

文章编号:1001-5078(2024)06-0858-06

· 激光器技术 ·

种子注入式太赫兹波参量产生源研究

路远^{1,2,3}, 李惟帆^{2,3,4}, 祁峰^{1,2,3,4}, 姚吉勇⁵, 郭丽媛^{2,3}, 李楠^{1,2,3}

- (1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 辽宁省太赫兹成像感知重点实验室, 辽宁 沈阳 110169;
3. 中国科学院沈阳自动化所光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110169;
4. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169; 5. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

摘要:种子注入式太赫兹波参量产生源(is-TPG)基于非线性晶体中的受激电磁偶子散射,具有线宽窄、相干性好、室温运转、可调谐等优点。本文基于5%摩尔百分比氧化镁掺杂的同成分铌酸锂晶体(MgO:CLN),对连续/脉冲种子注入式太赫兹波参量产生源(is/ips-TPG)调谐范围、输出能量、阈值等方面进行了研究。相比于is-TPG系统,ips-TPG系统调谐范围范围扩大约80%。is-TPG系统与ips-TPG系统3dB带宽分别为1THz与1.41THz,占各自调谐范围的51%和39%。ips-TPG系统相比is-TPG系统3dB带宽范围扩大了41%。在相近的平均功率密度下,由于ips-TPG具有更高的峰值功率密度降低了阈值,产生了更强的THz波输出,最大转换效率为 1.01×10^{-5} 。不同形式种子光的注入对太赫兹波参量辐射源有着显著的影响,实验结果表明ips-TPG系统的输出特性更为突出在实际应用中具有更高的价值。本文最后对其未来发展进行了分析和展望。

关键词:太赫兹参量辐射源;种子注入;非共线相位匹配;受激电磁偶子

中图分类号: O441; TN29 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.003

Research on seed-injected terahertz wave parametric generator

LU Yuan^{1,2,3}, LI Wei-fan^{2,3,4}, QI Feng^{1,2,3,4}, YAO Ji-yong⁵, GUO Li-yuan^{2,3}, LI Nan^{1,2,3}

- (1. School of Electronic Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Key Laboratory of Liaoning Province in Terahertz Imaging and Sensing, Shenyang 110169, China;
3. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;
4. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;
5. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The seed-injected terahertz wave parametric production source (is-TPG) is based on stimulated electromagnetic dipole scattering in nonlinear crystals, and has advantages of narrow line width, good coherence, room-temperature operation, and tunability. In this paper, the tuning range, output energy, threshold, and other aspects of continuous/pulsed seed-injected terahertz wave parametric generation source (is/ips-TPG) are investigated based on a 5% molar percentage magnesium oxide doped lithium niobate crystal (MgO:CLN) of the same composition. Compared to the is-TPG system, the tuning range of the ips-TPG system is expanded by approximately 80%. The 3 dB bandwidths

基金项目: 雄安新区科技创新专项(No. 2022XAGG0181); 辽宁省“兴辽英才”计划项目(XLYC2007074); 中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2023206)资助。

作者简介: 路远,男,硕士研究生,主要从事太赫兹光源方面的研究。E-mail:1260785273@qq.com

通讯作者: 祁峰,男,研究员,博士生导师,主要从事毫米波太赫兹成像与探测、电磁计算、生物电磁等方面的研究。E-mail:qifeng@sia.cn

收稿日期: 2023-11-16

of the is-TPG system and the ips-TPG system are 1 THz and 1.41 THz, respectively, accounting for 51 % and 39 % of their respective tuning ranges. The ips-TPG system extends the range of the 3dB bandwidth by 41 % compared to the is-TPG system. At similar average power densities, ips-TPG produces a stronger THz wave output with a maximum conversion efficiency of 1.01×10^{-5} due to its higher peak power density lowering the threshold. The injection of different forms of seed light has a significant impact on the terahertz wave parametric radiation sources. The experimental results show that the output characteristics of the ips-TPG system are more prominent and have higher value in practical applications. The paper concludes with an analysis and outlook of its future development.

