:1 的激光缩束系统, 使两束激光的光斑直径一致, 优化了合束效果。通过偏振态校准, 使激光保持水平线性偏振, 从而充分利用晶体的最大非线性系数。经过激光合束调试, 两束激光能够实现良好的合束, 且聚焦后可形成直径约为 22 μm 的光斑, 有效提升了差频效应。实验结果表明, 该模块成功实现了太赫兹波输出。

关键词: 太赫兹; 光学差频; 非线性晶体; 偏振

中图分类号: O433.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.09.004

Research on Design and Calibration of Terahertz Source Based on Optical Difference Frequency

ZHU Jun-feng, ZHANG Gui-ming, ZHANG Ting, HU Xiao-ning, Wang Tong,
LIU Ming, DU Zhi-qiang, JIANG Jin-chun

(Key Laboratory of Electronic Testing Technology, The 41th Research Institute of China
Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: The difference-frequency module is the core component of a tunable terahertz source, and its performance directly affects the efficiency of terahertz wave generation. To increase terahertz output power, 2:1 and 3:1 laser beam reduction systems are designed based on the laser parameters after optical power amplification. This ensures that the spot diameters of the two laser beams are consistent, optimizing the beam combining effect. Polarization calibration is used to maintain horizontal linear polarization of the lasers, thereby fully utilizing the maximum nonlinear coefficient of the crystal. After laser beam combining debugging, the two laser beams can be well combined, and after focusing, a spot with a diameter of approximately 22 μm can be formed, effectively enhancing the difference-frequency effect. Experimental results show that this module has

收稿日期: 2025-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(62127804); 安徽省自然科学基金项目(2308085QF215)

作者简介: 朱军锋(1990-), 男, 山东泰安人, 博士, 主要从事光电测试、太赫兹光谱测试技术等方面的研究。E-mail: qsy102@126.com

successfully enabled terahertz wave generation.

Key words: terahertz; optical difference frequency; nonlinear crystal; polarization

0 引言

太赫兹波是指频率范围为 0.1~10 THz 的电磁辐射, 其频谱介于红外光与毫米波之间。因此它是电子科学技术与光子科学技术的交叉研究领域, 其中长波波段可拓展应用电子学方法, 短波波段则适宜采用光子学技术。这种学科融合特性对太赫兹技术的发展具有重要的科学意义^[1-4]。

太赫兹波具有介质穿透能力强、电离能低以及相干性好等优异的物理属性, 其频域覆盖范围包含了物质丰富的微观特征信息。与傅里叶变换红外光谱技术^[5]一样, 太赫兹光谱技术能够实现对分子结构与功能的测量。分子间/分子内低频振动、晶格声子振动以及氢键伸缩/扭转振动对应的特征吸收峰均分布于太赫兹频段。这些跃迁过程形成的“指纹谱”可在分子层面解析生物信息^[6], 构成太赫兹光谱研究的核心。太赫兹光谱技术现已发展为化学分析、固体物理、分子光谱学等领域的交叉研究工具, 并在半导体载流子动力学、超材料以及自旋电子学等新兴方向实现深度应用^[7-13]。

光子学太赫兹源凭借其优异的相干特性、室温工作及结构简单等优势, 已成为太赫兹技术体系的重要组成部分。目前, 光子学太赫兹源主要包括太赫兹气体激光器、空气等离子体太赫兹辐射源、光电导天线, 以及基于非线性光学效应的光学整流、光学差频产生 (Difference Frequency Generation, DFG) 和参量振荡技术。其中, 光学差频产生技术作为最早于 20 世纪 60 年代提出的方法, 近三十年来取得了重要的突破^[14], 逐步发展为太赫兹辐射产生的重要技术路线之一。典型双波长激发源通常采用激光器、光学参量振荡器或其复合系统, 不同构型在输出功率、调谐范围等关键参数上呈现显著差异。

本文设计了一种基于光学差频的可调谐太赫兹源, 对差频模块的缩束系统进行光学设计仿真, 并对两束激光的偏振态进行校准调节, 使其处于水平状态, 进而对两束激光的合束状态进行调节, 最后实现太赫兹波的输出。

1 基本原理

光学差频的物理本质源于介质二阶非线性光学效应。当频率分别为 ω_1 和 ω_2 的两束激光在非线性介质中发生耦合作用, 且满足相位匹配条件时, 介质的非线性极化场将会激发两者频率之差的辐射信号, 即

$$\omega_{THz} = \omega_1 - \omega_2 \quad (1)$$

光学差频过程遵循能量守恒与动量守恒定律。为了实现差频太赫兹辐射在传输过程中的持续增益, 必须满足相位匹配条件。受限于介质色散特性, 三波相互作用通常存在波矢失配 ($\Delta k \neq 0$), 导致空间不同位置激发的差频光发生相消干涉, 显著抑制转换效率。因此, 相位匹配是实现高效差频转换的核心要素。实验上, 普遍采用角度调谐、温度调控或准相位匹配 (Quasi-Phase Matching, QPM) 等技术来加以解决。

