

·封面文章·

# 基于 MgO:CLN 晶体的脉冲种子注入式 太赫兹波参量产生源

徐德刚<sup>1,2</sup>, 闫超<sup>1,2</sup>, 聂港<sup>1,2</sup>, 唐隆煌<sup>1,2</sup>, 陈锴<sup>1,2</sup>, 王与焯<sup>1,2\*</sup>, 姚建铨<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 天津 300072;

<sup>2</sup>教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072

**摘要** 同成分铌酸锂 (CLN) 晶体是最常用的太赫兹参量增益晶体, 基于该晶体的太赫兹波参量辐射源具有太赫兹波输出能量高、连续可调谐等优点, 但是其调谐范围相对较窄, 一般为 0.6~3 THz, 限制了其实际应用范围。为此, 提出基于摩尔分数为 5% 的氧化镁掺杂的 CLN 晶体的脉冲种子注入式太赫兹波参量产生器, 其太赫兹波频率调谐范围为 1~4 THz, 在 2.0 THz 处获得最大输出能量为 1.02  $\mu$ J, 输出太赫兹波的 3 dB 带宽达 1.94 THz, 占调谐范围的 64.67%。该太赫兹辐射源具有宽频带、增益平坦等特性, 在实际应用中具有更高的价值。

**关键词** 非线性光学; 太赫兹波; 脉冲种子注入; 太赫兹参量产生器; 受激电磁耦合

中图分类号 O437.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1519002

## Injection Pulse-Seeded Terahertz-Wave Parametric Generator Based on MgO:CLN Crystal

Xu Degang<sup>1,2</sup>, Yan Chao<sup>1,2</sup>, Nie Gang<sup>1,2</sup>, Tang Longhuang<sup>1,2</sup>,

Chen Kai<sup>1,2</sup>, Wang Yuye<sup>1,2\*</sup>, Yao Jianquan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser and Optoelectronics, School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China

**Abstract** Congruent lithium niobate (CLN) is the most commonly used terahertz parametric gain crystal. The terahertz-wave parametric source based on the CLN crystal has the advantages of high terahertz-wave output energy and continuous tunability, but its tuning range is relatively narrow, generally during 0.6-3 THz, which limits its practical applications. Therefore, an injection pulse-seeded terahertz-wave parametric generator based on 5% mol MgO:CLN crystal is proposed. The terahertz-wave frequency tuning range is 1-4 THz, and the maximum output energy is 1.02  $\mu$ J at 2.0 THz. The 3 dB bandwidth of the output terahertz wave is 1.94 THz, accounting for 64.67% of the tuning range. The terahertz radiation source has the characteristics of broadband and flat gain, and has higher value in practical applications.

**Key words** nonlinear optics; terahertz wave; pulse-seeded injection; terahertz-wave parametric generator; stimulated polariton scattering

**OCIS codes** 190.4410; 040.2235; 290.5910

## 1 引 言

太赫兹 (THz) 波是位于微波和红外光之间, 频率范围为 0.1~10 THz 的电磁波。随着太赫兹波产生和探测技术的高速发展, 其在医学成像、无损检

测、光谱分析、环境检测等方面具有极为重要的应用前景。目前比较成熟的太赫兹波辐射源的连续调谐范围一般为 1~3 THz。然而, 在一些特定领域, 如半导体检测、分子内振动测量等, 需要工作频率在 3 THz 以上的连续可调谐太赫兹源<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2020-04-13; 修回日期: 2020-04-28; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61775160, U1837202, 61771332)

