

基于 MgO:SLN 晶体的环形腔太赫兹参量振荡器

徐德刚^{1,2**}, 李长昭^{1,2}, 王与焯^{1,2,3*}, 唐隆煌^{1,2}, 闫超^{1,2}, 贺奕斌^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

¹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;

²天津大学教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072;

³陆军军医大学西南医院神经创伤防治重点实验室, 重庆 400038

摘要 基于摩尔分数为 1% 的氧化镁掺杂的近化学计量比铌酸锂晶体, 采用环形腔结构的浅表垂直出射方式组成太赫兹波参量振荡器。该振荡器的太赫兹波输出调谐范围为 0.99~3.84 THz, 频率调谐响应时间为 600 μ s。当抽运能量为 150.30 mJ、太赫兹频率为 1.59 THz 时, 太赫兹脉冲的输出能量达到最大值, 为 16.28 μ J, 对应的能量转换效率为 1.08×10^{-4} 。在相同的实验条件下, 该环形腔结构太赫兹波参量振荡器输出的最大太赫兹波能量是传统线性腔结构的 2.35 倍, 实现了高能量、快速可调谐的太赫兹波输出。

关键词 非线性光学; 太赫兹波; 环形腔太赫兹参量振荡器; 受激电磁耦合子

中图分类号 O437.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1119001

Ring-Cavity Terahertz Parametric Oscillator Based on MgO:SLN Crystals

Xu Degang^{1,2**}, Li Changzhao^{1,2}, Wang Yuye^{1,2,3*},

Tang Longhuang^{1,2}, Yan Chao^{1,2}, He Yixin^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

¹*Institute of Laser and Optoelectronics, School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

²*Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

³*Key Laboratory of Neurotrauma Prevention and Treatment, Southwest Hospital, Army Medical University, Chongqing 400038, China*

Abstract A surface-emitted ring-cavity terahertz (THz) wave parametric oscillator is constructed based on the 1% molar fraction of MgO-doped near-stoichiometric lithium niobite crystal, whose output THz frequency tuning range is 0.99-3.84 THz and frequency tuning response time is 600 μ s. When the pump pulse energy is 150.30 mJ and the THz frequency is 1.59 THz, the output energy of the THz pulse is the maximum 16.28 μ J and the corresponding energy-conversion efficiency is 1.08×10^{-4} . Moreover, under the same experimental conditions, the maximum THz wave output energy from this ring-cavity THz wave parametric oscillator is about 2.35 times that obtained from the conventional linear-cavity ones. The THz wave output with high-energy and rapid-tuning is realized.

Key words nonlinear optics; terahertz wave; ring-cavity terahertz wave parametric oscillator; polariton

OCIS codes 040.2235; 190.4410; 190.5890

1 引 言

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz 之

间、波长介于红外与微波之间的电磁波。太赫兹波由于其在光谱中所处的位置及自身所具有的独特性质, 在光谱分析、无损检测、医学成像、通信、环境检

收稿日期: 2018-06-04; 修回日期: 2018-06-19; 录用日期: 2018-06-28

基金项目: 国家 973 计划(2015CB755403, 2014CB339802)、国家重点研发专项(2016YFC0101001)、国家自然科学基金(61775160, 61771332, 61471257)、中国博士后科学基金特别资助(2016M602954)、重庆市博士后科研项目特别资助(Xm2016021)、重庆西南医院生物强院科技创新计划(SWH2016LHJC04, SWH2016LHJC01)

