

基于 DAST 晶体的连续太赫兹差频辐射源研究*

王泽龙¹⁾²⁾ 王与烨^{1)2)†} 李海滨¹⁾²⁾ 张敬喜¹⁾²⁾ 徐德刚¹⁾²⁾ 姚建铨¹⁾²⁾

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2) (天津大学, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2024 年 9 月 25 日收到; 2024 年 12 月 2 日收到修改稿)

基于 DAST 晶体的太赫兹差频辐射源具有宽调谐、室温运转等优点, 但 DAST 晶体熔点低、热导率低特性使其在连续泵浦条件下热积累严重、晶体易损伤, 这限制了其实际应用. 本文理论研究了基于金刚石衬底的 DAST 晶体的热分布特性, 实验分析了金刚石衬底对 DAST 晶体中热效应的改善. 进一步, 基于连续单频激光器与金刚石衬底 DAST 晶体搭建了差频太赫兹辐射源, 其太赫兹波频率调谐范围为 1.1–3 THz, 在 2.493 THz 处获得最大输出功率为 3.39 nW, 30 min 内太赫兹波的功率不稳定性为 2.19%. 该窄线宽、可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: 连续太赫兹源, 差频产生, DAST 晶体

PACS: 42.55.Rz, 42.60.-v, 42.62.Fi, 42.65.-k

CSTR: 32037.14.aps.74.20241349

DOI: 10.7498/aps.74.20241349

1 引言

太赫兹频段在电磁波谱上位于红外和微波之间, 兼具宽带性、指纹性、低能性、极性分子敏感性等诸多优势特性, 在天文学、大气科学、基础物理、无线通信、生物医疗等领域具有重要的应用前景^[1–6]. 近年来, 以太赫兹时域光谱为代表的光谱检测技术通过对样品中固有振动/转动能级信息进行直接测量, 已实现特异性“指纹识别”表征^[7]. 随着太赫兹领域的研究不断深入, 研究和探索宽带可调谐、窄线宽、高稳定性的太赫兹辐射源成为当前太赫兹科学研究领域的新技术热点之一.

目前产生窄线宽太赫兹波的方法主要有固态半导体电子技术^[8]、自由电子激光器^[9]、量子级联激光器^[10]、CO₂ 泵浦气体激光器^[11]、太赫兹时域光谱技术以及基于非线性光学频率变换的太赫兹

波产生技术^[12,13]等. 基于固态半导体电子学的肖特基二极管固态倍频源和共振隧穿二极管太赫兹振荡源可以产生高稳定性窄线宽太赫兹波, 但限于核心器件二极管的性能, 较难实现 1 THz 以上的高频太赫兹波输出, 且调谐范围受限. 自由电子激光器输出的太赫兹波具有线宽窄、高功率、宽带可调谐等优异性质, 但其作为大科学仪器, 设备造价高昂、使用成本高、体积大等问题使它难以广泛应用于物质光谱检测. 量子级联激光器是产生高频窄线宽太赫兹波的一种有效方式, 但其单个设备输出带宽较窄且存在调谐间隙的问题, 一定程度上限制了它在光谱检测领域的进一步应用. CO₂ 泵浦的气体激光器可以输出单频高功率太赫兹波, 但频率调谐需要更换气体, 且存在诸多调谐间隙, 因此不适用于光谱检测领域. 基于超短脉冲泵浦的太赫兹时域光谱技术是当前商用化最成熟的太赫兹辐射源之一, 但其 GHz 量级的线宽和高频段较低的信噪

* 国家自然科学基金 (批准号: 62175182, 62275193, U22A20123, U22A20353) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yuyewang@tju.edu.cn

比等问题使其难以满足对气体分子等高精度光谱检测的需求. 在基于非线性光学频率变换的太赫兹波产生技术领域, 主要分为太赫兹参量辐射源和太赫兹差频辐射源^[14-16]. 在产生太赫兹波的过程中, 太赫兹波线宽与泵浦激光线宽直接相关, 因此相比于线宽受傅里叶极限限制的脉冲激光泵浦, 使用窄线宽连续激光作为泵浦光在产生窄线宽太赫兹波方面更具优势^[17]. 太赫兹参量产生/振荡器因其阈值较高, 连续源泵浦功率密度较低, 较难实现宽调谐太赫兹波输出^[18]. 对于差频太赫兹辐射源, 基于VECSEL的连续太赫兹差频源可输出 100 μW 的太赫兹波输出, 线宽达 100 kHz, 但受限于泵浦激光器及晶体特性, 只能进行 1.9 THz 单频点输出, 难以进一步应用于宽带光谱检测等领域^[19]. 非线性晶体是决定太赫兹差频源性能的关键因素之一, 目前, THz 差频源中主要采用的非线性晶体包括无机晶体和有机晶体两大类, 无机晶体主要包括 LiNbO_3 , GaAs, ZnGeP_2 , GaP, ZnTe 等, 传统无机晶体在光波和 THz 波段具有较大的折射率差 (如 LiNbO_3 晶体, 在光波和 THz 波段的折射率分别是 2.1 和 5.2), 多采用非共线相位匹配结构, 实验光路复杂; 且晶体对太赫兹波的吸收随频率增高而增大, 输出太赫兹波的范围较窄^[20]. 无机晶体的熔点、热导率相对有机晶体较高, 但其有效非线性系数 d_{eff} 在 100 pm/V 以下 (如 LiNbO_3 的 d_{eff} 为 27 pm/V, ZnGeP_2 的 d_{eff} 为 75 pm/V), 而 DAST, DSTMS, OH1 等有机晶体具有很高的有效非线性系数 (如 DAST 晶体的 d_{eff} 为 1010 pm/V), 相比无机晶体具有明显优势. 此外, 有机晶体折射率曲线较为平坦, 这使其满足三波共线且偏振方向相同的 0 类相位匹配条件, 只需改变泵浦波长就能实现太赫兹波的调谐输出, 调谐方式简单, 是更为理想的差频晶体选择^[21]. 但由于有机晶体熔点低、热导率低, 在高重频或连续泵浦条件下, 晶体内部热积累明显, 极易导致晶体热损坏, 这限制了其进一步应用^[22].