通过非线性晶体差频, 可在室温条件下获得窄线宽、宽调谐的中红外光源, 拓展了传统激光器的波长范围。差频技术作为传统中红外激光系统的有益补充, 可将激光进行频率转换以产生红外及远红外辐射, 现已成为产生太赫兹波的有效手段。

采用差频方法产生的太赫兹波具有实验装置结构简单、无阈值效应、调谐范围宽且线宽窄等优点。得益于窄线宽及室温工作特性, DFG 技术非常适用于实验室的中红外波段气体分析, 在大气痕量气体高灵敏检测与吸收光谱测量领域具有重要价值。

在众多光学方法中, 光学差频法是唯一一

种能在特定条件下实现太赫兹输出功率随泵浦激光功率增加而增加的技术。因此,它被视为最有望接近量子转换效率极限的方案。其技术核心在于:选用具有较大二阶非线性系数且对太赫兹波吸收低的非线性晶体,并确保泵浦光波长接近、输出功率高,以满足晶体中的相位匹配条件。基于此,理论上可实现宽调谐、窄线宽、高功率的相干太赫兹波输出。

实验中,要得到高功率的太赫兹波输出,提高光学差频的转换效率,还需要对用于差频的两束激光进行缩束整形,使其具有相同的光斑直径和发散角,并且具有相同的偏振方向和良好的合束质量。

2 硬件总体方案

基于光学差频的可调谐太赫兹源的硬件总体方案如图 1 所示,主要包含固定波长激光模块、可调谐激光模块、掺铒光纤放大器、差频模块、探测器、数据采集与控制模块。其中,差频模块包含激光缩束系统、合束镜、斩波器、聚焦镜、非线性晶体、离轴抛物反射镜和光阱等。

基于光学差频的可调谐太赫兹源的泵浦源为两台近红外波段的窄线宽激光器。其中一台

激光器的输出波长可连续调谐,另一台激光器的输出波长为固定值。为提高太赫兹波产生功率,需要提高基频光功率。因此,在两台可调谐激光器的输出口接上掺铒光纤放大器,将基频光功率提高至瓦量级。两束激光分别经过两个缩束系统后拥有相同的光斑直径和发散角。经合束镜合束后,利用透镜将双波长泵浦光整形聚焦至晶体表面。通过非线性晶体的差频效应产生太赫兹波,然后入射到探测器上,实现太赫兹光谱测量。下面介绍激光缩束系统设计以及光学差频系统的测试与校准。

2.1 激光缩束系统设计与仿真

两束激光经过光纤放大器的功率放大后,空间光输出光斑直径较大,分别约为 2 mm 和 3 mm。为了更加有利于光学差频效应,需对两束激光进行缩束,使其拥有相同的光斑直径和发散角。现采用 1 mm 的光束直径,因此需要分别设计 2:1 和 3:1 的缩束系统。

对 2:1 缩束系统进行光学设计仿真。为了实现缩束,系统采用一个由平凸透镜和平凹透镜构成的透镜组。平行光入射,设置入瞳直径为 2 mm。平凸透镜的曲率半径设置为 25.8 mm,厚度为 5.3 mm,半口径为 12.7 mm;平

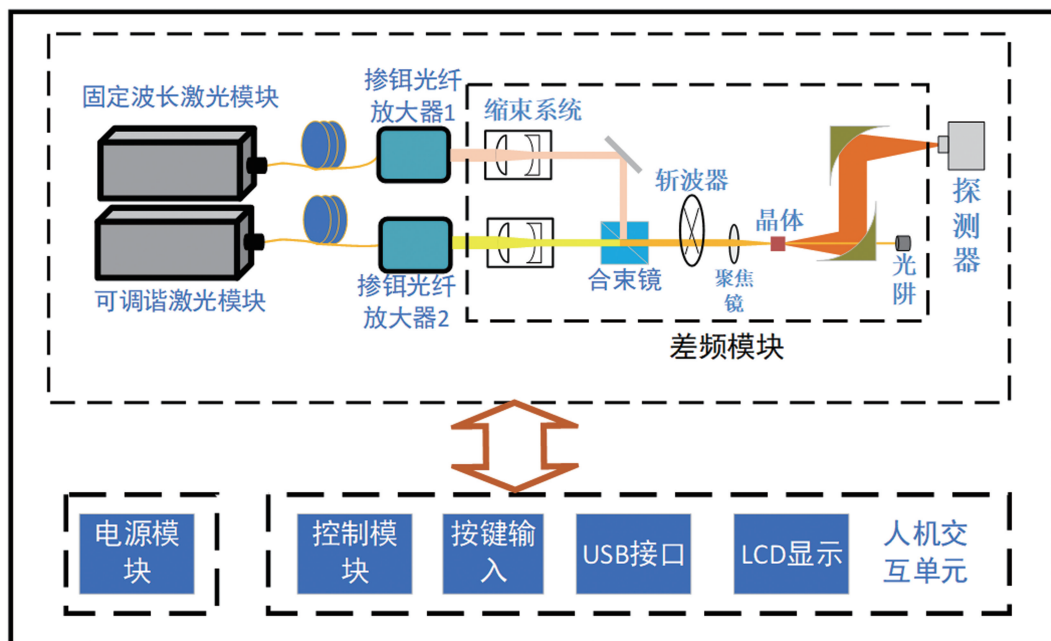


图 1 基于光学差频的可调谐太赫兹源的硬件总体方案

凹透镜的曲率半径设置为 -12.9 mm , 厚度为 3 mm , 半口径为 6.35 mm 。图 2 为通过 2:1 缩束系统仿真生成的二维布局图和点列图, 得到的几何最大半径值为 0.5 mm 。