* E-mail: yuyewang@tju.edu.cn; ** E-mail: xudegang@tju.edu.cn

测等领域有着巨大的应用前景。因此,如何获得高能量输出、稳定、可调谐的太赫兹辐射源成为太赫兹波研究中的关键问题之一。

基于受激电磁耦子散射的太赫兹波参量振荡器可在室温条件下产生高效相干的太赫兹波,具有输出能量高、频率可连续调谐、结构紧凑等优势。近年来,各种非线性晶体作为增益介质被用于太赫兹波参量振荡器,实现了不同频段的太赫兹波输出。例如,MgO:CLN 晶体、KTP 晶体、KTA 晶体以及 RTP 晶体被用于太赫兹波参量振荡器时,实现了 0.6~3.0 THz 的连续调谐和 3.1~13.5 THz 的间断调谐^[1-6]。同时,人们还不断改进太赫兹波参量振荡器的腔型结构来获得更高功率的太赫兹波输出和更快速度的太赫兹波频率调谐。例如利用硅棱镜耦合^[7]的方式减少太赫兹波在铌酸锂晶体表面输出时由于衰减全反射带来的功率损耗;利用铌酸锂晶体的浅表面产生并出射^[8]太赫兹波,这种方式可避免晶体大量吸收太赫兹波,从而达到提高太赫兹波输出能量的目的^[9]。从调谐方式来看,传统的太赫兹频率调谐方式是旋转整个太赫兹波参量振荡器的谐振腔来实现角度相位匹配。这种太赫兹波参量振荡源通常由两片平行平面镜和非线性晶体组成,其固定在一个可以转动的平台上,平台的转动中心位于晶体内^[3,10-11]。由于整个结构的质量过大,这种方式很难实现太赫兹波频率快速调谐。为了获得更快的太赫兹波频率调谐速度,2009 年,Minamide 等^[12]报道了一种基于三镜环形腔结构的快速调谐太赫兹波参量振荡源,该振荡源的结构简单,但采用矩形铌酸锂晶体作为该振荡源的非线性晶体时,输出能量较低,必须用液氮冷却的热辐射仪才能探测到,不利于实际应用。2016 年,Yang 等^[13]将太赫兹波浅表面输出耦合方式与基于罗兰圆的环形腔结构相结合,实现了高功率、频率快速可调谐的太赫兹波输出,抽运能量为 172.80 mJ 时,在 1.35 THz 处得到的最大太赫兹波输出能量为 12.90 μ J,提高了太赫兹波参量振荡器的实际应用价值,但是其输出的调谐太赫兹频率小于 3.0 THz。

本文基于摩尔分数为 1% 氧化镁掺杂的近化学计量比铌酸锂晶体(MgO:SLN),采用环形腔浅表面垂直出射结构的太赫兹参量振荡源,实现了高功率、快速可调谐的太赫兹波输出。当抽运能量为 150.30 mJ 时,太赫兹波的调谐范围为 0.99~3.84 THz,在 1.59 THz 处获得太赫兹波最大单脉冲能量为 16.28 μ J,对应的太赫兹波能量转换效率

为 1.08×10^{-4} 。

2 实验研究

太赫兹参量振荡器的理论模型是非线性晶体的受激电磁耦子散射,在受激电磁耦子散射过程中,一个抽运光子转化为一个斯托克斯光子和一个太赫兹光子,斯托克斯光子和太赫兹光子满足能量守恒定律($\omega_p = \omega_s + \omega_t$)和动量守恒定律($k_p = k_s + k_t$)。可通过改变抽运光与晶体中产生的斯托克斯光之间的角度调节太赫兹波频率。

图 1 为基于晶体浅表面出射的环形腔结构设计图,该斯托克斯光谐振腔由固定腔镜 M_1 、 M_2 、 M_3 和电控振镜 M_4 构成。在这个结构中,抽运光的入射位置和入射角度固定不变,A 点是抽运光和斯托克斯光在晶体出射面上的交点,其位置不随斯托克斯光的调节而发生变化。 A_1 是 A 点在 M_1 上的镜像, A_2 是 A 点在 M_2 上的镜像, A_3 是 A 点在 M_3 上的镜像,B 点是 M_4 的旋转中心, A_1 、 A_3 和 B 都在圆周上,满足罗兰圆光学结构的要求^[14]。如图 1 所示,当 M_4 旋转时,斯托克斯光以不同的角度在腔内谐振,同时,其与抽运光在晶体中的交点保持不变,因此可以通过 M_4 的旋转实现非线性相位匹配角度的控制,以实现太赫兹波输出频率的快速调谐。