本文理论研究了 DAST 晶体在连续泵浦条件下的热分布特性, 分析了金刚石衬底对 DAST 晶体的温度分布影响, 并实验验证了金刚石衬底可以有效地改善 DAST 晶体中的热效应, 提升晶体可承受的泵浦功率上限. 进一步, 基于连续单频激光器与金刚石衬底 DAST 晶体搭建了差频太赫兹辐射源, 实现了 1.1—3 THz 频率可调的连续太赫兹

波输出, 在 2.493 THz 处最大输出功率为 3.39 nW, 太赫兹波在 30 min 内的功率不稳定性为 2.19%. 基于该辐射源对不同湿度空气进行高精度光谱检测, 结果与 Hitran 数据库中气体吸收谱线对应良好.

2 DAST 晶体热效应仿真及实验分析

有机晶体在 ns 脉冲泵浦情况下, 损伤阈值可达到 GW/cm^2 量级, 但对于连续源泵浦, 晶体损伤机制与脉冲情况不同, 脉冲激光测试的损伤阈值不再适用. 由于有机晶体的低热导率和低熔点, 连续源泵浦条件下, 晶体内部热积累明显, 高功率泵浦时极易导致晶体热损伤, 影响太赫兹辐射源的实际输出功率及稳定性, 因此可以增加散热衬底以提升晶体可承受泵浦功率的上限.

差频源中常用 DAST 晶体厚度为几百微米量级, 采用铜、铝、钢等金属材料侧面散热的方式难以满足需求, 需要用衬底材料与晶体表面贴合的方式以增加晶体与衬底的接触面积. 因此在散热材料选择方面, 需要满足热导率高、对泵浦光高透过率、表面能进行光学抛光、化学性质稳定等条件. 常用材料有金刚石、蓝宝石和硅等, 三种材料在泵浦光波长附近吸收系数均 $< 0.1 \text{ cm}^{-1}$, 因此对泵浦光透过率主要受材料折射率影响 ($n_{\text{Diamond}} = 2.2$, $n_{\text{sapphire}} = 1.8$, $n_{\text{Si}} = 3.4$). 考虑硅的热导率为 $148 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 蓝宝石仅为 $25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 而金刚石热导率高达 $1800 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 是更为理想的散热衬底材料. 因此采用金刚石衬底与 DAST 晶体表面贴合组成金刚石-DAST (Diamond-DAST) 的结构有望改善 DAST 晶体的散热效果, 提高 DAST 晶体的热损伤阈值.

首先, 基于 COMSOL Multiphysics 软件, 对 DAST 晶体的热分布进行稳态物理场仿真. 设置物理参数为: DAST 晶体半径为 3 mm, 厚度 0.5 mm, DAST 晶体熔点 256°C , 热导率 $0.255 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 恒压热容为 $1.156 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$; 入射光波长为 1536.8489 nm, 束腰半径为 50 μm , 光强分布为高斯光束; 金刚石衬底热导率为 $1800 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 近红外波段透过率为 65%; 环境温度为 18°C . 图 1(a) 为 DAST 晶体在无散热装置时的热分布结果. 由图 1(a) 可知, 当泵浦光总功率为 3 W 时, DAST 晶体中心的最高温度可达到 404°C , 边缘最低温度升高至 40°C 左右, 此时 DAST 晶体内部温度梯度较大, 热应力

较强, 局部最高温度超过熔点后, 晶体会被迅速熔化造成严重的热损伤. 图 1(b) 为 DAST 晶体与金刚石贴合后的热分布仿真结果. 由图 1(b) 可知, 在相同泵浦条件下, DAST 晶体中的最高温度降低至 216 °C, 最低温度为 25 °C, 最高温度显著降低, 晶体内部温度梯度减小, 进而减小了晶体内部热应力, 使晶体不易受到热损伤.

其次, 理论仿真了不同泵浦功率时 DAST 晶体中的热分布情况, 结果如图 2 所示. 图 2(a) 为 DAST 晶体与 Diamond-DAST 晶体的最高温度随泵浦功率的变化. 由图 2(a) 可知, 随着泵浦功率的增加, DAST 晶体与 Diamond-DAST 晶体的温度迅速升高. 当泵浦功率为 4.5 W 时, 无衬底的 DAST 晶体中心最高温度达到 584 °C, 而具有金刚石衬底晶体的温度上升趋势明显减弱, 并且温度最高仅上升至 304 °C, 可以看出金刚石衬底对 DAST 晶体中心区域的温度控制起到了明显作用. 图 2(b) 为晶体边缘最低温度与泵浦功率的关系. 由图 2(b) 可知: 随着泵浦功率增加至 4.5 W, DAST 晶体的边缘最低温度升高至 48 °C, 晶体表面温差达到 536 °C; 而 Diamond-DAST 晶体的边缘最低温度

为 27 °C, 晶体温差为 277 °C. 由此可见, 金刚石衬底对 DAST 晶体可以起到较好的散热效果, 有效地降低晶体温度的同时也能减小晶体内部温差, 从而减小晶体的热应力, 避免晶体热损伤, 提升 DAST 晶体可承受的泵浦功率上限.