Keywords: terahertz parametric radiation source; seed injection; non collinear phase matching; stimulated electromagnetic coupling

1 引言

太赫兹波 (Terahertz wave) 通常指频率范围为 0.1 THz 至 10 THz 的电磁波, 其对应波长为 3 mm ~ 30 μm 。太赫兹波辐射源与探测技术的发展使得太赫兹波段有了更全面的应用, 如材料科学、分子分析药物、食品检查和气体追踪^[1-4]。随着 THz 波的应用领域不断扩展, 人们对操作简便、结构紧凑、能提供高功率宽调谐输出的太赫兹波源的需求越来越大。

基于受激电磁耦子散射的太赫兹波参量辐射源既兼具较宽的频率调谐范围和较高的输出能量, 具有较大的研究价值和应用前景。在各种太赫兹参量辐射源中种子注入式太赫兹波参量产生源 (is-TPG) 与传统的光学参量振荡器相比, 其使用种子光注入完全代替斯托克斯光谱谐振腔进一步简化了辐射源结构, 同时又具有窄线宽, 宽调谐, 高功率等优点。基于种子注入的方式 K. Kawase 等获得了线宽小于 100 MHz 的 THz 信号^[5]; W. li 等利用高阶参量过程实现了 MW 级 THz 信号的输出^[6]; S. Mine 等利用平面泵浦光把输出阈值降低到了 3 mJ 以下^[7]; L. Tang 等利用脉冲种子注入的办法把调谐范围进一步扩大到 1THz ~ 5 THz^[8]。

在过去 30 年中世界各地科学家们从耦合方式^[9-10], 晶体选择^[11-12], 结构优化等^[13-15]各个方面对太赫兹参量辐射源进行了全面研究, 但仍缺少对比连续与脉冲两种形式种子注入对 is-TPG 系统影响的相关研究。本文将基于 5 % 摩尔百分比的 MgO 掺杂的同成分 LiNbO₃ 晶体 (MgO : CLN), 探究连续种子光与脉冲种子光的注入对太赫兹参量辐射源太赫兹信号输出的影响。对两者调谐特性与输出信号强度等方面进行了相关探究。

2 相位匹配计算

太赫兹参量辐射源基于晶体内部的受激电磁耦

子散射过程。在受激电磁耦子散射过程中, 一个泵浦光子转化为一个斯托克斯光子和一个太赫兹光子。这一转化过程同时满足能量守恒条件和动量守恒条件:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_T$$

$$k_p = k_s + k_T$$

其中, ω 为频率; k 为波矢; $q_i = n_i \omega_i / c$, $\omega_i = 2\pi c / \lambda_i$; λ 为波长; n 为折射率; c 为光速; $i = p, s, T$ 分别代表入射泵浦光、斯托克斯光和 THz 波。则以上两式可以变形为:

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_T} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_T} \quad (2)$$

式中, θ 为泵浦光 k_p 与信号光 k_s 的夹角; ϕ 为泵浦光 k_p 与 THz 波 k_T 的夹角, 通过非共线相位匹配示意图 (图 1), 矢量三角形转换为标量形式可以写为:

$$k_p^2 = k_s^2 + k_T^2 - k_p^2 k_s^2 \cos \theta \quad (3)$$

MgO : CLN 晶体中电磁耦子的介电常数可表示为^[16]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_j \frac{S_j \omega_{0j}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\Gamma_j \omega} \quad (4)$$

其中, ε 为介电常数; ε_∞ 为高频介电常数; ω_0 为本征振动频率; S 为晶格振动强度; Γ 为阻尼系数; j 表示第 j 个振动膜电磁耦子的色散关系为^[16-18]:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(\varepsilon_\infty + \sum_j \frac{S_j \omega_{0j}^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\Gamma_j \omega} \right) \quad (5)$$

此时的传播强度 k 为复数, 其实部 kr (即波矢大小) 与色散有关, 虚部 ki 与吸收有关。

根据图 1 非共线相位匹配图与 MgO : CLN 晶体对称性模的晶格振动参数可以计算出在不同观察角度泵浦光、斯托克斯光和 THz 波三波相互作用的相位匹配曲线, 如图 2 所示。