\* E-mail: yuyewang@tju.edu.cn

基于受激电磁耦合子散射的太赫兹波参量产生器 (TPG) 是一种极为重要的太赫兹波产生方法, 具有输出能量高、调谐范围广、结构紧凑、室温运行等优点。常用的太赫兹参量增益晶体有很多, 例如  $\text{LiNbO}_3$  (LN)、 $\text{RbTiOPO}_4$  (RTP)、 $\text{KTiOPO}_4$  (KTP)、 $\text{KTiOAsO}_4$  (KTA) 等。其中, 利用 KTP 晶体能够实现 3.1~13.5 THz 的宽调谐输出, 但是该输出频谱中包含几个频率间隔, 无法实现太赫兹波的连续调谐输出<sup>[3-4]</sup>。同成分铌酸锂 (CLN) 晶体由于其二阶和三阶非线性系数高、最低阶 A1 对称模频率正处于太赫兹波段, 因而成为最常用的太赫兹参量增益晶体。基于该晶体的太赫兹辐射源具有输出能量高、连续可调谐等优点, 但是其调谐范围相对较窄, 一般为 0.6~3 THz<sup>[5-8]</sup>。近年来, 为了改善 CLN 晶体的太赫兹波输出特性, 人们采取了很多有效的方法。例如, 使用硅棱镜耦合以提高太赫兹波的输出效率<sup>[9]</sup>; 利用 CLN 晶体的浅表面产生并出射太赫兹波, 以减少晶体对太赫兹波的大量吸收<sup>[10]</sup>; 使用亚纳秒激光作为泵浦源, 以抑制受激布里渊散射, 从而提高受激电磁耦合子散射增益<sup>[11]</sup>; 低温冷却 CLN 晶体至 78 K, 从而减少晶体对太赫兹波的吸收并提高太赫兹波增益<sup>[12]</sup>; 改变 MgO 的掺杂浓度以提高晶体的损伤阈值等<sup>[13]</sup>。这些特殊的结构设计或方法, 使得输出太赫兹波具有高能量、窄线宽等优点。但是它们仍然不能有效地扩展太赫兹波的频率调谐范围。最近, Ortega 等<sup>[14]</sup>通过在 CLN 晶体浅表面镀聚四氟乙烯保护层, 提高了晶体的损伤阈值, 在提升最大输出能量的同时, 将 CLN 晶体的太赫兹波输出频率上限扩展到了 3.84 THz, 但是太赫兹波输出能量在最大值附近迅速下降, 高能量太赫兹波输出主要集中在 1.6~2.4 THz。本文课题组开展了基于近化学计量比铌酸锂 (SLN) 晶体的太赫兹参量振荡或产生的研究工作, 将铌酸锂晶体的太赫兹波输出频率上限从 3 THz 扩展到了 5 THz<sup>[15]</sup>, 但其高能量太赫兹波输出主要集中在 1.4~2.0 THz。当频率大于 2.5 THz 时, 输出能量则下降至最大输出的一半以下, 导致可用于实际应用的太赫兹频段依旧较窄。同时, 近化学计量比铌酸锂晶体的高昂造价使得该类太赫兹波参量辐射源成本较高。

本文基于摩尔分数为 5% 的氧化镁掺杂的同成分铌酸锂晶体 ( $\text{MgO}:\text{CLN}$ ), 采用脉冲种子注入式太赫兹波参量产生器 (ips-TPG), 将同成分铌酸锂晶体的输出频率上限扩展到 4 THz。当泵浦能量与注入脉冲种子光能量分别为 184 mJ/pulse 和

20 mJ/pulse 时, 太赫兹波的调谐范围为 1~4 THz, 且其输出 3 dB 带宽为 1.94 THz, 占调谐范围的 64.67%。同时, 在 2 THz 处获得最大输出能量 1.02  $\mu\text{J}$ 。此外, ips-TPG 在 30 min 内输出太赫兹波的均方根误差 (RMSE) 值约为 5.6%。

## 2 实验研究

太赫兹波参量产生器的原理是基于非线性增益介质的受激电磁耦合子散射。在受激电磁耦合子散射过程中, 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。这一转化过程满足能量守恒 ( $\omega_p = \omega_s + \omega_T$ ) 和动量守恒 ( $k_p = k_s + k_T$ )。脉冲种子光的注入, 能够有效地补偿太赫兹波参量过程中斯托克斯光的增益衰减, 提高受激拉曼散射过程的输出增益, 同时增强太赫兹波参量过程的非线性作用, 从而提高太赫兹波的输出能量。通过改变同成分铌酸锂晶体中种子光与泵浦光之间的相位匹配角, 可以实现太赫兹波的频率调谐输出。

