

基于L波段激光差频的连续精调谐太赫兹辐射源

李明星 吴泽鹏 蔚佳昕 贺文君 游亚军 刘毅 丑修建 张乐

Continuous fine-tunable terahertz radiation source based on L-band laser difference frequency

LI Ming-xing, WU Ze-peng, YU Jia-xin, HE Wen-jun, YOU Ya-jun, LIU Yi, CHOU Xiu-jian, ZHANG Le

引用本文:

李明星, 吴泽鹏, 蔚佳昕, 贺文君, 游亚军, 刘毅, 丑修建, 张乐. 基于L波段激光差频的连续精调谐太赫兹辐射源[J]. *中国光学*, 2026, 19(3): 1–8. doi: 10.37188/CO.2025–0149

LI Ming-xing, WU Ze-peng, YU Jia-xin, HE Wen-jun, YOU Ya-jun, LIU Yi, CHOU Xiu-jian, ZHANG Le. Continuous fine-tunable terahertz radiation source based on L-band laser difference frequency[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(3): 1-8. doi: 10.37188/CO.2025-0149

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0149>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于太赫兹全介质超表面的独立双带连续域束缚态

Independent dual-band bound states in the continuum based on terahertz all-dielectric metasurfaces

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1230 <https://doi.org/10.37188/CO.EN–2025–0004>

自注入锁定激光器的频率热调谐方法改进

Improved method for frequency-thermal tuning of a self-injection locked laser

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1265 <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0025>

低噪声宽调谐 nm 分布式布拉格反射窄线宽单频光纤激光器

Low-noise wide tuning -nm DBR narrow-linewidth single-frequency fiber laser

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1289 <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0071>

类H型结构的太赫兹带阻滤波器

Terahertz band-stop filter with H-type structure

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 757 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0179>

带宽可调谐的太赫兹超构材料半波片器件

Bandwidth-tunable terahertz metamaterial half-wave plate component

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 701 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0198>

基于狄拉克半金属的可调谐反射自旋解耦编码超表面

Tunable reflective spin-decoupled encoding metasurface based on Dirac semimetals

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 968 <https://doi.org/10.37188/CO.EN–2024–0037>

文章编号 2097-1842(2026)03-0001-08

基于 L 波段激光差频的连续精调谐太赫兹辐射源

李明星^{1,2,3,4}, 吴泽鹏^{1,2,3,4}, 蔚佳昕^{1,2,3,4}, 贺文君^{1,2,3,4*}, 游亚军^{1,2,3,5}, 刘毅^{1,2,3,4*},
丑修建^{1,2,3,4}, 张乐^{1,2,3,4}

1. 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室;
2. 铁电物理微纳器件与系统山西省重点实验室;
3. 电子测试技术重点实验室;
4. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051;
5. 中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要:本文提出了基于 L 波段激光差频的连续精调谐太赫兹辐射源, 频率调谐范围为 0.1~2.7 THz, 调谐精度为 1 GHz。设计了一种全保偏光纤链路, 包括保偏隔离器、保偏耦合器和保偏掺铒光纤放大器, 以保持两束光之间的偏振态一致。利用 L 波段双激光差频激发 InGaAs 高性能光电导天线, 在 1568.8~1589.6 nm 波长范围内产生 0.1~2.7 THz 连续太赫兹辐射。使用高莱盒探测器和太赫兹扫描法布里-珀罗干涉仪对太赫兹波分别进行功率及频率测试。结果表明, 太赫兹波在 25 分钟内的功率不稳定性在 4% 以内, 0.5 THz、1 THz 处的频率测量结果与 L 波段双激光的间隔频率高度一致。此外, 在 0.9~1 THz 范围内, 实现了 1 GHz 的高精度调谐, 对应 0.008 nm 的波长间隔。该连续精调谐太赫兹辐射源在高精度光谱检测等领域具有较高的应用潜力。

关键词: 太赫兹辐射源; L 波段差频; 连续精调谐

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0149 CSTR: 32171.14.CO.2025-0149

收稿日期: 2025-11-28; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. U23A20639, No. U2341210, No. 62401524, No. 62371426, No. 92364107, No. 62450003); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (No. 2023A1515110148)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U23A20639, No. U2341210, No. 62401524, No. 62371426, No. 92364107, No. 62450003); Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (No. 2023A1515110148)

Continuous fine-tunable terahertz radiation source based on L-band laser difference frequency

LI Ming-xing^{1,2,3,4}, WU Ze-peng^{1,2,3,4}, YU Jia-xin^{1,2,3,4}, HE Wen-jun^{1,2,3,4*}, YOU Ya-jun^{1,2,3,5}, LIU Yi^{1,2,3,4*},
CHOU Xiu-jian^{1,2,3,4}, ZHANG Le^{1,2,3,4}