进一步, 基于窄线宽连续激光器对 DAST 晶体与 Diamond-DAST 晶体的热损伤特性进行研究. 图 3(a) 为实验所用的 Diamond-DAST 晶体结构示意图, DAST 晶体与金刚石衬底紧密贴合, DAST 晶体厚度为 0.8 mm. 金刚石衬底的直径为 30 mm, 厚度为 0.4 mm. 泵浦激光入射方向如图 3(a) 所示, 泵浦激光束腰半径为 50 μm , 波长为 1536.8489 nm, 功率为 3 W. 对于无金刚石衬底的 DAST 晶体, 当泵浦功率超过 DAST 晶体热损伤阈值后, 晶体会由入射表面光斑中心处向晶体四周及内部逐渐熔化, 熔化损伤如图 3(b) 所示, 损伤区域基本呈圆形. 而 Diamond-DAST 晶体表面如图 3(c) 所示, 相同泵浦条件下 Diamond-DAST 内表面 (Surface A) 无热损伤. 利用显微镜对晶体的同一位置进行透射照明, 可观察到如图 3(d) 所示的晶体内部热损伤, 但并未出现晶体熔融的

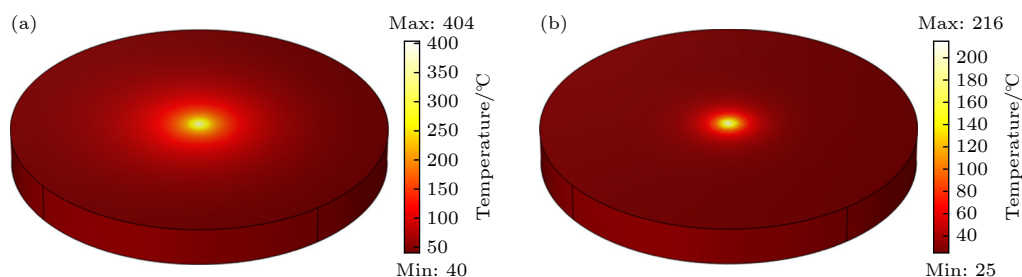


图 1 DAST 晶体热分布仿真结果 (a) DAST; (b) Diamond-DAST

Fig. 1. Simulation results of heat distribution of organic crystals: (a) Without and (b) with diamond substrate.

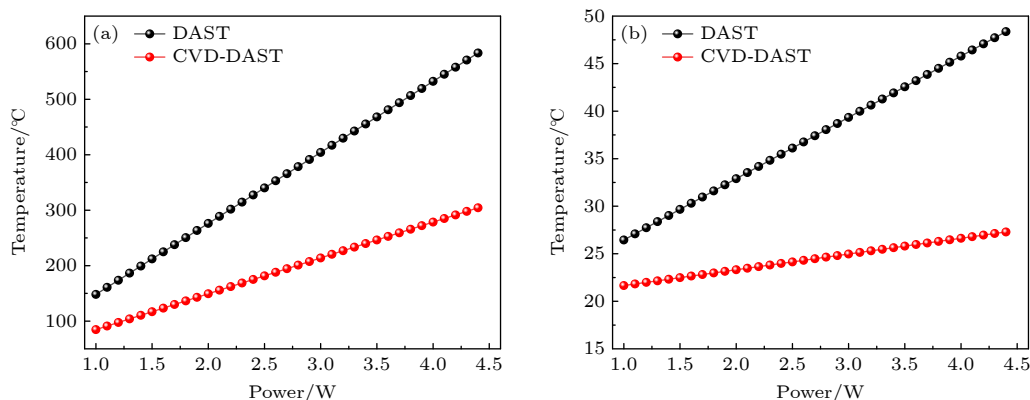


图 2 晶体温度随泵浦功率的变化曲线 (a) 最高温度; (b) 最低温度

Fig. 2. Curves of crystal temperature variation with pump power: (a) Maximum temperature; (b) minimum temperature.

现象. 进一步增加泵浦功率或泵浦时间, Diamond-DAST 晶体会由内部逐渐向 Surface B 表面方向熔化, 最终由内向外熔穿晶体表面, Surface B 表面熔穿结果如图 3(e) 所示, 损伤区域呈现不规则形状. 实验结果表明金刚石衬底可以有效地改善 DAST 晶体中的热效应, 但由于有机晶体热导率较低, 晶体内部产生的热量无法有效导出到金刚石表面, 导致热损伤依然存在, 使用较薄的晶体能获得更理想的散热效果.

由于有机晶体表面具有较高的粗糙度, 激光透射晶体后的出射光斑会产生一定的畸变, 实验中通过观察出射光斑形状变化以判断晶体内部形变情况. 不同功率情况下, 晶体热损伤结果如表 1 所列. 由表 1 可以看出, 无金刚石衬底的晶体在泵浦功率达到 0.75 W 后, 晶体内部因热应力导致形变, 产生不可逆热损伤. 泵浦功率达到 1.20 W 后, 晶体会从泵浦光入射面开始熔化. 对于 Diamond-DAST 晶体, 当泵浦功率提高到 1.70 W 时才出现由热应力导致的不可恢复形变, 当泵浦功率提高到 2.65 W 时, 由晶体内部逐渐向泵浦光出射面方向熔化. 根据热分布仿真及实验可以看出, 金刚石衬底的存在

能够在较大程度上吸收有机晶体的产热, 进而有效地降低连续源泵浦时有机晶体的温度, 提升晶体可承受泵浦功率的上限以获得更高功率的太赫兹波输出.