3:1 缩束系统与 2:1 缩束系统的设计类似, 都是通过平凸透镜和平凹透镜的组合来实现缩束。对 3:1 缩束系统进行光学设计仿真。平行光入射, 设置入瞳直径为 3 mm 。平凸透镜的曲率半径设置为 38.6 mm , 厚度为 4.1 mm , 半口径为 12.7 mm ; 平凹透镜的曲率半径设置为 -12.9 mm , 厚度为 3 mm , 半口径为 6.35 mm 。图 3 为 3:1 缩束系统的二维布局图和点列图, 得到的几何最大半径值为 0.5 mm 。

用两个缩束系统对光束进行缩束后, 使其光束直径相同并具有相同的发散角, 然后通过合束镜将两束光合为一束, 并利用聚焦透镜将其聚焦到非线性晶体中, 从而产生太赫兹波。

2.2 光学差频系统的测试与校准

由于非线性晶体在不同方向上的二阶非线性系数不同, 因此利用光学差频产生太赫兹波(除了与泵浦激光的波长、功率有关, 也与激光的偏振方式有关)。为了利用晶体的最大非线性系数, 要求输出的两束激光偏振相同, 因此需对输出激光的偏振态进行测试。实验中通过六轴调节架可以实现对激光偏振输出的调节。图 4 为激光偏振输出测试原理图。在偏振分析仪前面设置激光衰减片, 分别对固定波长激光和可调谐激光的偏振态进行测试。通过调节衰减片的衰减倍数, 使射入偏振分析仪的光强处在偏振分析仪要求的功率范围内。最后实验测得固定波长激光和可调谐激光的激光功率在合理范围内时, 如图 5 和图 6 所示, 两束激光的偏振态都是在水平方向, 因此满足实验要求。