(1. *State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument;*

2. *Shanxi Key Laboratory of Ferroelectric Physical Micro-nano Devices and Systems;*

3. *Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory;*

4. *School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;*

5. *School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)*

* *Corresponding author, E-mail: hewenjun@nuc.edu.cn; liuyi28@163.com*

Abstract: This paper presents a continuous fine-tunable terahertz radiation source based on L-band laser difference frequency, with a frequency tuning range of 0.1 to 2.7 THz and a tuning accuracy of 1 GHz. A fully polarization-maintaining fiber link, including polarization-maintaining isolators, polarization-maintaining couplers, and polarization-maintaining erbium-doped fiber amplifiers, was designed to keep the polarization states of the two beams consistent. By using the difference frequency of L-band dual lasers to excite the In-GaAs high-performance photoconductive antenna, continuous terahertz radiation ranging from 0.1 to 2.7 THz was generated within the wavelength range of 1568.8 to 1589.6 nm. The power and frequency of the terahertz waves were respectively tested using a Golay cell detector and a terahertz scanning Fabry-Perot interferometer. The results show that the power instability of the terahertz wave within 25 minutes is within 4%, and the frequency measurement results at 0.5 THz and 1 THz are highly consistent with the frequency interval of the L-band dual lasers. Additionally, within the range of 0.9 to 1 THz, a high-precision tuning of 1 GHz was achieved, corresponding to a wavelength interval of 0.008 nm. This continuously fine-tunable terahertz radiation source has high application potential in high-precision spectral detection and other fields.

Key words: Terahertz radiation source; L-band difference frequency; continuous fine tuning

1 引 言

太赫兹波 (Terahertz, THz) 介于毫米波和红外波之间, 通常是指频率从 0.1 THz 到 10 THz, 具有宽带性、相干性、指纹性、低能性等诸多优异特性^[1-5]。自 20 世纪 90 年代以来, 太赫兹技术在材料科学、信息通信、光谱分析、非破坏检测、安全成像、生物医学等领域的应用不断拓展^[6], 被誉为继微波、毫米波和红外光之后的新一代战略性电磁波资源。然而, 由于太赫兹波处于电子学与光子学交界区域, 传统的电子器件难以实现高效发射, 而光子学技术在该波段又尚未成熟, 因而该波

段曾长期处于“技术真空地带”。随着超快激光、非线性光学器件、半导体材料等技术的快速发展, 太赫兹源、探测器和调控器件取得了显著进展^[7-8], 逐步打通了“太赫兹空缺”。其中, 太赫兹源作为系统的关键前端, 其输出性能直接决定了太赫兹系统的带宽、分辨率、动态范围以及应用深度^[9-14]。

根据发射方式和波形特征, 太赫兹源可分为脉冲型太赫兹源与连续波太赫兹源两类^[14-16]。其中, 连续太赫兹源因具备可调谐、高分辨率、长时间稳定输出等优势, 成为太赫兹光谱、物质识别和相干成像等应用的重要支撑技术。目前实现连续太赫兹辐射的主要方法包括: 光电导天线技术、

量子级联激光器以及非线性晶体差频法等^[17-21]。其中, 光电导天线技术因其结构简单、波段覆盖广、可调性强, 广泛用于实验室的太赫兹连续波源研究与开发。光电导混频技术通常利用两台频率相近、稳定性高的窄线宽激光器, 其输出光通过合束后照射到一块高响应速度的光电导材料(如 LT-GaAs、InGaAs/InAlAs、ErAs:InGaAs)上, 材料内部的自由载流子在拍频频率驱动下产生交流电流, 从而激发出对应频率的太赫兹波^[22-25]。然而, 光电导型连续太赫兹源在实际应用中仍面临挑战, 系统对激光拍频源的要求较高, 拍频精度直接决定了太赫兹波的调谐能力, 从而影响到实际测试结果。

本文从理论上研究了光电导天线辐射太赫兹波的原理, 并进一步基于 L 波段激光差频的连续精调谐太赫兹辐射源, 实现了频率范围为 0.1~2.7 THz 的连续太赫兹波输出。利用高莱盒探测器和太赫兹扫描法布里-珀罗干涉仪分别测试了太赫兹功率和频率。在 25 分钟内, 太赫兹信号输出频率稳定。