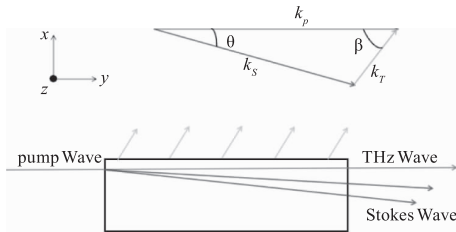


图 1 非共线相位匹配图

Fig. 1 Non collinear phase matching diagram

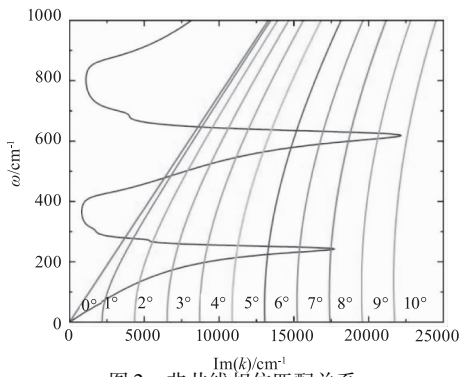


图 2 非共线相位匹配关系

Fig. 2 Non collinear phase matching relationship

MgO : CLN 晶体本征振动模 $\omega_0 = 248 \text{ cm}^{-1}$, 当相位匹配角等于 0° 时相位匹配曲线与的振动模的色散曲线的交点在原点, 这就是说在共线散射情况下振动模无法实现散射; 当角度大于 8° 时相位匹配曲线与振动模的色散曲线不存在交点, 同样无法实现散射。因此 MgO : CLN 晶体仅在小角度下满足非共线相位匹配条件, 并且通过连续改变相位匹配角度可实现连续调谐, 不考虑晶体吸收的情况下可以实现 $0 \sim 7.4 \text{ THz}$ 范围的调谐。但是由于 MgO : CLN 晶体在高频 THz 吸收系数不断增加, 与调谐角度增加导致的相互作用面积减小, 实际调谐范围与理论值存在一定偏差, 实际高能量输出范围一般在 $1 \sim 3 \text{ THz}$ 。以此为基础, 后续实验将在非共线相位匹配条件下探究不同形式种子光的注入是否会对调谐范围产生影响。