3 窄线宽差频源实验结果及分析

图 4 为窄线宽连续太赫兹差频辐射源实验装置. 泵浦源由一台固定波长光纤激光器和一台波长可调谐光纤激光器组成, 其中固定波长光纤激光器输出波长为 1536.8489 nm (λ_1), 最大输出功率为 10 W, 30 min 内功率不稳定性为 0.62%; 可调谐光纤激光器输出波长为 1500—1630 nm, 最大输出功率为 15 mW, 经光纤放大器放大后可在 1545—1561 nm (λ_2) 范围内实现最大功率 15 W 输出, 放大后 30 min 内功率不稳定性为 1.27%. 半波片 (HWP1, HWP2) 用来调控双波长泵浦光的偏振方向. L1 与 L2, L3 与 L4 组成缩束准直系统, 分别将泵浦光 λ_1 , λ_2 的束腰半径及发散角调整至接近的状态后经 M0, M1 合束. 为提高差频过程中的泵浦功率密度, 合束后的双波长泵浦光经透镜 L5 聚焦进入 DAST

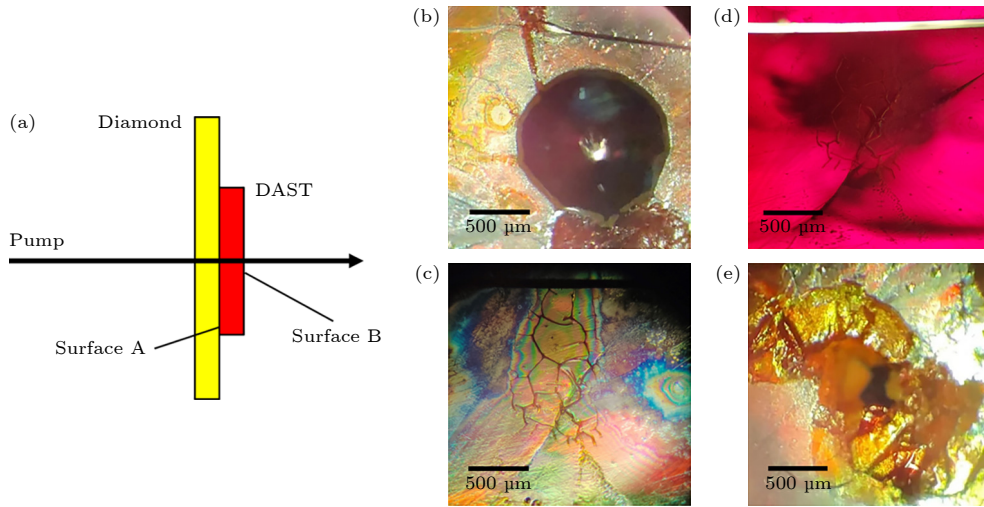


图 3 (a) 热损伤实验示意图; (b) DAST 晶体热损伤表面; (c) Diamond-DAST 内表面 (Surface A); (d) Diamond-DAST 晶体内部; (e) Diamond-DAST 晶体外表面 (Surface B)

Fig. 3. (a) Schematic diagram of thermal damage experiment; (b) thermal damage surface (Surface A) of DAST crystal; (c) surface of Diamond-DAST crystal; (d) inside the Diamond-DAST crystal; (e) outer surface (Surface B) of the Diamond-DAST crystal.

表 1 有/无金刚石衬底 DAST 晶体热损伤情况与泵浦功率的关系

Table 1. Dependence of pump power and thermal damage of DAST crystal with/without diamond substrate.

	晶体无形变	热应力导致晶体内部发生可恢复微小形变(降低功率可复原)	热应力导致晶体内部发生不可恢复形变(降低功率不可复原)	晶体熔化
DAST	$P < 0.45 \text{ W}$	$0.45 \text{ W} \leq P < 0.75 \text{ W}$	$0.75 \text{ W} \leq P < 1.20 \text{ W}$	$P \geq 1.20 \text{ W}$
Diamond-DAST	$P < 1.10 \text{ W}$	$1.10 \text{ W} \leq P < 1.70 \text{ W}$	$1.70 \text{ W} \leq P < 2.65 \text{ W}$	$P \geq 2.65 \text{ W}$

晶体. 实验中所用的 Diamond-DAST 晶体厚度为 0.54 mm, 晶体如图 4 中插图所示, 晶体 a 轴与双波长光束偏振方向平行以满足相位匹配条件. 使用液氮超低温冷却的 Bolometer 探测器对连续太赫兹波进行功率探测, 其响应灵敏度为 2.89×10^5 V/W. 考虑到此探测器的响应速率, 采用频率为 100 Hz 的斩波器进行斩波, 剩余泵浦光及其他杂散光通过探测器窗口前的黑色聚乙烯片滤除.

调整双波长偏振方向一致后, 利用格兰棱镜测量了合束泵浦光的偏振特性, 结果如图 5(a) 所示. 合束后的泵浦光具有良好的线偏振特性, 偏振消光比为 17.96 dB. 利用波长计测量了双波长光束在不同波长输出时的波长稳定性, 结果如图 5(b) 所示. 由图 5(b) 可知, 泵浦光波长稳定性较高, 30 min 内波长漂移量小于 ± 2 pm. 插图为双波长泵浦光功率为 1:1 情况下的波长调谐曲线, 输出总功率设定

为 4 W, λ_2 在 1545—1561 nm 调谐过程中, 功率变化在 ± 0.22 W 以内.

实验中双波长泵浦总功率设定为 4 W, 功率比 1:1, 通过改变 λ_2 波长调谐太赫兹波输出频率. 当 λ_2 的波长扫描范围为 1545—1561 nm 时, 对应的太赫兹波输出频率范围为 1.1—3 THz, 输出特性见图 6(a), 图中红色实线为对输出光谱去噪后的拟合曲线. 窄线宽输出谱中的多处输出谷值主要是由空气中水蒸气对太赫兹波的强吸收导致. 当太赫兹频率为 2.493 THz 时, 太赫兹波输出功率达到最大, 平均功率为 3.39 nW, 转换效率为 0.85×10^{-9} , 与无散热晶体对比, 最大输出功率提升 22%^[23]. 由于 DAST 晶体在 1.1 THz 附近存在横向光学声子振动模式导致的强吸收, 该太赫兹辐射源在 1.1—1.4 THz 范围内输出功率较低, 在 1.4—3 THz 范围实现了 nW 级的太赫兹波输出. 图 6(b) 为输出