2 光电导天线辐射太赫兹原理

光电导天线材料一般采用 GaAs 等化合物半导体, 厚度为几十到几百微米, 用电子束蒸发工艺制作 Au/Ge/Ni 合金的条形电极, 与 GaAs 形成欧姆接触, 其基本结构是在光电半导体基底上镀上两个金属电极, 然后在两电极上施加一定的偏置电压。位于可见或近红外波段的两束连续激光入射到光电导天线电极之间的光电导材料表面, 假设这两束连续激光的角频率分别为 ω_1 和 ω_2 , 则电场强度可以表示为^[25-27]:

$$E_1(t) = E_1(z) \exp(i\omega_1 t + \delta) + c.c. = 2E_1(z) \cos(\omega_1 t + \varphi), \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_2(z) \exp(i\omega_2 t + \delta) + c.c. = 2E_2(z) \cos(\omega_2 t), \quad (2)$$

其中 $E_1(z)$ 、 $E_2(z)$ 为两束激光电场强度的幅度, δ 表示光的初始相位, φ 为两束激光的相对相位差, $c.c.$ 为复共轭。

假定传输媒质为无损介质, 两入射激光空间叠加后的总光强可以表示为:

$$\begin{aligned} I(t) &\propto |E_1(t) + E_2(t)|^2 = \\ &E_1^2 \cos^2(\omega_1 t + \varphi) + E_2^2 \cos^2(\omega_2 t) + \\ &2E_1 E_2 \cos(\omega_1 t + \varphi) \cos(\omega_2 t) = \\ &\frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + E_1^2 \frac{\cos(2\omega_1 t + 2\varphi)}{2} + E_2^2 \frac{\cos(2\omega_2 t)}{2} + \\ &E_1 E_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \varphi) + E_1 E_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可知, 若材料能对瞬态光强做出响应则可以分别得到光整流、二次谐波、和频与差频结果。对于光电导天线而言, 光电导材料的响应速度较慢, 无法对上述瞬态光强中的二次谐波项及和频项作出响应, 因而光子混频中只需考虑直流项和差频项, 光电导天线能响应的激光功率为:

$$P(\omega, t) = P_1 + P_2 + 2\sqrt{mP_1P_2} \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

$$P_i = \int c n \epsilon_0 \frac{E_i^2}{2} dS \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

其中, P_1 、 P_2 为两束激光的平均功率, $\omega = \omega_1 - \omega_2$ 为两入射激光的角频率差, c 为真空中的光速, n 为光电导材料折射率, ϵ_0 为真空中的介电常数, m 为空间混合效率, 两束激光没有重叠时 m 为 0, 完全重叠时 m 为 1, 其它情形下, m 在 0 到 1 之间取值。式(5)是对激光束的横截面积 S 积分。因此, 当两入射激光频差在太赫兹频段时, 光电导天线将辐射出太赫兹波, 且太赫兹辐射频率随两入射激光的频率差变化而变化。

光子混频法可以归结为: 两束频差在太赫兹范围且相位差恒定的连续激光在空间中叠加形成光“拍”, 辐照在光电导天线电极间隙之间的光电导材料上, 当激光光子能量大于光电导材料的禁带宽度时, 光电导材料内激发出的光生载流子在外加偏置电场作用下形成以太赫兹频率振荡的光电流, 而后由天线将能量辐射出去, 即形成连续太赫兹辐射, 如图 1 所示。

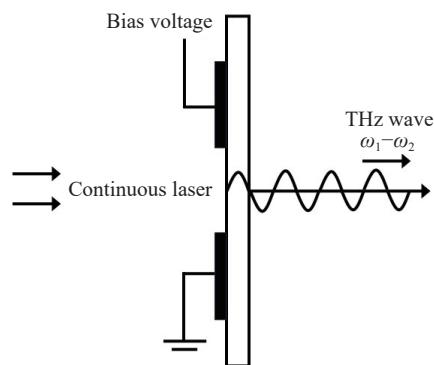


图 1 光子混频法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the photon mixing method

3 连续太赫兹辐射源实验装置

基于以上理论,搭建了一个基于 L 波段激光差频的连续精调谐太赫兹辐射源结构,如图 2 所示。太赫兹辐射源由固定激光器、可调谐激光器、保偏光隔离器、保偏掺铒光纤放大器、保偏光纤耦合器、光电导天线、斩波器、太赫兹透镜、高莱盒探测器及太赫兹扫描法布里-珀罗干涉仪组成。固定激光器波长为 1568 nm,可调谐激光器波长从 1568.8 nm 调谐至 1589.6 nm,波长精度为 8 pm 或 1 GHz。使用全保偏链路是为了保证双波长泵浦光的偏振态一致,从而保证激发功率稳定。使用保偏掺铒光纤放大器(EDFA1, EDFA2)进行功率放大,以满足激发太赫兹所需要的功率条件,两束放大后的激光输入至分光比为 50:50 的保偏耦合器(PM-OC)进行差频。其中一路耦合器输出至光谱分析仪测量可调谐拍频源的光谱。另一路耦合器被引入到连续波太赫兹发射