3 实验装置

脉冲种子注入式太赫兹波参量产生源 (ips-TPG) 实验装置如图 3 所示。

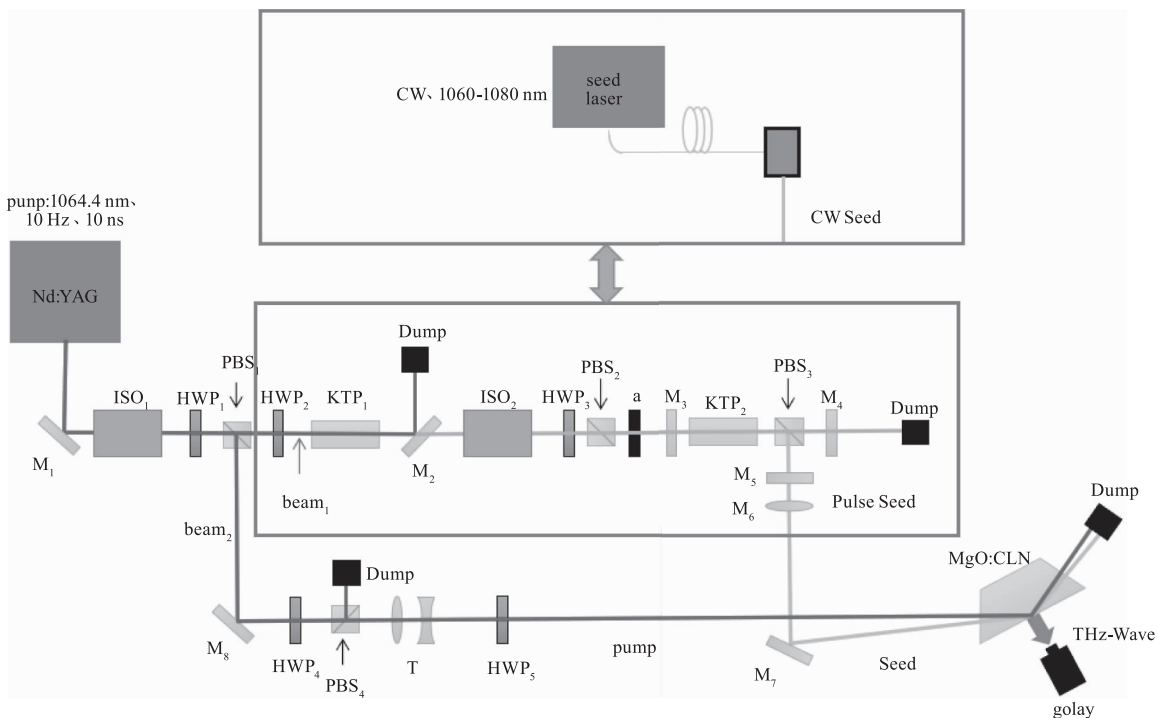


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental device

泵浦源使 Nd : YAG 激光器, 脉冲中心波长 1064.4 nm , 线宽 65 GHz , 重复频率 10 Hz , 脉冲宽度 9 ns , 光束直径 7 mm 。M1 为 1064 nm 激光高反镜。光束经过半波片 HWP₁ 和偏振分光棱镜 PBS₁ 分为两束。半波片 HWP₂、KTP₁ 晶体 ($10 \times 10 \times 20 \text{ mm}^3$, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 23.5^\circ$) 和镀有 $45^\circ 1064 \text{ nm}$ 激光高反、

532 nm 激光高透的平面镜 M₂ 组成一个倍频系统产生 532 nm 激光。半波片 HWP₃ 和偏振分光棱镜 PBS₂ 将 532 nm 光束调节为 P 偏振并用于控制能量。经过小孔光阑 a 改变 532 nm 光束直径为 4 mm 。平面镜 M₃、M₄、KTP₂ ($10 \times 10 \times 20 \text{ mm}^3$, $\theta = 90^\circ$, $\phi = 23.5^\circ$) 和偏振分光棱镜 PBS₃ 组成一个单

谐振光参量振荡器(SR-OPO)。平面镜 M_3 与 M_4 为 1060 ~ 1080 nm 激光高反、532 nm 激光高透组成系统腔镜。SR-OPO 属于 II 类相位匹配, P 偏振态的信号光透过偏振分光棱镜 PBS_3 在腔内震荡, S 偏振态的闲频光则被其反射出谐振腔。滤波片 M_5 为 532 nm 高反、1060 ~ 1080 nm 高透, 防止残留的 532 nm 激光进入晶体。 M_6 焦距为 250 mm 凸透镜对脉冲种子光进行准直, 准直后光束直径为 4 mm。当 KTP_2 晶体调谐角度从 $0^\circ \sim 14^\circ$ 变化, 可以实现 1064.4 ~ 1080.8 nm 的波长范围调谐。脉冲种子光脉宽为 5 ns, M_7 是 1064 nm 高反镜且是一个半圆镜片, 它将种子光注入到 $MgO:CLN$ 晶体中。 M_7 被放置在一个转台上, 通过角度调谐与水平移动使得脉冲种子光与泵浦光满足相位匹配条件, 获得最大的太赫兹信号输出。平面镜 M_8 为 1064 nm 高反。半波片 HWP_4 和 PBS_4 用于能量调节, 望眼镜系统 T 对光束 2 进行缩束, 缩束后光斑直径 3 mm 作为泵浦光进入 $MgO:CLN$ 晶体。半波片 HWP_5 用于调节泵浦光偏振态为 S 偏振。 $MgO:CLN$ 晶体被切割成一个等腰梯形, 底边长 50 mm, 底角 65° , 厚度 1 mm。

连续种子注入式太赫兹波参量产生源系统使用单模连续激光器作为种子源, 光纤准直器对光纤输出光束进行准直与偏振态调节。输出连续种子光光束直径 4 mm 偏振态为 S 偏振。该部分代替脉冲种子光部分, 作为连续种子光注入 $MgO:CLN$ 晶体, 组成连续种子注入式太赫兹波参量产生源系统。实验中使用高莱探测器测量太赫兹波信号, 其功率转换系数为 83.59 kV/W。高莱探测器窗口前放置黑色聚乙烯薄片以滤除红外杂散光。