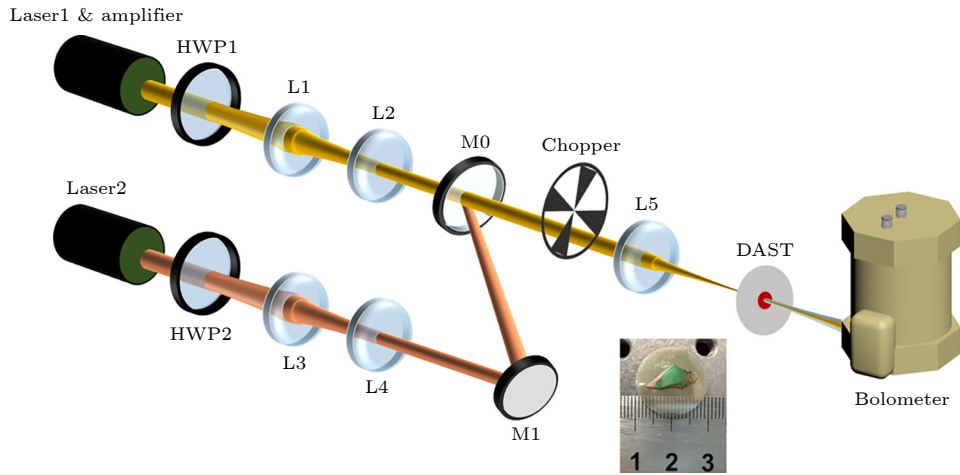


图 4 连续太赫兹辐射源实验装置图 (插图为 Diamond-DAST 晶体实物照片)

Fig. 4. Schematic diagram of the CW-THz source. The inset is DAST crystal with diamond substrate.

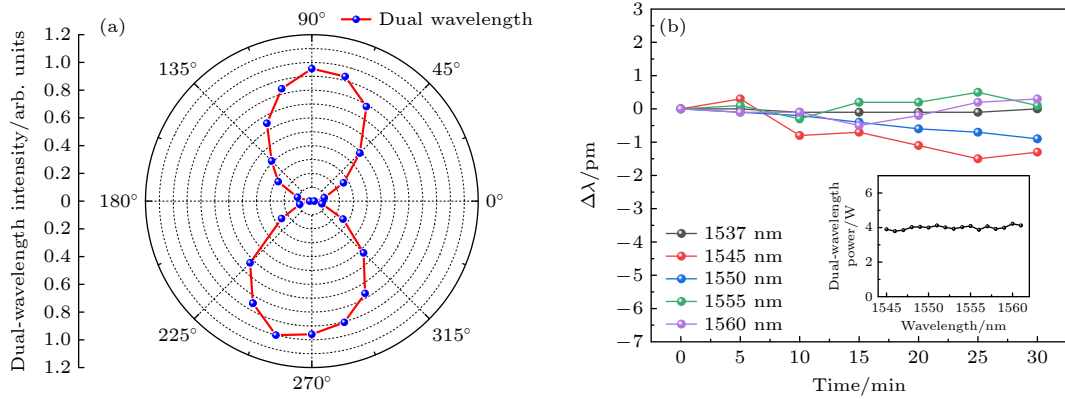


图 5 (a) 双波长泵浦光偏振特性; (b) 波长稳定性 (插图为功率调谐特性)

Fig. 5. (a) Polarization characteristics of the dual-wavelength pump; (b) wavelength stability, where the inset is power tuning characteristics.

频率 2.493 THz 时辐射源的功率稳定性曲线. 当泵浦总功率为 4 W 时, 辐射源连续工作 30 min, 有机晶体无损坏, 太赫兹功率不稳定性为 2.19%. 使用太赫兹线栅对太赫兹波的偏振度进行测量, 结果如图 6(b) 中插图所示, 太赫兹波的偏振消光比为 9.44 dB. 由上述结果可知, 该太赫兹辐射源具有较高的功率稳定性及较好的线偏振特性.

图 7(a) 为连续太赫兹辐射源在 1.697, 2.056, 2.493 THz 处的输出特性曲线, 泵浦功率比为 1:1. 由图 7(a) 可知, 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, 且未出现明显的饱和趋势. 图 7(b) 为 2.493 THz 频点处单路泵浦功率变化与太赫兹波输出强度的关系, 其中红色曲线为 λ_1 功率与太赫兹波输出强度的关系, 黑色曲线为 λ_2 功率与太赫兹波输出强度的关系. 对比两曲线可以看出连续源泵浦差频过程中, 由于泵浦功率密度较低导致两波长功率变化对太赫兹输出强

度的影响差异不明显. 太赫兹波输出强度对短波长 (λ_1) 的功率变化略敏感, 进一步增大泵浦功率, 由 λ_1 的功率差异带来的太赫兹输出强度变化会更明显.

为验证辐射源用于高精度光谱检测领域的应用潜力, 实验选取辐射源输出较强的 1.90—2.85 THz 频段对实验室环境中的空气进行光谱检测并与 Hitran 数据库^[24]中水蒸气在太赫兹波段的吸收谱线进行对比, 实验光程为 15 cm, 测量空气湿度为 40%. 图 8 红色实线为 40% 湿度空气的透射光谱, 蓝色实线为 Hitran 数据库中水蒸气吸收谱线. 由图 8 可知, 在该频段范围水蒸气共有 15 个明显的吸收峰, 光谱凹陷位置与水蒸气吸收峰对应准确; 对于吸收系数较小的吸收峰, 辐射源透射光谱谷值大小与水蒸气吸收峰强度有较好的对应; 对于吸收系数较大的吸收峰, 由于实验光程较长, 透射谷接近背景噪声, 因此多个强吸收峰对应的透射谷值