图 1 为脉冲种子注入式太赫兹波参量产生器 (ips-TPG) 的实验装置图。如图 1 所示, 实验使用的泵浦光源是 Nd:YAG 激光器, 其脉冲中心波长为 1064.4 nm, 重复频率为 10 Hz, 脉宽为 10 ns, 光束直径为 8 mm。激光器出射的 1064 nm 泵浦光被 45° 的近红外光半透半反镜  $M_1$  分成光束 1 和光束 2。两束 1064 nm 激光分别经过相同的望远镜组合  $T_1$ 、 $T_2$ , 光束直径被缩小为 5 mm。 $M_2$  和  $M_3$  均镀有近红外光的 45° 高反膜。进一步, 1064 nm 光束 1 通过半波片  $\text{HWP}_1$  和布鲁斯特窗  $\text{BP}_1$  的组合, 偏振方向被调节为 S 偏振, 作为 ips-TPG 的泵浦光。1064 nm 光束 2 的偏振由半波片  $\text{HWP}_2$  进行调节, 以满足  $\text{KTP}_1$  晶体中倍频光产生的相位匹配条件 ( $\text{KTP}_1$ : 7 mm × 7 mm × 10 mm,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 23.5^\circ$ )。倍频作用后, 基频光 (1064 nm) 与倍频光 (532 nm) 被镀有 532 nm 高反、1064 nm 高透的滤波镜  $M_4$  分开。半波片  $\text{HWP}_3$  和布鲁斯特窗  $\text{BP}_2$  的组合将 532 nm 激光的偏振方向调整为 P 偏振, 并控制其输出能量。平面镜  $M_5$ 、 $M_6$ 、 $\text{KTP}_2$  晶体、布鲁斯特窗  $\text{BP}_3$  共同构成一个单谐振的光参量振荡器 (SR-OPO), 532 nm 激光是该 SR-OPO 的泵浦光。其中,  $M_5$ 、 $M_6$  对 532 nm 激光高透, 对 1064 nm 激光高反, 组成 SR-OPO 的前后腔镜;  $\text{KTP}_2$  是非线性作用晶体 (10 mm × 8 mm × 20 mm,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 24.5^\circ$ ), 被放置在一个转台上。SR-OPO 的相位匹配类型是 II 类相位匹配, 产生的 P 偏振信号光透过

BP<sub>3</sub> 在腔内振荡,而 S 偏振闲频光则被 BP<sub>3</sub> 反射出谐振腔,作为 ips-TPG 的注入脉冲种子光。通过旋转 KTP<sub>2</sub> 晶体可以实现对种子光波长的调节,其调节范围为 1068.10 ~ 1084.56 nm。M<sub>7</sub> 是一个 532 nm 高反、近红外范围高透的平面镜,用于防止

残留的 532 nm 光进入 CLN 晶体中。M<sub>8</sub> 是一个近红外波段高反镜,它将脉冲种子光注入到 CLN 晶体中。且 M<sub>8</sub> 被放置在一个转台上,调节转台角度可以改变泵浦光与种子光的相位匹配角,使得输出的太赫兹波能量最大。

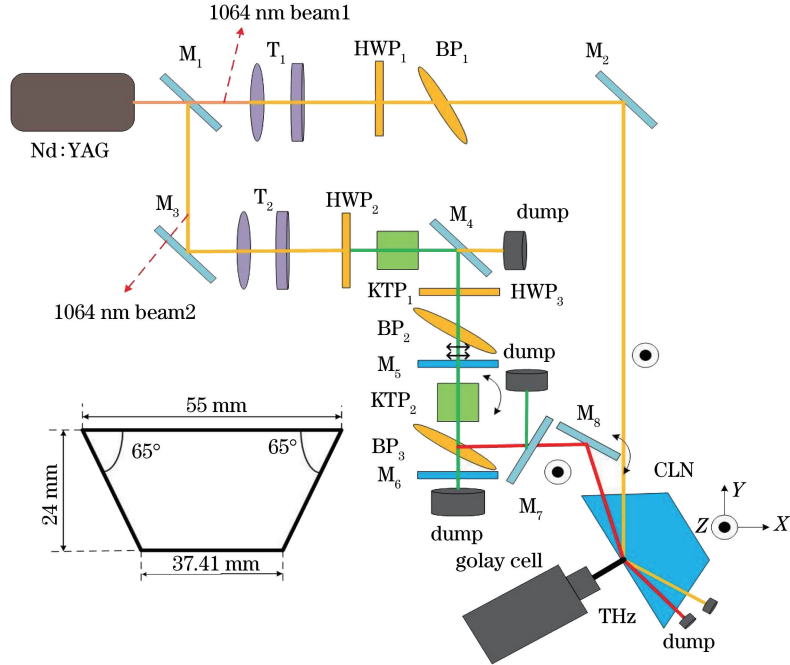


图 1 ips-TPG 实验装置图(插图为 CLN 晶体的结构示意图)