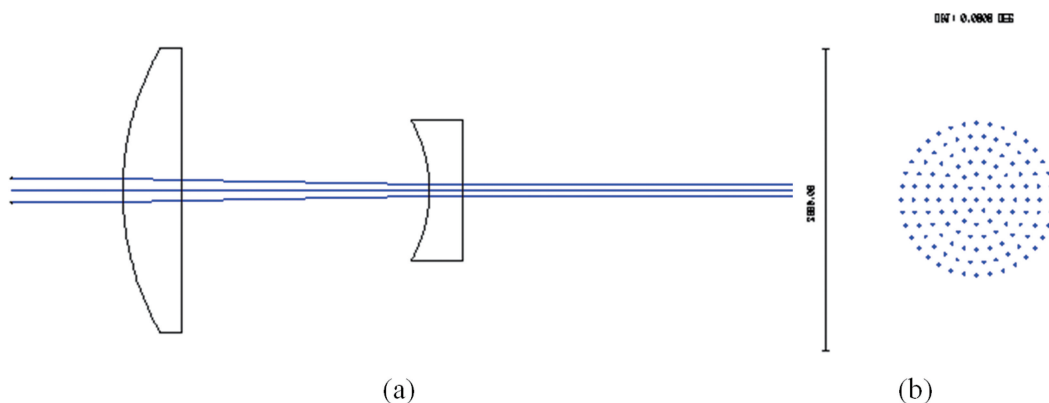


图 2 2:1 缩束系统: (a)二维布局图; (b)点列图

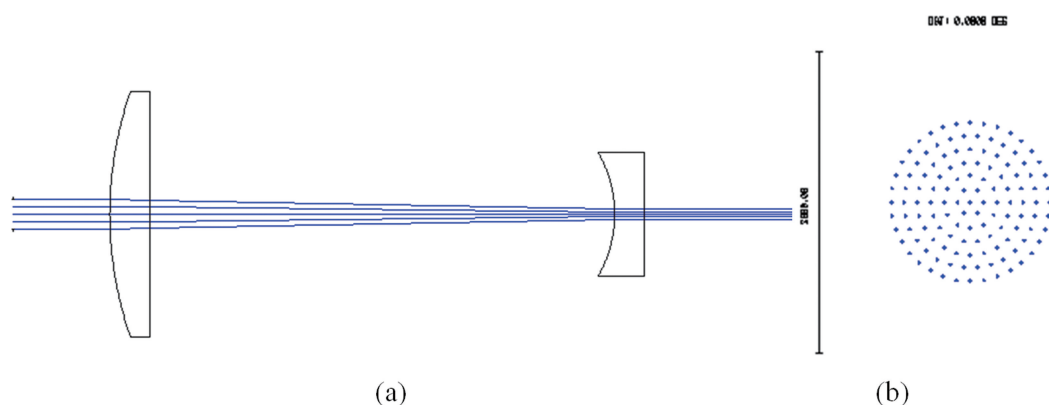


图 3 3:1 缩束系统: (a)二维布局图; (b)点列图

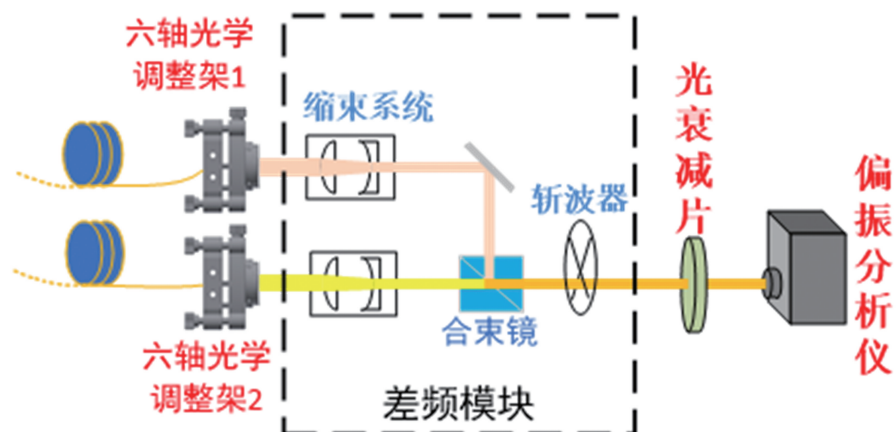


图 4 激光偏振输出测试原理图

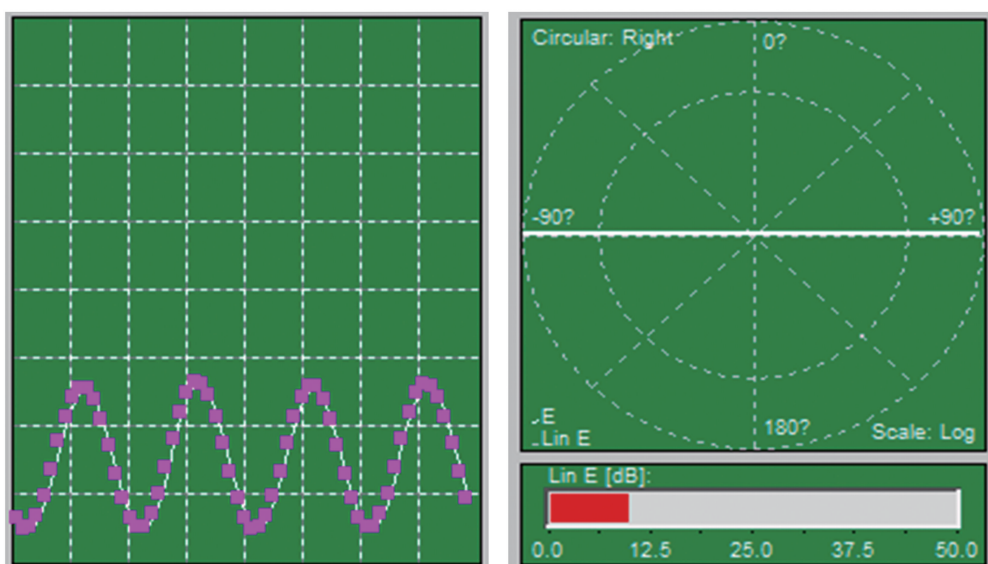


图 5 固定波长激光偏振输出测试结果

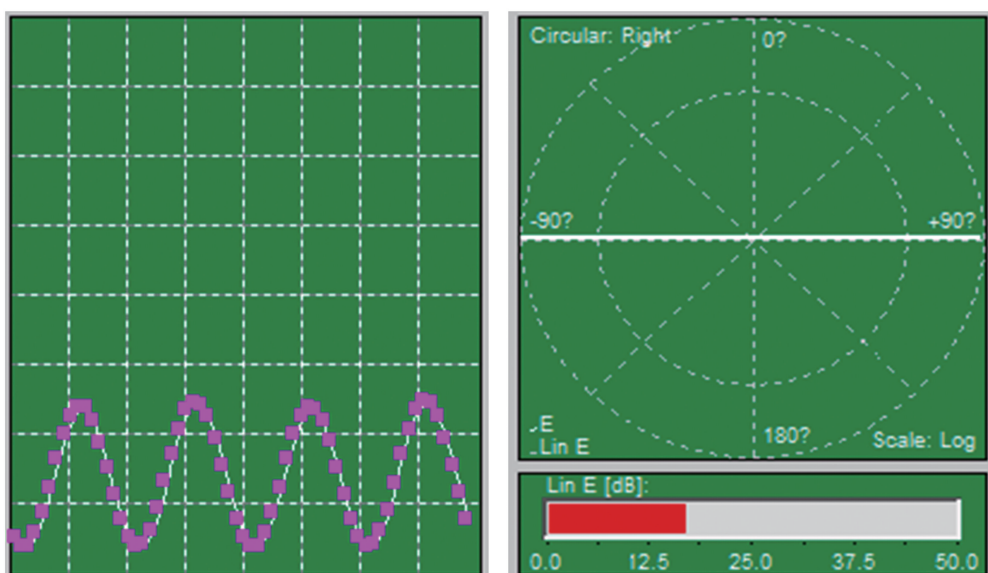


图 6 可调谐激光偏振输出测试结果

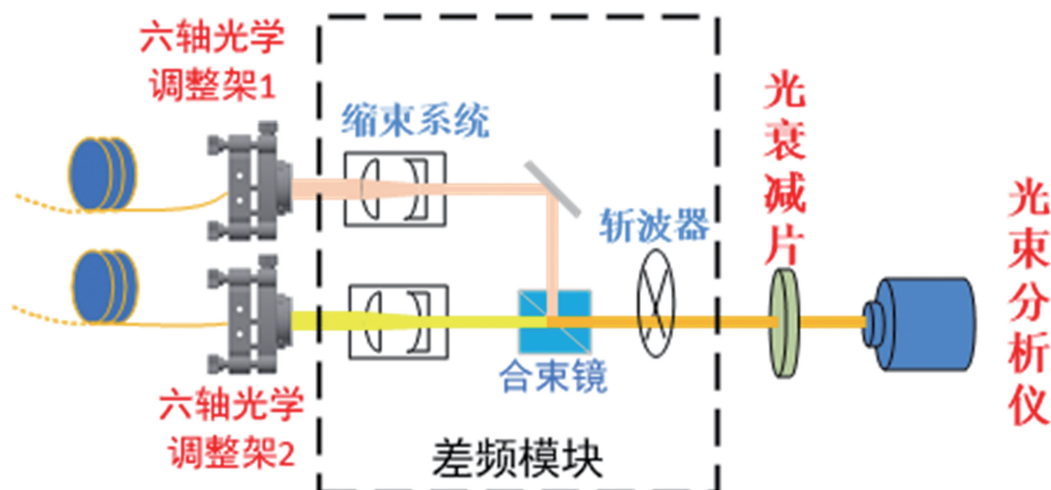