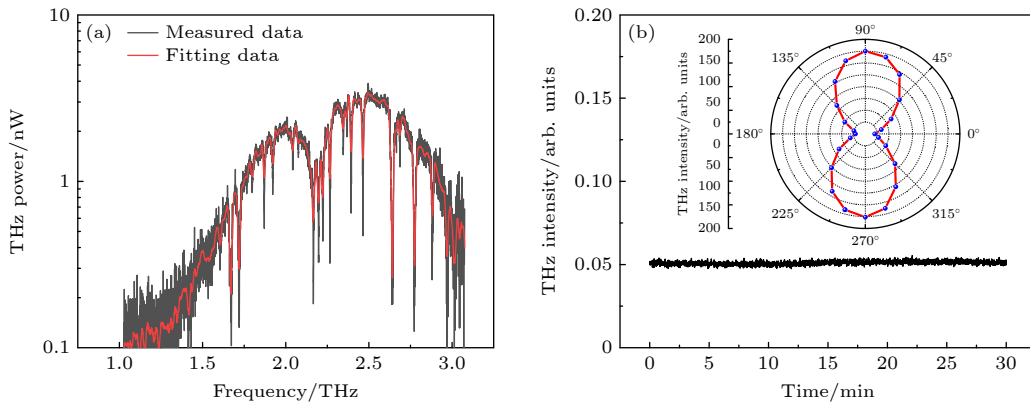


图 6 (a) 连续太赫兹辐射源调谐输出特性; (b) 输出频率 2.493 THz 时太赫兹波功率稳定性 (插图太赫兹波偏振特性)

Fig. 6. (a) Tunable characteristics of the CW-THz source; (b) stability of the generated THz power over a time frame of 30 min at 2.493 THz, where the inset is polarization characteristics of the THz wave.

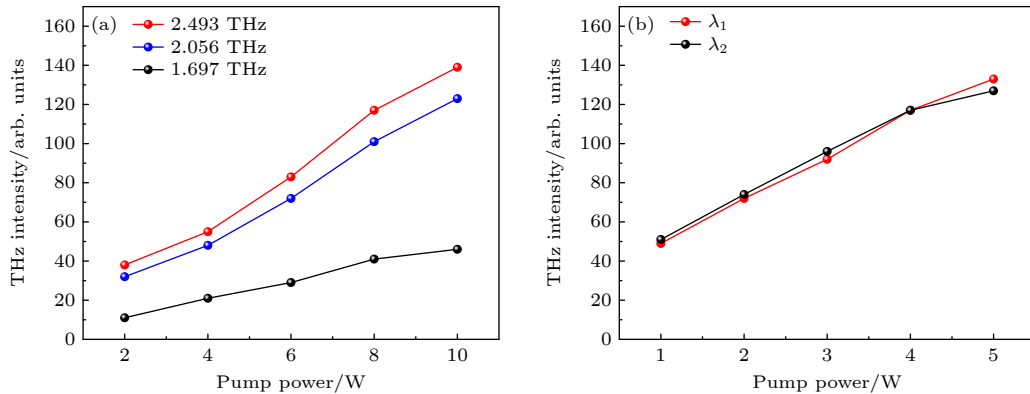


图 7 太赫兹输出强度与 (a) 双波长泵浦总功率以及 (b) λ_1 , λ_2 泵浦功率的关系

Fig. 7. Relationship of the THz wave intensity with (a) the dual-wavelength pump power and (b) the pump power of λ_1 or λ_2 .

接近. 为对比不同湿度情况下空气中水蒸气对太赫兹波的吸收差异, 保持其他实验条件不变并持续通入干燥空气, 实验环境空气湿度可下降至最低为 3%, 该条件下空气透射光谱如图 8 中黑色实线所示. 与 40% 湿度实验结果对比可知, 大部分由水蒸气导致的光谱谷值基本消失, 空气中湿度差异对太赫兹光谱影响很大. 此外, 在 88.08 cm^{-1} 和 92.53 cm^{-1} 两处, 3% 湿度情况下空气透射光谱仍有明显的透射谷出现, 水蒸气对太赫兹波的吸收非常明显.

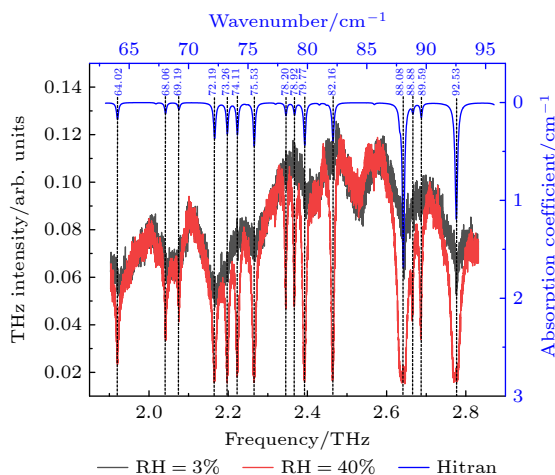


图 8 不同湿度空气 1.90—2.85 THz 透射特性

Fig. 8. Transmission characteristics of air with different humidity of 1.90–2.85 THz.

4 结 论

本文对连续源泵浦有机晶体进行热分布特性仿真, 实验分析了金刚石衬底对 DAST 晶体热效应的改善. 利用两台单频光纤激光器泵浦 Diamond-DAST 晶体差频产生太赫兹波, 结果表明, 装置输出太赫兹波频率范围为 1.1—3 THz, 在 2.493 THz 处有最大输出功率为 3.39 nW, 30 min 功率不稳定性为 2.19%. 对不同湿度空气进行高精度透射光谱检测, 实验结果与 Hitran 数据库中气体吸收谱线对应良好. 该连续太赫兹差频辐射源具有线宽窄、连续调谐输出、功率稳定性高等优势, 在太赫兹高精度光谱检测及成像等相关领域具有较高的应用潜力.