Fig. 1 Experimental setup of ips-TPG(Insert is schematic of CLN crystal structure)

插图是实验使用的 MgO:CLN 晶体的结构示意图。晶体被切割成一个等腰梯形,其尺寸在  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上分别为 55 mm、24 mm 和 10 mm。其表面经过抛光处理但未镀膜。泵浦光和种子光的偏振方向都沿晶体的  $z$  轴,且在整个调谐过程中,两者始终在晶体的浅表面交叠。晶体的特殊结构设计,能保证太赫兹波近垂直于晶体浅表面出射,减少太赫兹波由于晶体吸收和菲涅耳反射带来的损耗,且又能保证泵浦光和种子光在晶体表面发生全反射。实验中使用高莱探测器(Golay cell, GC-1P, Tydex, 俄罗斯)测量太赫兹波的能量,其功率转换系数为 86.95 kV/W。此外,为了防止残留的红外光进入高莱探测器中,高莱探测器窗口前放置有 0.5 mm 厚的黑色聚乙烯薄片以滤除红外杂散光,其在不同太赫兹波频率处的透过率由太赫兹时域光谱仪标定(TAS7500SP, Advantest Corporation, 日本)。种子光和 Stokes 光的波长使用光谱分析仪(86142B, Agilent, 美国)测量,泵浦光和种子光的能量则使用能量计(1919-R, Newport, 美国)测量。

### 3 实验结果与讨论

首先,对 ips-TPG 中太赫兹波及斯托克斯光输出频率调谐特性进行研究。对 SR-OPO 中 KTP<sub>2</sub> 晶体不同旋转角度下对应的 ips-TPG 的 Stokes 波长进行测量,并代入能量守恒公式  $\omega_p = \omega_s + \omega_T$  中计算得到相对应的太赫兹波频率,如图 2 所示。当 KTP<sub>2</sub> 晶体的旋转角度为  $0^\circ \sim 7.5^\circ$  时,ips-TPG 的 Stokes 光波长从 1068.2 nm 变化至 1079.7 nm,相对应的太赫兹波频率调谐范围为 1~4 THz。

图 3 所示为泵浦能量 184 mJ/pulse、脉冲种子光能量 20 mJ/pulse 时,ips-TPG 在不同频率时的能量输出曲线。当种子光波长从 1068.2 nm 调谐至 1079.7 nm 时,相应的太赫兹波输出频率从 1 THz 连续调谐至 4 THz。其中,在 2 THz 处实现最大能量输出,为 1.02  $\mu$ J;在 1 THz 处的能量输出最小,为 96.92 nJ,对应示波器的电压分别为 315 mV 和 30 mV。插图为太赫兹波能量衰减因子  $A_T$  随调谐频率的变化特性,公式为

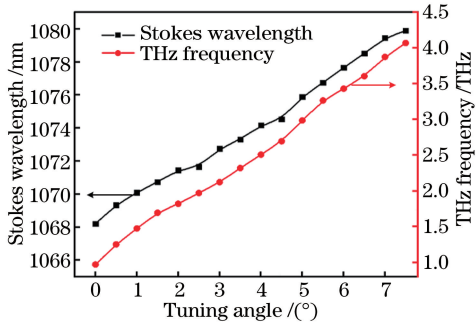


图 2 ips-TPG 中太赫兹波及斯托克斯光输出频率调谐特性  
Fig. 2 Tuning characteristics of THz wave and Stokes output frequency in ips-TPG