图 7 激光输出光束形态测试系统结构图

完成对泵浦光偏振态输出测试后, 要提高两束激光的太赫兹波转换效率, 而且还需要对两束激光的合束质量进行测试分析。

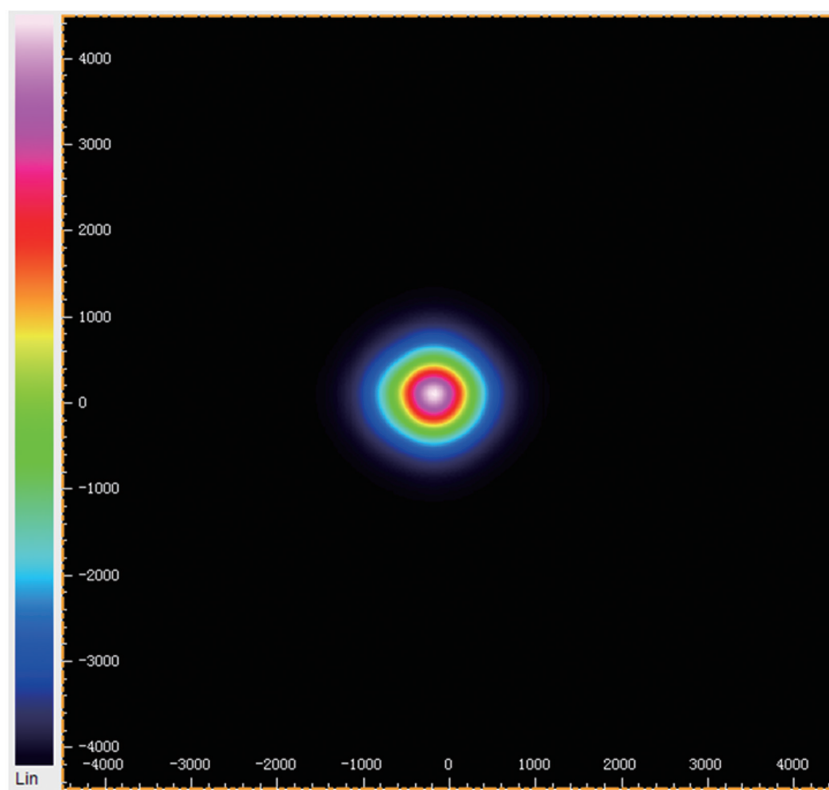
首先需要将光功率放大后的固定波长激光和可调谐激光进行合束。然后利用光束分析仪进行检测, 如图 7 所示。同样为了避免激光功率太大而损坏光束分析仪, 先利用激光衰减片对激光功率进行衰减, 然后再进行测试。首先对两路光分别检测, 得到其输出光束, 如图 8 所示。可以看出, 两束激光输出均匀的高斯光束。

利用光学调整座对两束激光输出进行空间位置调节, 使两束激光在空间中重合。然后前后移动光束分析仪, 验证两束光在传播方向上的空间重合效果, 使其具有良好的合束质量。最终的合束激光输出光束如图 9 所示。