参考文献

- [1] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nat. Mater.* **1** 26
- [2] Sirtori C 2002 *Nature* **417** 132
- [3] Sterczewski L A, Westberg J, Yang Y, Burghoff D, Reno J, Hu Q, Wysocki G 2020 *ACS Photonics* **7** 1082
- [4] Stinson H T, Sternbach A, Najera O, Jing R, McLeod A S, Slusar T V, Mueller A, Anderegg L, Kim H T, Rozenberg M, Basov D N 2018 *Nat. Commun.* **9** 3604
- [5] Mu N, Yang C Y, Ma K, Quan Y L, Wang S, Lai Y, Li F, Wang Y Y, Chen T N, Xu D G, Feng H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 178702 (in Chinese) [穆宁, 杨川艳, 马康, 全玉莲, 王诗, 赖颖, 李飞, 王与焯, 陈图南, 徐德刚, 冯华 2022 *物理学报* **71** 178702]
- [6] Wang Y W, Dong Z W, Li H Y, Zhou X, Luo Z F 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 134101 (in Chinese) [王玉文, 董志伟, 李瀚宇, 周逊, 罗振飞 2016 *物理学报* **65** 134101]
- [7] Yang X, Zhao X, Yang K, Liu Y, Liu Y, Fu W, Luo Y 2016 *Trends Biotechnol.* **34** 810
- [8] Aghasi H, Naghavi S M H, Taba M T, Aseeri M A, Cathelin A, Afshari E 2020 *Appl. Phys. Rev.* **7** 021302
- [9] Cherkassky V S, Knyazev B A, Kubarev V V, Kulipanov G N, Krushev G L, Matveenko A N, Petrov A K, Petrov V M, Scheglov M A, Shevchenko O A, Vmokurov N A 2004 *Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics Karlsruhe, Germany, September 17–October 1, 2004* p567
- [10] Chhantyal-Pun R, Valavanis A, Keeley J T, Rubino P, Kundu I, Han Y, Dean P, Li L, Davies A G, Linfield E H 2018 *Opt. Lett.* **43** 2225
- [11] Mueller E R, Henschke R, Robotham W E, Newman L A, Laughman L M, Hart R A, Kennedy J, Pickett H M 2007 *Appl. Optics* **46** 4907
- [12] Chen K, Tang L, Xu D, Wang Y, Yan C, Nie G, Hu C, Wu B, Zhu J, Yao J 2021 *ACS Photonics* **8** 3141
- [13] Mansourzadeh S, Vogel T, Shalaby M, Wulf F, Saraceno C J 2021 *Opt. Express* **29** 38946
- [14] Lee A J, Pask H M 2014 *Opt. Lett.* **39** 442
- [15] He Y, Wang Y, Xu D, Nie M, Yan C, Tang L, Shi J, Feng J, Yan D, Liu H, Teng B, Feng H, Yao J 2018 *Appl. Phys. B* **124** 16
- [16] Chai L, Niu Y, Li Y F, Hu M L, Wang Q Y 2016 *Acta. Phys. Sin.* **65** 070702 (in Chinese) [柴路, 牛跃, 栗岩峰, 胡明列, 王清月 2016 *物理学报* **65** 070702]
- [17] Tang M, Minamide H, Wang Y, Notake T, Ohno S, Ito H 2011 *Opt. Express* **19** 779
- [18] Walsh D, Stothard D J M, Edwards T J, Browne P G, Rae C E, Dunn M H 2009 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **26** 1196
- [19] Paul J R, Scheller M, Laurain A, Young A, Koch S W, Moloney J 2013 *Opt. Lett.* **38** 3654
- [20] Liu H, Xu D G, Yao J Q 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 5662 (in Chinese) [刘欢, 徐德刚, 姚建铨 2008 *物理学报* **57** 5662]
- [21] Cunningham P D, Hayden L M 2010 *Opt. Express* **18** 23620
- [22] Zhao H, Tan Y, Wu T, Steinfeld G, Zhang Y, Zhang C, Zhang L, Shalaby M 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 241101
- [23] Wang Z, Wang Y, Li H, Ge M, Xu D, Yao J 2023 *Opt. Express* **31** 39030
- [24] Rothman L S, Jacquemart D, Barbe A, Benner D C, Birk M, Brown L R, Carleer M R, Chackerian C, Chance K, Coudert L H, Dana V, Devi V M, Flaud J M, Gamache R R, Goldman A, Hartmann J M, Jucks K W, Maki A G, Mandin J Y, Massie S T, Orphal J, Perrin A, Rinsland C P, Smith M A H, Tennyson J, Tolchenov R N, Toth R A, Vander Auwera J, Varanasi P, Wagner G 2005 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **96** 139

Tunable continuous-wave terahertz generator based on difference frequency generation with DAST crystal*

WANG Zelong¹⁾²⁾ WANG Yuye^{1)2)†} LI Haibin¹⁾²⁾ ZHANG Jingxi¹⁾²⁾
 XU Degang¹⁾²⁾ YAO Jianquan¹⁾²⁾