$$A_T = 10 \times \lg(E_{\text{Max}}/E_T), \quad (1)$$

式中： $E_{\text{Max}}$  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。此处，引入 3 dB 带宽来衡量 ips-TPG 在每个频率点处的太赫兹波产生能力。在 3 dB 带宽内，所有频率点的输出能量均大于最大输出能量的一半。从插图中可以看到，ips-TPG 的 3 dB 带宽达 1.94 THz，而此前在同成分铌酸锂晶体中得到的 3 dB 带宽一般都小于 1 THz<sup>[16-18]</sup>。此外，在频率大于 2.5 THz 的高频输出部分，2.5~3.32 THz 仍处于 3 dB 带宽之中。这说明 ips-TPG 能够有效地提高高频输出的能量，拓宽可利用的 THz 频率范围。

进一步，针对泵浦能量和脉冲种子能量对太赫兹波输出特性的影响进行了实验研究。将脉冲种子的能量分别固定在 0.53 mJ、3.06 mJ、10.34 mJ、20.2 mJ、30.0 mJ 和 37.3 mJ，测量 2.2 THz 处不同泵浦能量下 ips-TPG 的输出特性，如图 4(a) 所示。本文将高莱探测器探测到的太赫兹信号略大于

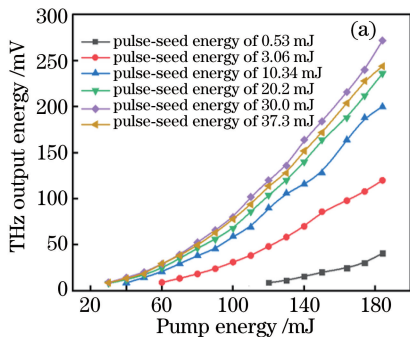


图 4 泵浦能量和注入脉冲种子能量对太赫兹波输出特性的影响。(a) 不同泵浦能量下，ips-TPG 输出太赫兹波能量；

(b) 不同脉冲种子能量下，ips-TPG 输出太赫兹波能量及阈值能量

Fig. 4 Effects of pumped energy and injected pulse seed energy on terahertz wave output characteristics. (a) THz output energy of ips-TPG under different pump energies; (b) THz output energy and threshold energy under different pulse-seed energies

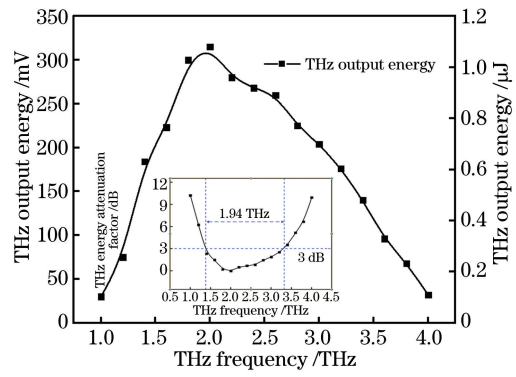
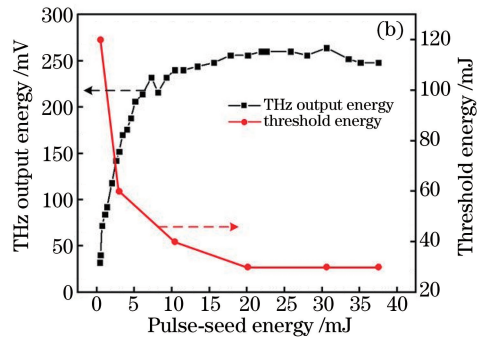


图 3 ips-TPG 的太赫兹波调谐输出特性(插图 of ips-TPG 的太赫兹波能量衰减因子)

Fig. 3 Terahertz wave tuning output characteristics of ips-TPG(Inset is THz energy attenuation factors of ips-TPG)

噪声信号(约为 10 mV)时对应的泵浦能量定义为阈值能量。可以看到，在不同种子光能量下，当泵浦能量逐渐增大时，输出的太赫兹波能量近似呈线性增长，且没有观察到饱和现象(为防止晶体损坏，没有继续加大泵浦能量)。在相同泵浦功率下，太赫兹波输出能量随着注入脉冲种子能量的增加而增大，特别是当脉冲种子能量超过 20 mJ 时，太赫兹波输出能量趋于稳定。此外，当脉冲种子能量较低时，ips-TPG 输出太赫兹波的阈值较高；而当脉冲种子能量大于 20 mJ 时，ips-TPG 的阈值泵浦能量趋于相同。为了进一步研究上述两种现象，将泵浦能量固定在 184 mJ/pulse，测量 2.2 THz 处不同种子光能量下的太赫兹波输出特性，如图 4(b) 所示。图中，太赫兹波的输出曲线大致分为两个部分。当脉冲种子能量从 0.53 mJ 增长到 7.27 mJ 时，太赫兹波输出能量近似呈线性增长；而当脉冲种子能量