器模块中,该模块包含硅透镜、准直透镜、聚焦透镜以及带蝴蝶天线的 InGaAs 光电二极管。光电导天线最大激发光功率为 30 mW,偏置电压范围为 -1.5 V~0 V。实验中,其以 1.2 V 的反向偏置电压工作,并以 15 mW 的光功率进行泵浦,激发产生的太赫兹信号经 10 Hz 频率的斩波器调制后通过太赫兹透镜汇聚后进入高莱盒探测器进行功率检测。高莱探测器是基于热膨胀原理进行太赫兹波探测的。其可在室温工作且探测频谱较宽,探测带宽为 0.0375~20 THz,最大探测功率为 10 μ W。其主要探测单元是由一面为薄膜构成的封闭气室。气室中的气体因吸收太赫兹波辐射能量而膨胀,从而使得薄膜发生变形,通过测量薄膜变形可推算待测太赫兹波信号的功率。此外,将太赫兹扫描法布里-珀罗干涉仪放置在两个太赫兹透镜之间。它是由两块半透明平行的 Si 反射镜组成,其中一个 Si 镜装在线性电机上,可以通过控制 Si 镜之间的距离来测量相应的 THz 波长数据。

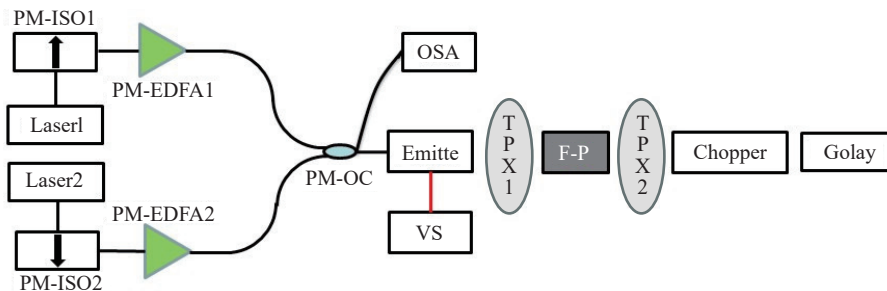


图 2 连续太赫兹辐射源结构示意图。PM: 保偏; ISO: 隔离器; EDFA: 掺铒光纤放大器; OC: 耦合器; OSA: 光谱分析仪; VS: 电压源; TPX: 太赫兹透镜; F-P: 太赫兹扫描法布里-珀罗干涉仪

Fig. 2 Structural diagram of continuous THz radiation source. PM: Polarization-maintaining; ISO: Isolator; EDFA: Erbium-doped fiber amplifier; OC: Optical coupler; OSA: Optical spectrum analyzer; VS: Voltage source; TPX: Terahertz lens; F-P: Terahertz scanning Fabry-Perot interferometer

4 测量实验与结果

实验中双波长泵浦总功率设定为 15 mW,功率比为 1:1,通过改变可调谐激光器波长调谐太赫兹波输出频率。当可调谐激光器波长扫描范围为 1568.8~1589.6 nm 时,对应的太赫兹波输出频率范围为 0.1~2.7 THz,输出特性见图 3(彩图见期刊电子版),图中黑色曲线为太赫兹波的调谐曲线,红色曲线为噪声功率。实验过程中,设置斩波器以 10 Hz 频率调制太赫兹信号,这是因为高莱盒探测器在此处的响应度最高。本文以 0.01 THz

的步进进行功率测试,在 0.1~2.7 THz 范围内实现了 μ W 级的太赫兹波输出。另外,为了测试该连续太赫兹辐射源的调谐精度,在 0.9~1 THz 范围内以 1 GHz 的步进进行功率测试,结果显示良好。

图 4(彩图见期刊电子版)是输出频率分别为 0.5 THz、1 THz、1.5 THz 时辐射源的功率稳定性曲线。当泵浦总功率为 15 mW 时,太赫兹辐射源连续工作 25 min,可以看到 0.5 THz 频率下功率不稳定性为 3.05%;1 THz 频率处功率不稳定性为 2.64%;1.5 THz 频率处功率不稳定性为 2.59%;太赫兹信号总的功率不稳定性在 4% 以内。这是由环境温度、高莱盒探测器产生的热噪声及电压

源产生的电磁噪声引起的。从图 4 可以看到在泵浦光总功率保持不变的条件下, 随着太赫兹频率的升高, 输出功率呈现逐渐下降的趋势。这主要是由于光电导天线在高频段受到载流子寿命和迁移率的限制, 其有效光电流幅值减小, 同时天线阻抗匹配和辐射效率随频率发生变化, 导致高频太赫兹辐射效率降低。此外, 高频太赫兹波在空气中的吸收系数显著增大, 进一步导致功率衰减。由上述结果可知, 该连续太赫兹辐射源具有较好的功率稳定性。