4 实验结果与讨论

首先对两套系统的调谐特性进行研究如图 4 所示。在 is-TPG 系统中, 固定连续种子光输出功率为 120 mW, 泵浦能量为 70 mJ。当种子光波长从 1069 nm 增加到 1076.5 nm, 可以实现 1.32 ~ 3.27 THz 的调谐范围, 在 2 THz 处取得最大输出为 0.11 μ J。固定泵浦光能量在 70 mJ, 种子光能量固定在 4 mJ。当脉冲种子光波长从 1066.1 nm 增加到 1080 nm, 可以实现 0.5 ~ 4.07 THz 的太赫兹信号输出, 在 2 THz 时获得最大输出为 0.53 μ J。 is-TPG 与 ips-TPG 相比调谐范围扩大调谐范围扩大了 80 %。引入太赫兹波能量衰减因子 A_T [8]:

$$A_T = 10 \times \lg(E_{Max}/E_T) \quad (6)$$

式中, E_{Max} 代表最大的输出能量; E_T 为每个频率点处的太赫兹波能量。 A_T 的值越小, 代表这一频率点处的太赫兹波产生能力越强。在 3 dB 带宽, 所有频率点的输出能量均等于最大输出能量的一半。

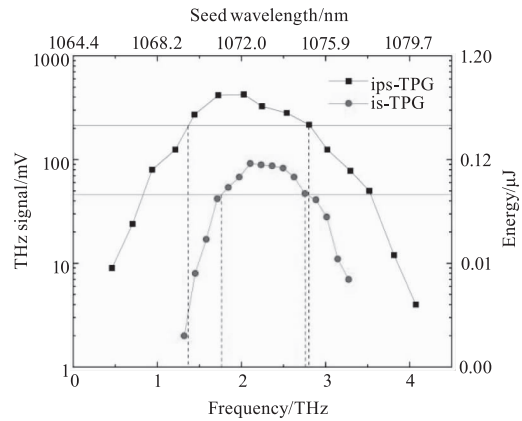


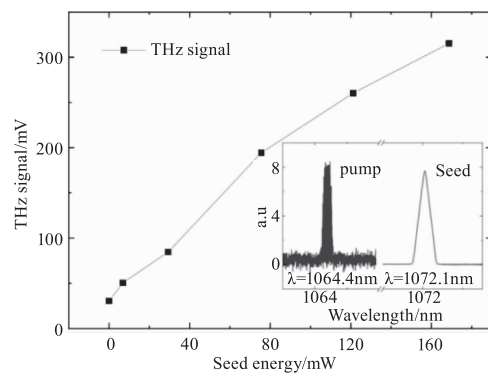
图 4 调谐特性图

Fig. 4 Tuning characteristic diagram

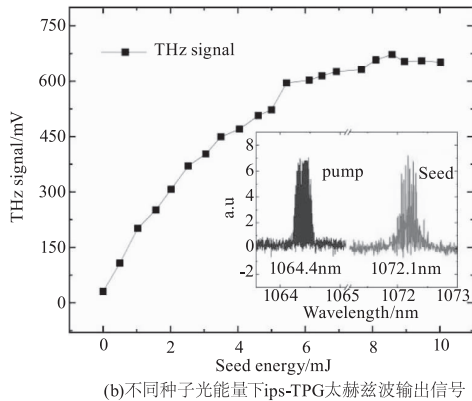
从图 4 可以看出 is-TPG 系统与 ips-TPG 系统 3 dB 带宽范围分别为 1.75 ~ 2.75 THz 与 1.39 ~ 2.80 THz, 占各自调谐范围比例分别为 51 % 和 39 %。两者相比后者比前者高能量输出范围扩大了 41 %。这说明 ips-TPG 系统能够有效地提高 THz 波输出的能量, 拓宽可利用的 THz 频率范围。

进一步探究泵浦能量与种子能量对 THz 信号的影响。两套系统均固定种子光波长 1072.1 nm, 泵浦能量 85 mJ, 连续种子光线宽为 65 GHz, 脉冲种子光线宽为 110 GHz 实验结果如图 5 所示。

随着连续种子光功率的增加, THz 信号呈近线性增加如图 5 (a) 所示, 测量到的最大输出信号 315 mV 对应输出能量为 0.37 μ J。如图 5 (b) 所示, 不断增加脉冲种子光能量, 当能量小于 8 mJ 时输出的太赫兹波信号太赫兹波信号增长趋势逐渐趋于平缓, 在 8 mJ 时达到饱和, 观测到最大太赫兹波信号