超过 7.27 mJ 时,太赫兹波的输出能量增长变缓并逐渐饱和。这说明脉冲种子光的注入能量会影响太赫兹波的输出饱和。此外,由图 4(b)可知,当脉冲种子光能量逐渐增大时,泵浦阈值能量明显降低。当种子光能量为 20 mJ/pulse 时,泵浦阈值仅为 30 mJ/pulse,与无种子光情况下 120 mJ/pulse 的泵浦阈值能量相比,减小了 1/4。

图 5 为基于刀口法测量获得的太赫兹光斑能量分布特性。此时太赫兹波频率为 2.0 THz,泵浦光和种子光能量分别为 184 mJ/pulse 和 20 mJ/pulse。可以看到,输出的太赫兹光斑能量近似呈高斯分布。以光斑中心最大能量的 86.5% 定义光斑的大小,测得太赫兹光斑直径约为 5.5 mm,与相互作用的泵浦光和种子光 5 mm 的直径接近,说明 ips-TPG 输出的太赫兹波光束质量良好。

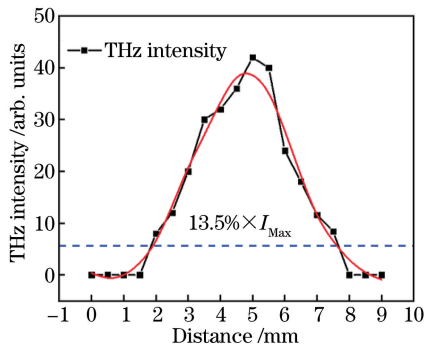


图 5 太赫兹光斑的能量分布

Fig. 5 Energy distribution of terahertz spot

最后,对 ips-TPG 输出的太赫兹波能量稳定性进行了研究。在泵浦能量为 150 mJ/pulse、种子光能量为 20 mJ/pulse 时,利用高莱探测器采集了 30 min 内 2 THz 处太赫兹波能量的变化情况。实验中共采集了 1800 组数据,结果如图 6 所示。引入 RMSE 来直观表示输出太赫兹波的稳定性情况。RMSE 的值越小代表输出太赫兹波的稳定性越好。

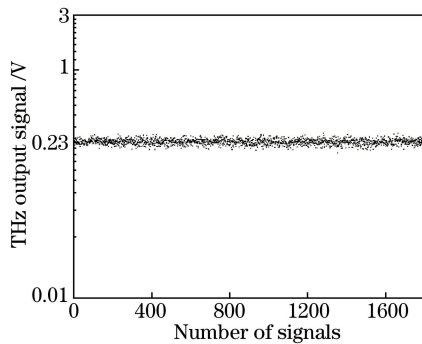


图 6 30 min 内 ips-TPG 的太赫兹波输出稳定性情况

Fig. 6 Stability of THz output of ips-TPG within 30 min

其计算公式为

$$\Delta \bar{E} = \left\{ \left[ \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \right] / n \right\}^{1/2}. \quad (2)$$

ips-TPG 在 30 min 内输出太赫兹波的 RMSE 值为 5.6%,说明 ips-TPG 具有良好的输出稳定性。

## 4 结 论

本文基于摩尔分数为 5% 的氧化镁掺杂的 CLN 晶体的脉冲种子注入式太赫兹波参量产生器进行实验研究。结果表明,ips-TPG 能够有效地扩展输出太赫兹波的调谐范围。其太赫兹波频率调谐范围为 1~4 THz,最大输出能量在 2 THz 处为 1.02  $\mu$ J,且输出 3 dB 带宽为 1.94 THz,占调谐范围的 64.67%。此外,30 min 内太赫兹波的不稳定性为 5.6%。这说明,ips-TPG 具有宽频带、增益平坦的太赫兹波输出特性,该研究为基于 CLN 晶体的太赫兹波参量辐射源在实际领域中的应用奠定了基础。