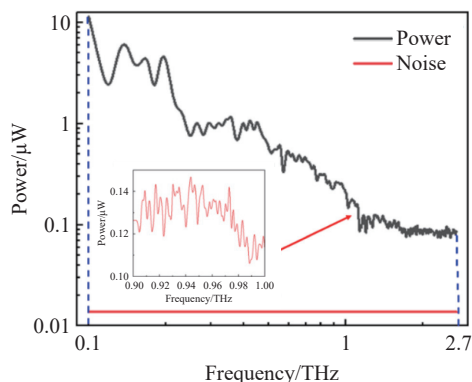


图 3 连续太赫兹辐射源系统调谐输出特性

Fig. 3 Tuning output characteristics of continuous terahertz radiation sources

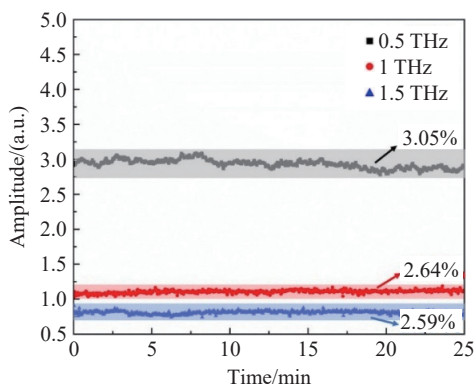


图 4 输出频率分别为 0.5 THz、1 THz、1.5 THz 时太赫兹波稳定性

Fig. 4 Terahertz wave stability at output frequencies of 0.5 THz, 1 THz, and 1.5 THz

另外, 本文利用光谱分析仪 (YOKOGAWA, AQ6370D) 对可调谐激光器和 1568 nm 固定激光器所形成的 L 波段双波长差频信号进行测试, 分别测试了 0.5 THz、1 THz、1.5 THz 3 个频率点, 对应于图 4 中测试的 3 个频率点, 结果如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示。从光谱可以观察到双波长泵浦信号功率比为 1:1, 根据式(4)可以得出当双波长泵浦信号总功率固定时, 仅在功率比为

1:1 时, 太赫兹辐射功率最大。这对于最大激发光电导天线尤为重要。由此可得, 太赫兹辐射源的泵浦源稳定。

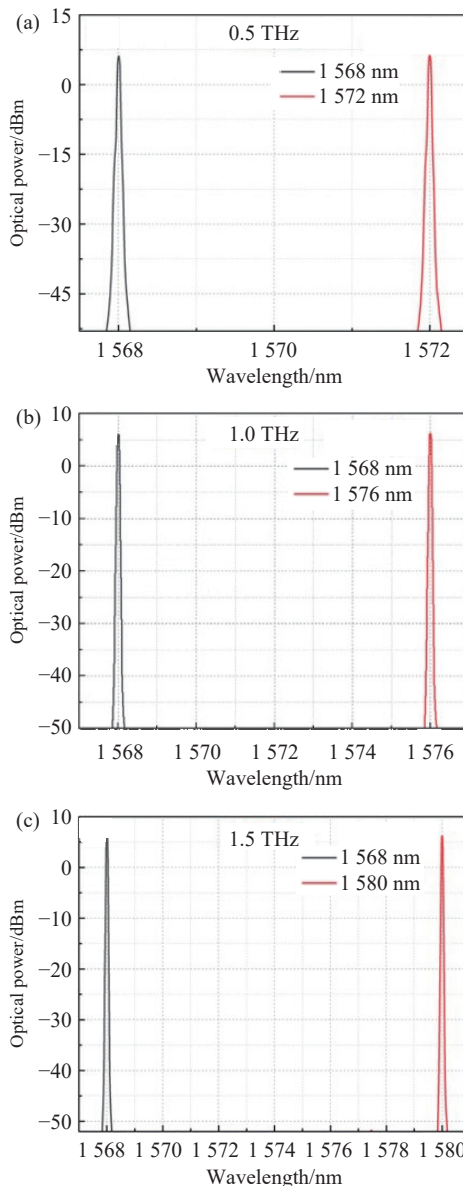


图 5 (a) 0.5 THz、(b) 1 THz、(c) 1.5 THz 双波长差频信号测试结果图

Fig. 5 Test results graph of dual-wavelength difference frequency signals at (a) 0.5 THz, (b) 1 THz, and (c) 1.5 THz

此外, 图 6(a)~6(c) (彩图见期刊电子版) 分别展示了在 0.5 THz、1 THz 以及 1.5 THz 时 L 波段双波长泵浦激光信噪比 (SNR) 测量结果。可以看到在 3 个太赫兹频率下信噪比均超过 50 dB, 反映了双波长泵浦光在差频工作状态下的相对稳定性。这直接关系到光拍频信号的相干性以及太赫兹辐射的频率稳定性, 这是实现高效差频的关键因素。