(a) 不同种子光功率下 is-TPG 太赫兹波输出信号



(b)不同种子光能量下ips-TPG太赫兹波输出信号

图 5 不同种子光能量下太赫兹波输出信号

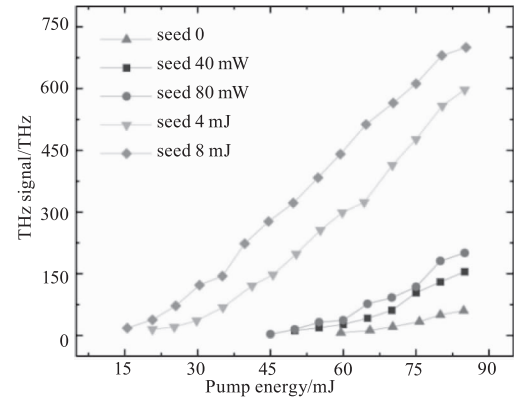
Fig. 5 Is-TPG and ips-TPG terahertz wave output signal under different light energies

为 700 mV, 对应能量为 0.84 μJ 。由于连续种子光所使用单模连续激光器最大输出功率为 170 mW 能量较低, 并未观察到饱和现象。ips-TPG 系统具有更高的 THz 波输出, 其可能是脉冲种子具有更高的峰值功率所导致的, 为验证猜想在相同的平均种子功率密度下, 对两套系统的 THz 输出信号进行对比。输出 THz 波频率固定 2 THz 处保证种子光功率的平均密度基本相同, 两者种子光光斑直径均为 4 mm 实验结果如图 6(a) 所示。

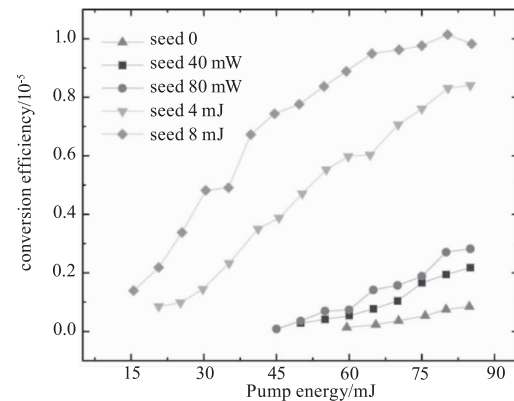
如图 6(a) 所示, 随着泵浦能量的不断增加, 两套系统太赫兹波信号输出都呈近线性相关, 脉冲种子光注入时增加泵浦能量 THz 信号增长幅度更大且输出能量更高。实验证明在相同的泵浦能量与种子光平均功率密度下, 脉冲种子光因其具有更高的峰值功率能够更有效地补偿太赫兹波参量过程中斯托克斯光的增益衰减, 从而提高 THz 信号增益。脉冲种子光的注入不仅可以提高 THz 波的输出能量还能有效减低输出阈值。连续种子光功率为 40 mW, 脉冲种子能量为 4 mJ 时对应阈值分别为 17 mJ 和 48 mJ, 连续种子光功率为 80 mW, 脉冲种子能量 8 mJ 时对应阈值分别为 15 mJ 和 45 mJ。输出阈值的降低可以有效保护晶体延长晶体的使用寿命。

图 6(b) 所示为注入不同形式种子光, 不同能量大小的种子光时系统的转换效率。无论何种形式的种子光当泵浦能量增加时转换效率不断增加, ips-TPG 系统转换效率大约为 is-TPG 系统的四倍。当注入脉冲种子能量为 8 mJ, 随着泵浦能量的增加, 转换效率增长趋势逐渐变缓。当脉冲种子能量为 8 mJ, 泵浦能量为 80 mJ 时转换效率最高为 1.01

$\times 10^{-5}$ 。脉冲种子光相较于连续种子光虽然可以一定程度上提高转换效率, 但是其受到客观条件影响并不能无限制地提高转换效率, 当脉冲种子达到 8 mJ 随着泵浦能量的增加转换效率逐渐达到极限。



(a)注入不同形式种子光对THz信号输出影响



(b)注入不同形式种子光能量转换效率

图 6 注入不同形式种子光对 THz 信号输出及能量转换效率的影响

Fig. 6 Effect of injecting different forms of seed light on THz signal output and energy conversion efficiency