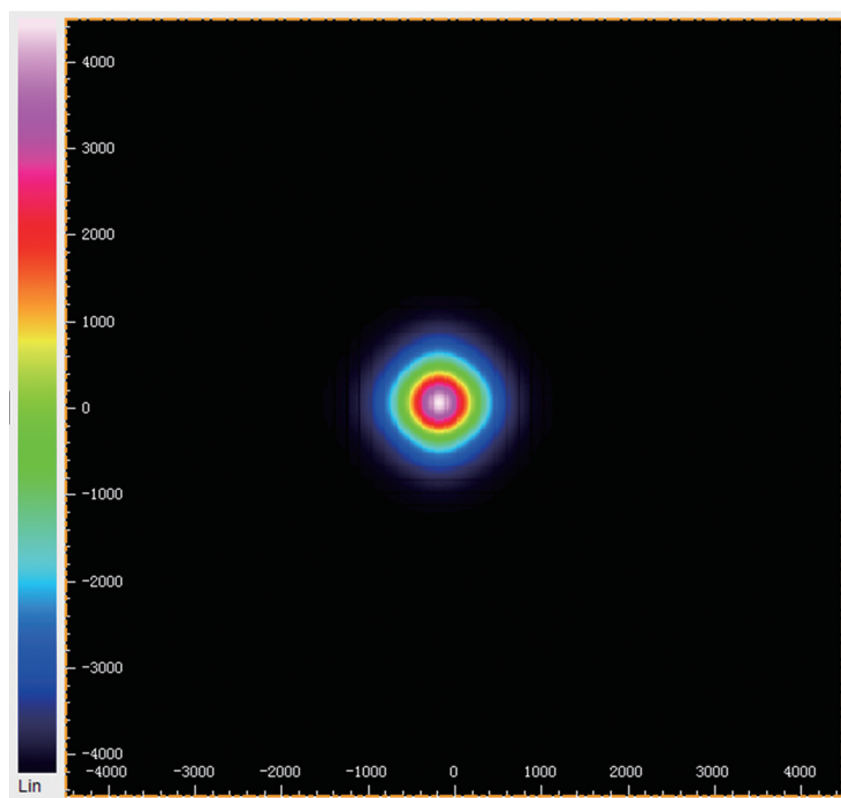
为了更好地在非线性晶体中产生太赫兹波, 需要对合束光束进行聚焦, 且保证两束光合束后的重合度良好。实验中利用聚焦透镜对光束进行聚焦, 然后利用光束分析仪测试光束质量。如图 10 所示, 聚焦后的激光仍为高斯光束。在透镜焦点处, 两束激光合束较好, 直径约为 $22\ \mu\text{m}$ 。若合束不好, 则需利用光学调整架上下左右俯仰调节, 通过前后移动光束分析仪的位置, 保证两束光合束后的重合度良好。

3 实验测试

按照图 2 搭建基于光学差频的可调谐太赫兹源。可调谐激光模块的波长范围为 $1500\sim 1640\ \text{nm}$, 波长分辨率为 $0.1\ \text{pm}$, 线宽为 $100\ \text{kHz}$; 其对应的光纤放大器的工作波长处于 C 波段, 输入功率范围为 $-6\sim 10\ \text{dBm}$, 饱和输出功率大于等于 $40\ \text{dBm}$ ($0\ \text{dBm}$ 输入)。实验中, 将两个激光模块的输出功率分别设置为 $3\ \text{dBm}$, 激光合束镜的透射/反射比为 $3:7$ 。通过调节两个光纤放大器的输出功率, 使两束激光经过合束镜后的功率均为 $3.2\ \text{W}$ 。将斩波器的频率设置为 $15\ \text{Hz}$, 锁相放大器的参考频率设置为外部参考频率, 即斩波器的频率。对两束激光的偏振态和合束质量进行测试分析后, 将非线性晶体放到聚焦镜的焦点位置上, 利用位移台微调晶体的前后位置, 使探测器得到最大的太赫兹信号。然后调节可调谐激光器的波长, 可分别得到 $2.5\ \text{THz}$ 、 $3.26\ \text{THz}$ 、 $4.5\ \text{THz}$ 的太赫兹输出, 如图 11 所示。通过对三个单频太赫兹波进行测试可以发现, 不同频段的太赫兹波强度存在一定差异。其中, 在 $2.5\ \text{THz}$ 波段附近的太赫兹波信号相对较强, 信噪比较好, $3.26\ \text{THz}$ 和 $4.5\ \text{THz}$ 两个波段的信号强度相对较弱。另外, 对于某一单频太赫兹波, 其强度随时间变化不大。



(a)



(b)