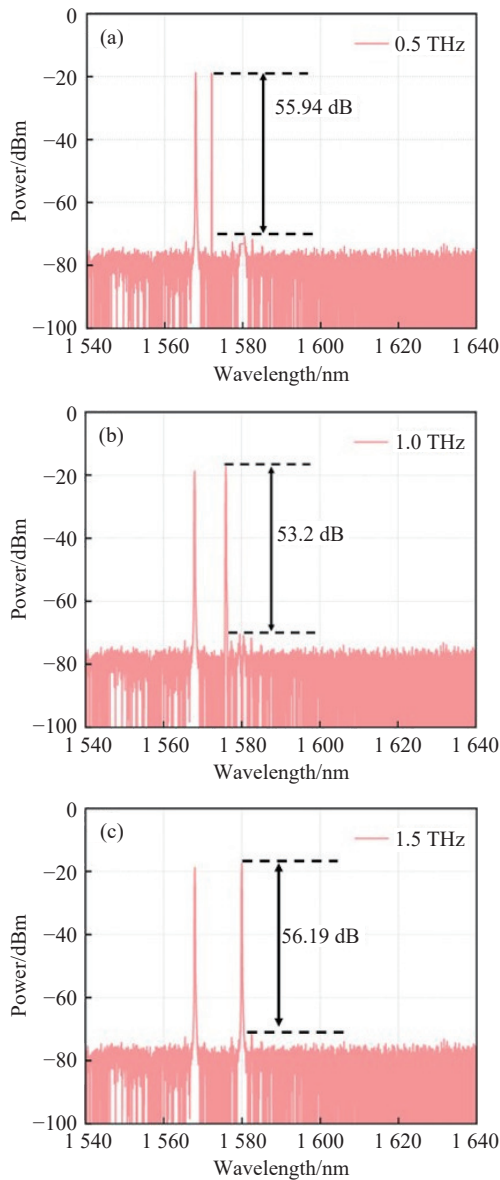


图 6 (a) 0.5 THz、(b) 1 THz、(c) 1.5 THz 时信噪比测量结果
Fig. 6 Measurement results of signal-to-noise ratio at (a) 0.5 THz, (b) 1 THz, and (c) 1.5 THz

图 7(彩图见期刊电子版)所示在不同频率(0.5 THz、1 THz、1.5 THz)下太赫兹波输出强度与双波长激光泵浦总功率的关系。泵浦总功率分别为 10 mW、12 mW、14 mW、16 mW、18 mW、20 mW, 功率比为 1:1。利用高莱盒上位机软件进行功率结果测试, 分别取 10 个功率值平均后进行处理。由图 7 可以看到, 在不同频率处, 太赫兹波的输出强度随泵浦功率的增加而增加。0.5 THz 频率对应的输出强度随泵浦功率增加呈显著线性上升趋势, 而 1 THz 和 1.5 THz 频率下, 输出强度虽也随泵浦功率增加有小幅上升, 但整体增长平缓, 增长幅度远低于 0.5 THz, 反映出不同

同太赫兹频率、不同泵浦场景下输出特性的差异。这是因为随着太赫兹频率升高, 载流子动力学受限以及天线等效阻抗失配加剧, 使得辐射效率降低, 从而导致不同泵浦功率下太赫兹输出特性表现出明显差异。

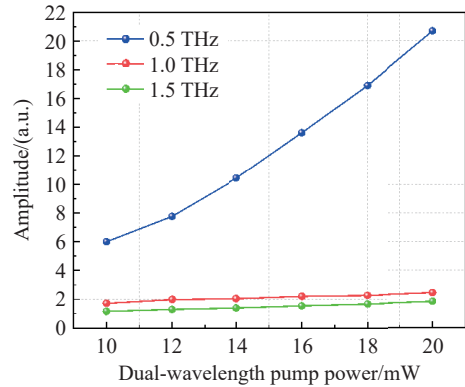


图 7 太赫兹输出强度与双波长激光泵浦总功率关系图
Fig. 7 Relationship between Terahertz output intensity and total power of dual-wavelength laser pumping