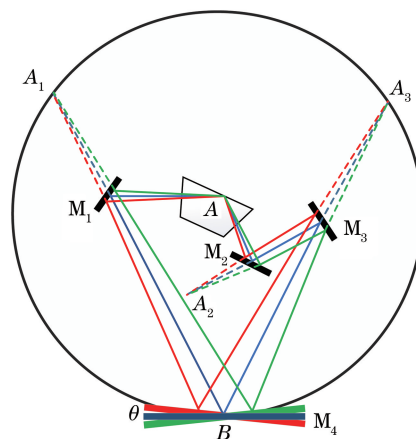


图 1 环形腔光学设计图(红、蓝、绿三条线分别代表 M_4 旋转时斯托克斯光的变化)

Fig. 1 Optical design of ring-cavity configuration, in which red, blue, and green lines indicating potential routes of Stokes wave through rotating the angle of M_4

图 2 是环形腔太赫兹参量振荡源的实验装置结构示意图。如图 2(a)所示,实验中使用的抽运源为 Nd:YAG 多模调 Q 激光器,其中心波长为

1064.50 nm, 重复频率为 10 Hz, 脉冲宽度为 15 ns。抽运光束直径为 9 mm, 通过望远镜系统 T_1 后缩束至 6 mm, 并使用小孔光阑进一步将抽运光斑缩束为 4 mm。同时, 利用半波片以及布儒斯特窗控制入射抽运光的脉冲能量及偏振态。 M_1 和 M_2 为镀有近红外高反膜的反射镜。斯托克斯光环形谐振腔由 $M_3 \sim M_6$ 组成。其中: M_3 和 M_4 分别为镀有 30° 和 65° 的 S 偏振高反膜, 其在 1063.00~1078.00 nm 范围内的反射率大于 99%; M_5 和 M_6 为 30° 入射的 S 偏振特殊镀膜镜片, 其在 1063.00~1064.70 nm 范围内的透射率大于 98%, 在 1067.00~1070.00 nm 范围内的反射率大于 70%, 在 1070.00~1078.00 nm 范围内的反射率大于 90%, 可以实现抽运光和斯托克斯光的分离。 M_6 安装在高速扫描振镜(6230H, Cambridge Technology Inc., 美国)上以实现太赫兹波频率的快速调谐, 在小角度变化时的响应时间为 600 μ s。本实验的装置中, M_1 到 A 点、

A 点到 M_2 、 M_2 到 M_3 、 M_3 到 M_4 、 M_1 到 M_4 的距离分别为 39、72、31、84、148 mm。非线性晶体是摩尔分数为 1% 的氧化镁掺杂的近化学计量比铈酸锂晶体, 晶体采用等腰梯形切割, 切割尺寸在 x 、 y 和 z 方向上分别为 40、20、10 mm。等腰梯形的底角为 65° , 抽运光和斯托克斯光的偏振方向都沿 z 轴方向。该等腰梯形结构的晶体既能实现太赫兹波近垂直晶体表面出射, 减少太赫兹波由于晶体吸收和非涅耳反射带来的损耗, 同时还保证抽运光和斯托克斯光在晶体表面实现全反射, 抽运光和斯托克斯光的偏振方向都沿着晶体的 z 轴方向。太赫兹波能量由高莱盒探测器(GC-1P, TYDEX, 俄罗斯)测量, 其在 10 Hz 条件下, 功率转换系数为 86.95 kW/W。在高莱探测器前使用厚度为 0.50 mm 的黑色聚乙烯片作为太赫兹波低通滤波器来避免泄漏的抽运光或斯托克斯光对探测器的干扰。斯托克斯光波长由光谱分析仪(86142B, Agilent, 美国)测量。