5 总结与展望

在实际应用中高阈值, 宽调谐的太赫兹参量辐射源一直是至关重要的性能指标。本文对 is-TPG 与 ips-TPG 两套系统输出特性进行了系统对比。ips-TPG 系统无论是在调谐范围、峰值能量、高能量输出范围都优于 is-TPG 系统。在 ips-TPG 系统中, 固定泵浦能量当脉冲种子光能量达到 8 mJ 时 THz 输出信号逐渐饱和, 种子光对斯托克斯光的增益达到极限。由于所使用连续激光器输出功率较低, 并未观察到随着连续种子光功率增加 THz 输出信号出现饱和的现象, 后续实验可以使用输出功率更高的连续激光器作为连续种子光, 以便进行后续研究。在相近的平均功率密度下, ips-TPG 具有更低的阈值, 更高的输出能量, 且只增加泵浦能量情况下 THz

信号增长趋势更为明显。ips-TPG 系统转换效率大约为 is-TPG 系统的四倍。不同形式种子光的注入对太赫兹波参量辐射源有着显著的影响,ips-TPG 系统的输出特性更为突出在实际应用中具有更高的价值。本文对于注入不同种子光对太赫兹参量辐射源的影响研究,有利于种子光注入式太赫兹波参量辐射源在实际领域中的应用与推广。

参考文献:

- [1] Garg M, Martin-Jimenez A, Luo Y, et al. Ultrafast photon-induced tunneling microscopy[J]. *American Chemical Society nano*, 2021, (11): 15.
- [2] H Sakai, K Kawase, K Murate. Highly sensitive multi-stage terahertz parametric detector[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 3905 – 3908.
- [3] K Murate, H Kanai, K Kawase. Application of machine learning to terahertz spectroscopic imaging of reagents hidden by thick shielding materials[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, 11(6): 620 – 625.
- [4] Mehta T, Fayyaz M, Giler G E, et al. Current trends in biomarkers for traumatic brain injury[J]. *Open Access Journal of Neurology & Neurosurgery*, 2020, 12(4): 86 – 94.
- [5] Kawase K, Minamide H, Imai K, et al. Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with wide tunability[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(2): 195 – 197.
- [6] Li W, Qi F, Liu P, et al. Cascaded effect in a high-peak-power terahertz-wave parametric generator[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(1): 178 – 181.
- [7] Mine S, Abe M, Kawase K, et al. Efficient terahertz parametric source using flat pump beam[J]. *IEEE*, 2023, 13(2): 153 – 157.
- [8] Longhuang T, Degang X, Yuye W, et al. Injection pulse-seeded terahertz-wave parametric generator with gain enhancement in wide frequency range[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 022808.
- [9] Kawase K, Sato M, Nakamura K, et al. Unidirectional radiation of widely tunable THz wave using a prism coupler under noncollinear phase matching condition[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(6): 753 – 755.
- [10] Ikari T, Zhang X, Minamide H, et al. THz-wave parametric oscillator with a surface-emitted configuration[J]. *Optics Express*, 2006, 14(4): 1604 – 1610.
- [11] Wang Y, Ren Y, Xu D, et al. Energy scaling and extended tunability of a ring cavity terahertz parametric oscillator based on KTiOPO₄ crystal[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(11): 114213.
- [12] Shikata, Jun Ichi, et al. Tunable terahertz-wave parametric oscillators using LiNbO₃ and MgO: LiNbO₃ crystals[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, 48(4): 653 – 661.
- [13] Imai K, Kawase K, Shikata J I, et al. Injection-seeded terahertz-wave parametric oscillator[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(8): 1026 – 1028.
- [14] Edwards T J, Walsh D, Spurr M B, et al. Compact source of continuously and widely-tunable terahertz radiation. [J]. *Optics Express*, 2006, 14(4): 1582 – 1589.
- [15] Yuan L, Xingyu Z, Zhenhua C, et al. Injection-seeded terahertz parametric oscillator based on ring-cavity configuration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1014001.
- [16] Ravi K, Krtner F X. Raman shifting induced by cascaded quadratic nonlinearities for terahertz generation[J]. *Laser & Photonics Review*, 2020, 14(11): 1 – 6.
- [17] Barker A S, Loudon R. Dielectric properties and optical phonons in LiNbO₃ [J]. *Physical Review*, 1967, 158(2): 433 – 445.
- [18] 蒋民华. 晶体物理[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1980.