图 8(彩图见期刊电子版)给出了在 0.5 THz 和 1 THz 频率下调谐产生的太赫兹信号频率测试波形。通过改变可调谐激光器的波长, 间隔分别为 4 nm、8 nm, 对光电导天线进行激发。图 8(a)和 8(b)是通过太赫兹扫描法布里-珀罗干涉仪分别测量的太赫兹信号波形, 利用干涉仪方程 $\lambda_m = \frac{2d}{m}$ 计算透射峰的位置, 其中 d 为 F-P 干涉仪镜子之间的间隔, m 为条纹级数, λ_m 为衍射最大位置。通过计算两个波峰之间的差值可以得到太赫兹信号的频率信息。图 8(a)中两个相邻波峰之间的差值为 300 μm , 而由波长公式 $\lambda = c/f$ 计算得到 0.5 THz 对应波长为 600 μm 。该结果与理论 TS-FPI 透射率最大值一致, 其为两倍关系。同样, 图 8(b)为 1 THz 的频率测试结果, 1 THz 对应波长为 300 μm , 其余测试曲线中两个相邻波峰之间的差值 150 μm 保持一致。从 0.5 THz 到 1 THz 频率曲线可以看到曲线变得不平滑。这是由于频率增加导致太赫兹信号功率衰减所引起的。频率为 1 THz 以上时由于载波寿命、天线阻抗失配等因素使得光电导天线的响应性降低, 太赫兹输出功率降低, 最终导致太赫兹扫描法布里-珀罗干涉仪测试结果不明显, 但可以从高莱盒探测器探测到太赫兹信号功率, 关闭泵浦激光可以观察到功率降到 nW 级别。由此, 可以得到 1 THz 频率以上太赫兹信号辐射源输出频率较为稳定。

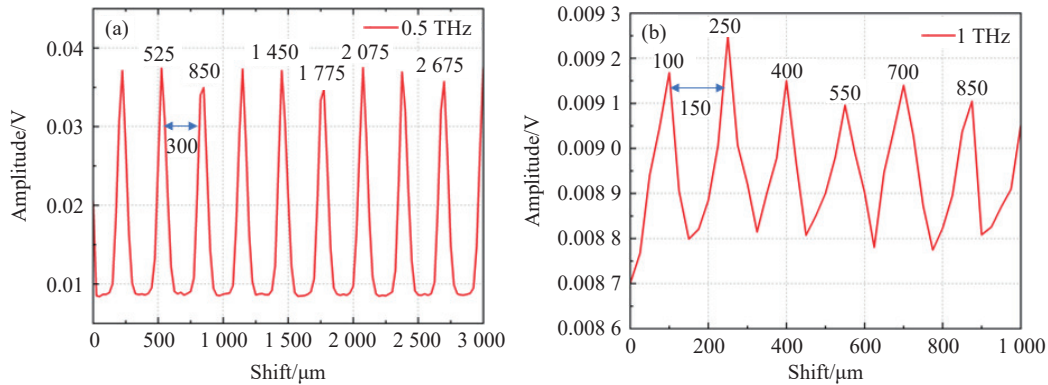


图8 (a) 0.5 THz 频率测试曲线; (b) 1 THz 频率测试曲线

Fig. 8 (a) 0.5 THz frequency test curve; (b) 1 THz frequency test curve

5 结论

本文提出并实现了一种基于 L 波段激光差频的连续精调谐太赫兹辐射源。L 波段双激光由固定波长 1568 nm 和调谐范围 1568.8~1589.6 nm 激光器组成。通过激发光导天线, 在 0.8~21.6 nm 波长范围内成功产生了 0.1~2.7 的连续太赫兹辐

射。在接收端, 通过高莱盒探测器和太赫兹扫描法布里-珀罗干涉仪分别测量太赫兹信号的功率和频率。实验结果表明, 太赫兹波在 25 分钟内的功率不稳定性在 4% 以内, 多个频率下的测频结果稳定。实验数据表明, 本文提出的太赫兹辐射源作为无损探测太赫兹光谱系统的核心模块, 具有很大的应用潜力。

参考文献:

- [1] PREU S, DÖHLER G H, MALZER S, *et al.*. Tunable, continuous-wave Terahertz photomixer sources and applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(6): 061301.
- [2] VAN DIJK F, KERVELLA G, LAMPONI M, *et al.*. Integrated InP heterodyne millimeter wave transmitter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(10): 965-968.
- [3] LEE E S, MOON K, LEE I M, *et al.*. Semiconductor-based terahertz photonics for industrial applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 274-283.
- [4] KOHLHAAS R B, BREUER S, NELLEN S, *et al.*. Photoconductive terahertz detectors with 105 dB peak dynamic range made of rhodium doped InGaAs[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(22): 221103.
- [5] KOHLHAAS R B, GLOBISCH B, NELLEN S, *et al.*. Rhodium doped InGaAs: a superior ultrafast photoconductor[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(10): 102101.
- [6] JIANG X H, LI Y H, LI Y ZH, *et al.*. Detection and imaging of chemicals and hidden explosives using terahertz time-domain spectroscopy and deep learning[J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15(1): 80.
- [7] LIU Y, JIANG K, FANG X Y, *et al.*. Widely-wavelength-tunable Brillouin fiber laser with improved optical signal-to-noise ratio based on parity-time symmetric and saturable absorption effect[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1244-1253.
- [8] 申彦春, 徐雅倩, 胡伟. 可调谐太赫兹液晶超表面[J]. *液晶与显示*, 2025, 40(3): 407-423.
- [9] SHEN Y CH, XU Y Q, HU W. Overview of active terahertz metasurface devices based on liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(3): 407-423. (in Chinese).
- [9] NAFTALY M, VIEWEG N, DENINGER A. Industrial applications of terahertz sensing: state of play[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4203.
- [10] NANDI U, NORMAN J C, GOSSARD A C, *et al.*. 1550-nm driven ErAs: In(Al)GaAs photoconductor-based terahertz time domain system with 6.5 THz bandwidth[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2018, 39(4): 340-348.
- [11] DENINGER A J, ROGGENBUCK A, SCHINDLER S, *et al.*. 2.75 THz tuning with a triple-DFB laser system at 1550 nm and InGaAs photomixers[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, 36(3): 269-277.
- [12] BURFORD N M, EL-SHENAWEE M O. Review of terahertz photoconductive antenna technology[J]. *Optical*

- Engineering*, 2017, 56(1): 010901.
- [13] LIEBERMEISTER L, NELLEN S, KOHLHAAS R B, *et al.*. Optoelectronic frequency-modulated continuous-wave terahertz spectroscopy with 4 THz bandwidth[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1071.
- [14] NELLEN S, ISHIBASHI T, DENINGER A, *et al.*. Experimental comparison of UTC- and PIN-photodiodes for continuous-wave terahertz generation[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, 41(4): 343-354.
- [15] NELLEN S, LAUCK S, SCHWANKE G, *et al.*. Radiation pattern of planar optoelectronic antennas for broadband continuous-wave terahertz emission[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8244-8257.
- [16] TURAN D, YARDIMCI N T, JARRAHI M. Plasmonics-enhanced photoconductive terahertz detector pumped by Ytterbium-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3835-3845.
- [17] YARDIMCI N T, CAKMAKYAPAN S, HEMMATI S, *et al.*. A high-power broadband terahertz source enabled by three-dimensional light confinement in a plasmonic nanocavity[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4166.
- [18] LU P K, JIANG X H, ZHAO Y F, *et al.*. Bias-free terahertz generation from a silicon-compatible photoconductive emitter operating at telecommunication wavelengths[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(26): 261107.
- [19] YARDIMCI N T, JARRAHI M. Nanostructure-enhanced photoconductive terahertz emission and detection[J]. *Small*, 2018, 14(44): 1802437.
- [20] BERRY C W, HASHEMI M R, PREU S, *et al.*. High power terahertz generation using 1550 nm plasmonic photomixers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(1): 011121.
- [21] PARK S G, CHOI Y, OH Y J, *et al.*. Terahertz photoconductive antenna with metal nanoislands[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25530-25535.
- [22] GLOBISCH B, DIETZ R J B, KOHLHAAS R B, *et al.*. Iron doped InGaAs: competitive THz emitters and detectors fabricated from the same photoconductor[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(5): 053102.
- [23] LIEBERMEISTER L, NELLEN S, KOHLHAAS R, *et al.*. Ultra-fast, high-bandwidth coherent cw THz spectrometer for non-destructive testing[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2019, 40(3): 288-296.
- [24] YARDIMCI N T, YANG SH H, BERRY C W, *et al.*. High-power terahertz generation using large-area plasmonic photoconductive emitters[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(2): 223-229.
- [25] KUTZ J, LIEBERMEISTER L, VIEWEG N, *et al.*. A terahertz fast-sweep optoelectronic frequency-domain spectrometer: calibration, performance tests, and comparison with TDS and FDS[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(16): 8257.
- [26] AHMADIVAND A, GERISLIOGLU B, AHUJA R, *et al.*. Terahertz plasmonics: the rise of toroidal metadevices towards immunobiosensings[J]. *Materials Today*, 2020, 32: 108-130.
- [27] TURAN D, LU P K, YARDIMCI N T, *et al.*. Wavelength conversion through plasmon-coupled surface states[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4641.

作者简介:



贺文君(1991—),女,博士,讲师,硕士生导师,2020年7月于山西大学获得博士学位,主要从事光纤激光和光纤传感、太赫兹产生/光谱测试技术方面的研究。E-mail: hewenjun@nuc.edu.cn



刘毅(1984—),男,山西长治人,博士,教授,2014年1月于天津大学获得博士学位,主要从事铁电微纳器件、太赫兹光谱测量方面的研究。E-mail: liuyi28@163.com