图 8 输出光束: (a)固定波长激光; (b)可调谐激光

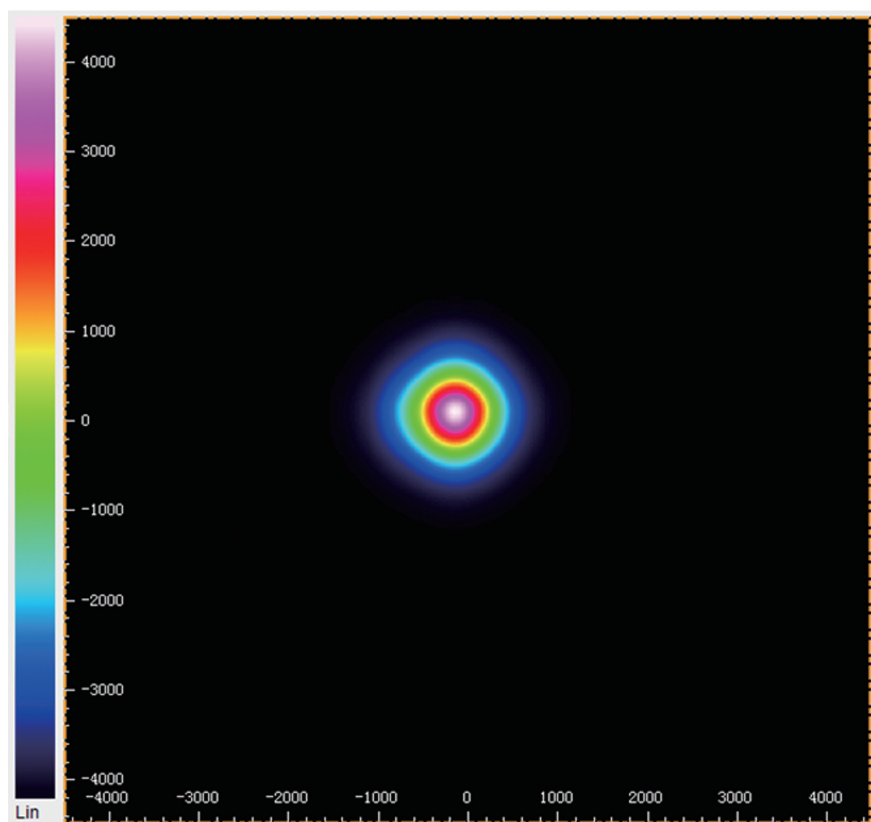


图 9 合束激光输出光束

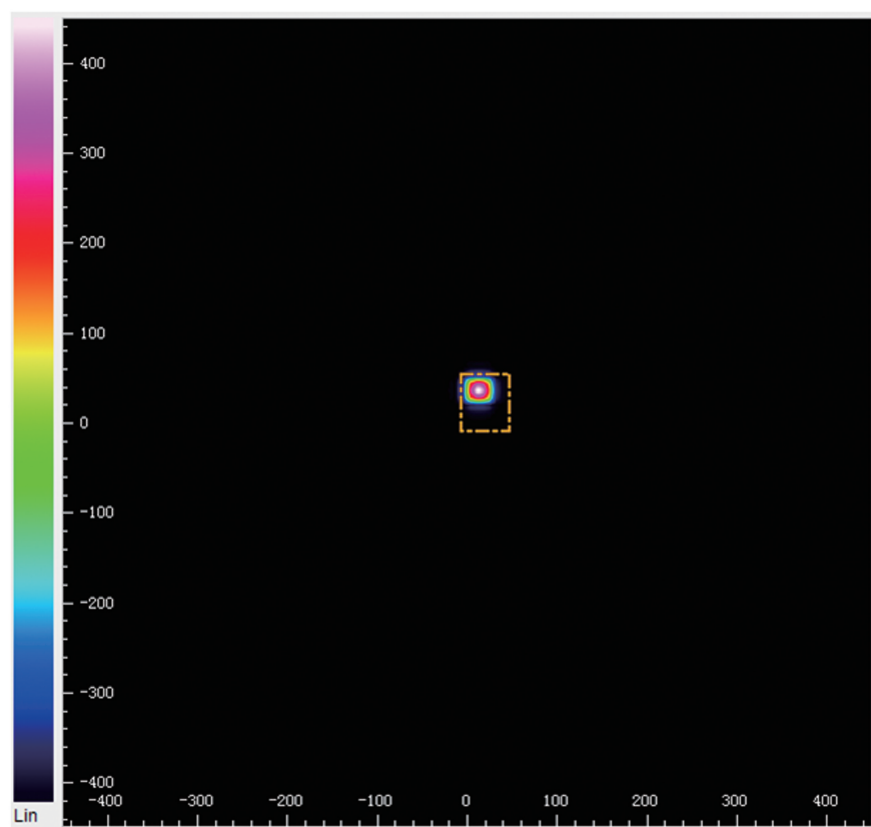


图 10 合束激光聚焦后的输出光束

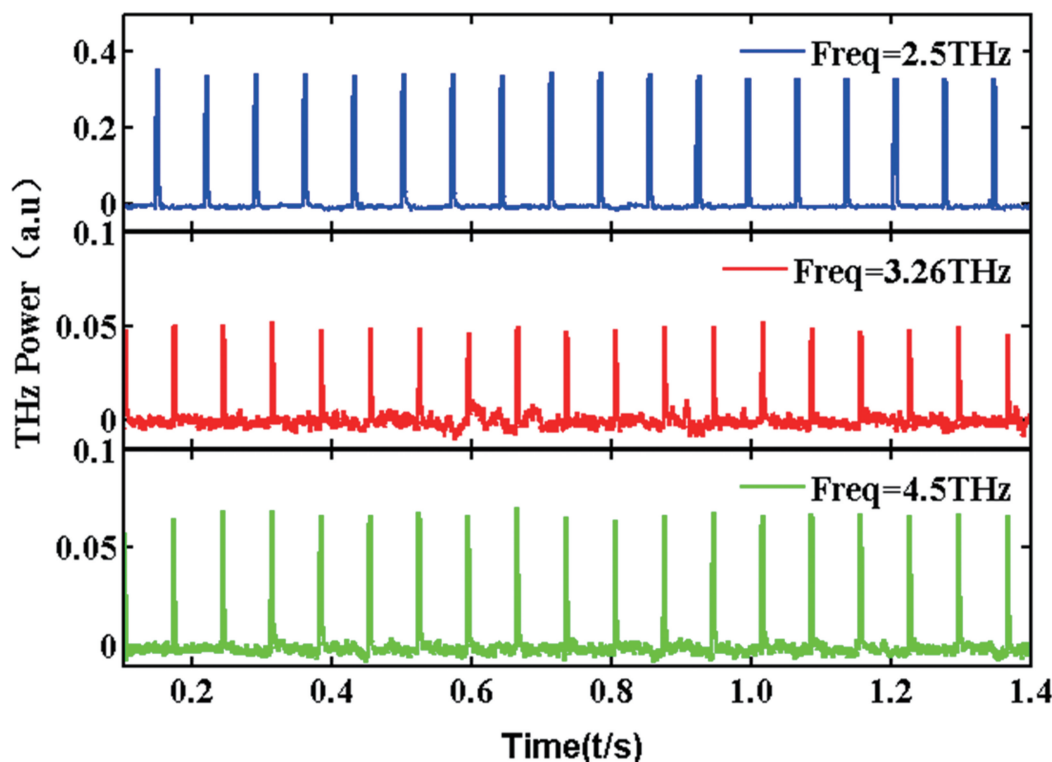


图 11 太赫兹波数据

4 结束语

差频模块是基于光学差频的可调谐太赫兹源的核心模块,是产生太赫兹波的关键所在。通过对差频模块的仿真设计与测试校准,有利于提高太赫兹波的转换效率和输出功率。本文根据两束光放大后的激光参数,分别设计了2:1和3:1的激光缩束系统,使两束激光具有相同的光斑直径,从而更好地将激光合束入射到非线性晶体中。同时,为了利用晶体的最大非线性系数,通过对两束激光的偏振态进行测试校准,使其偏振态都处在水平方向;为了实现两束激光在晶体中更好地产生差频效应,也对两束激光的合束效果进行了调试校准,使其具有较好的合束质量。经过聚焦镜后,可以产生直径约为22 μm 的光斑。在完成差频模块的测试校准后,通过实验测试,成功实现了太赫兹波的输出。接下来,还需要进一步优化实验方案,提高太赫兹信号强度(尤其是高频太赫兹波段)。

参考文献

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展 [J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.
- [2] 郑新, 刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(II) [J]. 微波学报, 2011, 27(1): 1-5.
- [3] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2010, 22(6): 703-707.
- [4] Hwang H Y, Fleischer S, Brandt N C, et al. A review of non-linear terahertz spectroscopy with ultrashort tabletop-laser pulses [J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(18): 1447.
- [5] Zhu J F, Li C R, Chen Y H, et al. Design and simulation of control and sampling circuits for an open-path Fourier transform infrared spectrometer based on a rotating mirror [J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(2): 025527.
- [6] 王馨达, 宋正勋, 李岩, 等. 基于太赫兹光谱的DNA检测及应用综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 170003.
- [7] Baxter J B, Guglietta G W. Terahertz spectroscopy [J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(12): 2351-2361.

- 4342–4368.
- [8] Ulbricht R, Hendry E, Shan J, et al. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2011, **83**(2): 543–586.
- [9] Gu J Q, Singh R, Liu X J, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 1151.
- [10] Kan T, Isozaki A, Kanda N, et al. Enantiomeric switching of chiral metamaterial for terahertz polarization modulation employing vertically deformable MEMS spirals [J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 8422.
- [11] Torosyan G, Keller S, Scheuer L, et al. Optimized spintronic terahertz emitters based on epitaxial grown Fe/Pt layer structures [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 1311.
- [12] Qiu H S, Kato K, Hirota K, et al. Layer thickness dependence of the terahertz emission based on spin current in ferromagnetic heterostructures [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(12): 15247–15254.
- [13] Kato M, Tripathi S R, Murate K, et al. Non-destructive drug inspection in covering materials using a terahertz spectral imaging system with injection-seeded terahertz parametric generation and detection [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(6): 6425–6432.
- [14] Ding Y J, Zhao P, Ragam S, et al. Recent progress on terahertz generation based on difference frequency generation: from power scaling to compact and portable sources [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(11): 110004.