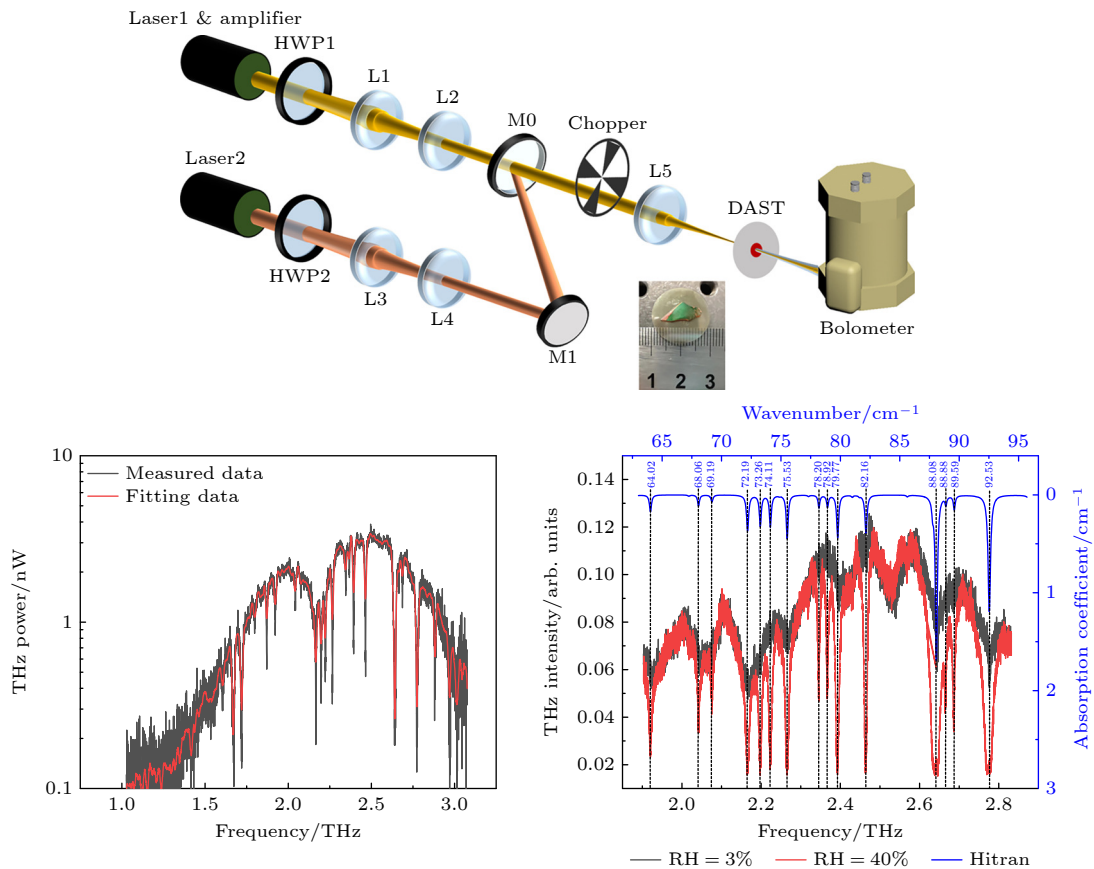
¹⁾ (School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

²⁾ (Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 25 September 2024; revised manuscript received 2 December 2024)

Abstract

Terahertz (THz) waves have been widely investigated recently due to their ability to reflect the fingerprint characteristics of samples. As a promising method, THz technology has aroused great interest in various applications, especially biological imaging, environmental monitoring, non-destructive evaluation, spectroscopy and molecular analysis. In order to reveal the intramolecular vibration/rotation information of various compounds, the linewidths of their absorption lines are usually in a range of GHz or even MHz, and THz waves with wide tunability, narrow linewidth, high frequency accuracy, and high power stability are required.



* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62175182, 62275193, U22A20123, U22A20353).

† Corresponding author. E-mail: yuyewang@tju.edu.cn

Currently, the linewidth with GHz level and low SNR at higher frequency still limit its further applications in reveal intramolecular information. In this work, the thermal distribution characteristics of DAST crystals based on diamond substrates under continuous laser pumping conditions are theoretically studied by COMSOL Multiphysics, and the effectiveness of diamond substrates in dissipating heat from DAST crystals is experimentally verified. Then, a narrow-linewidth and tunable organic-crystal continuous-wave terahertz source is demonstrated. Two narrow-linewidth continuous-wave (CW) fiber lasers are used as the pump sources for generating difference frequency. The terahertz wave is continuously tunable in a range of 1.1–3 THz. The maximum output power of 3.39 nW is obtained at 2.493 THz. The power fluctuation in 30 min is measured to be 2.19%. In addition, the generated THz wave has a high polarization extinction ratio of 9.44 dB. Using this CW-THz source for high-precision spectral detection of air with different humidity, the results correspond well with the gas absorption spectral lines in the Hitran database, proving that the CW-THz source has narrow linewidth, high frequency accuracy and stability. Therefore, it can promote the practical application of tunable CW-THz source, thus having good potential in THz high-precision spectroscopic detection and multispectral imaging.

Keywords: continuous-wave terahertz source, difference frequency generation, DAST crystal

PACS: 42.55.Rz, 42.60.–v, 42.62.Fi, 42.65.–k

DOI: [10.7498/aps.74.20241349](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241349)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241349](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241349)

基于DAST晶体的连续太赫兹差频辐射源研究

王泽龙 王与烨 李海滨 张敬喜 徐德刚 姚建铨

Tunable continuous-wave terahertz generator based on difference frequency generation with DAST crystal

WANG Zelong WANG Yuye LI Haibin ZHANG Jingxi XU Degang YAO Jianquan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 034201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241349

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241349>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于有机吡啶盐晶体的太赫兹频率上转换探测

Terahertz wave up-conversion detection based on organic nonlinear optical crystals

物理学报. 2021, 70(5): 050701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201908>

用于超导太赫兹探测器的低温标准黑体辐射源

Cryogenic blackbody calibration source for superconducting terahertz detectors

物理学报. 2022, 71(16): 168702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220103>

硅基自旋光电子学太赫兹辐射源特性

Terahertz emission characterization of silicon based ferromagnetic heterostructures

物理学报. 2024, 73(16): 167801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240703>

频率可切换太赫兹涡旋波束产生器

Switchable frequency terahertz vortex beam generator

物理学报. 2022, 71(21): 217401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221184>

共光路连续太赫兹反射和衰减全反射成像

Common path continuous terahertz reflection and attenuated total reflection imaging

物理学报. 2021, 70(11): 118701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210182>

基于IrMn/Fe/Pt交换偏置结构的无场自旋太赫兹源

Field-free spintronic terahertz emitters based on IrMn/Fe/Pt exchange bias heterostructures

物理学报. 2022, 71(4): 048703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211831>