## 参 考 文 献

- [1] Huber R, Tauser F, Brodschelm A, et al. How many-particle interactions develop after ultrafast excitation of an electron-hole plasma [J]. *Nature*, 2001, 414(6861): 286-289.
- [2] Niessen K A, Xu M Y, Markelz A G. Terahertz optical measurements of correlated motions with possible allosteric function [J]. *Biophysical Reviews*, 2015, 7(2): 201-216.
- [3] Yan C, Wang Y Y, Xu D G, et al. Green laser induced terahertz tuning range expanding in  $\text{KTiOPO}_4$  terahertz parametric oscillator [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(1): 011107.
- [4] Wang W, Cong Z, Chen X, et al. Terahertz parametric oscillator based on  $\text{KTiOPO}_4$  crystal [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3706-3709.
- [5] Takida Y, Shikata J I, Nawata K, et al. Terahertz-wave parametric gain of stimulated polariton scattering [J]. *Physical Review A*, 2016, 93(4): 043836.
- [6] Lee A J, Pask H M. Continuous wave, frequency-tunable terahertz laser radiation generated via stimulated polariton scattering [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 442-445.
- [7] Lee A, He Y B, Pask H. Frequency-tunable THz source based on stimulated polariton scattering in  $\text{Mg}:\text{LiNbO}_3$  [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(3): 357-364.
- [8] Li Z Y, Yao J Q, Xu D G, et al. Experimental investigation of high-power tunable THz-wave

- parametric oscillator based upon  $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$  crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0411002.
- 李忠洋, 姚建铨, 徐德刚, 等. 铌酸锂晶体中参量振荡产生高功率可调谐太赫兹波的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0411002.
- [9] Zhang R L, Qu Y C, Zhao W J, et al. High energy, widely tunable Si-prism-array coupled terahertz-wave parametric oscillator with a deformed pump and optimal crystal location for angle tuning[J]. Applied Optics, 2017, 56(9): 2412-2417.
- [10] Zhang R L, Qu Y C, Zhao W J, et al. Si-prism-array coupled terahertz-wave parametric oscillator with pump light totally reflected at the terahertz-wave exit surface[J]. Optics Letters, 2016, 41(17): 4016-4019.
- [11] Nawata K, Hayashi S, Ishizuki H, et al. Effective terahertz wave parametric generation depending on the pump pulse width using a  $\text{LiNbO}_3$  crystal [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 7(5): 617-620.
- [12] Shikata J, Sato M, Taniuchi T, et al. Enhancement of terahertz-wave output from  $\text{LiNbO}_3$  optical parametric oscillators by cryogenic cooling[J]. Optics Letters, 1999, 24(4): 202-204.
- [13] Ken-Ichi K, Jun-Ichi S, Kodo K, et al. Terahertz-wave parametric generation characteristics of  $\text{MgO} : \text{LiNbO}_3$  [J]. Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics), 2002, 85(4): 22-29.
- [14] Ortega T A, Pask H M, Spence D J, et al. THz polariton laser using an intracavity  $\text{Mg} : \text{LiNbO}_3$  crystal with protective Teflon coating [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3991-3999.
- [15] Wang Y Y, Tang L H, Xu D G, et al. Energy scaling and extended tunability of terahertz wave parametric oscillator with  $\text{MgO}$ -doped near-stoichiometric  $\text{LiNbO}_3$  crystal [J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8926-8936.
- [16] Murate K, Hayashi S, Kawase K. Expansion of the tuning range of injection-seeded terahertz-wave parametric generator up to 5 THz [J]. Applied Physics Express, 2016, 9(8): 082401.
- [17] Zhang R L, Qu Y C, Zhao W J, et al. Output-mirror-tuning terahertz-wave parametric oscillator with an asymmetrical porro-prism resonator configuration [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2017, 38(6): 653-659.
- [18] Imai K, Kawase K, Ito H. A frequency-agile terahertz-wave parametric oscillator [J]. Optics Express, 2001, 8(13): 699-704.