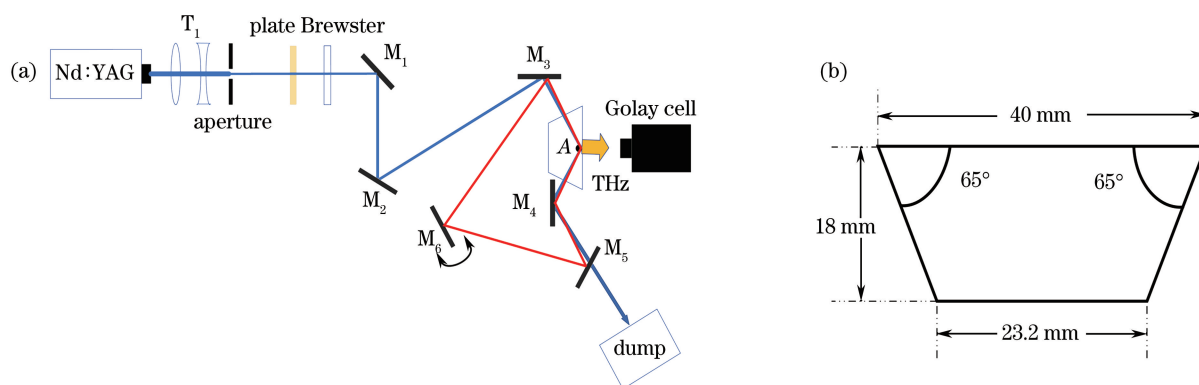


图 2 实验装置的结构示意图。(a) 环形腔太赫兹参量振荡源(蓝、红色线分别代表抽运光和斯托克斯光);(b) 晶体剖面图
Fig. 2 Structural diagram of experimental setup. (a) Ring-cavity THz parametric oscillator in which blue and red lines indicating pump wave and Stokes wave; (b) crystal profile

3 实验结果与分析

图 3 所示为在近化学计量比的铈酸锂晶体中所产生的太赫兹波与斯托克斯光随调谐角度变化的关系。当调谐电压从 -900 mV 增加到 600 mV 时, 斯托克斯光频率在 1068.27~1079.01 nm 范围内连续变化, 对应的太赫兹波频率在 0.99~3.84 THz 范围内调谐变化。与传统同成分铈酸锂晶体相比, 近化学计量比的铈酸锂晶体中太赫兹波段吸收系数更小, 有利于频率大于 3 THz 的太赫兹波出射, 因此基于近化学计量比铈酸锂晶体的环形腔太赫兹参量振荡源可以实现更宽范围的快速调谐。通过提高抽运能量可获得更高的太赫兹波频率, 但为了避免对晶体的损坏, 本实验没有尝试更高能量的入射抽运光。

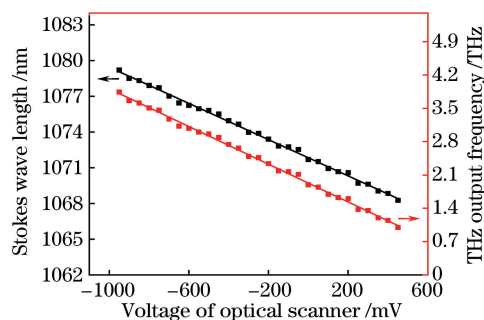


图 3 当抽运能量为 150.30 mJ 时, 所产生的太赫兹波输出频率和斯托克斯光随调谐角度变化
Fig. 3 THz wave output frequency and Stokes wave length versus tuning angle at pump energy of 150.30 mJ

图 4 所示为当抽运能量为 150.30 mJ 时, 太赫兹波输出能量随频率的变化关系。当太赫兹频率为

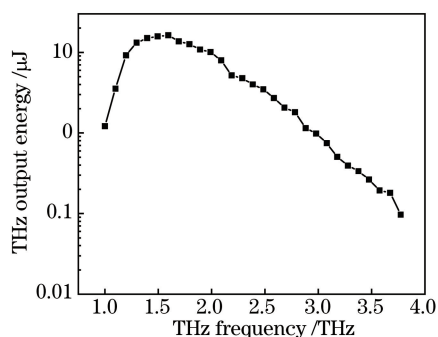


图 4 当抽运能量为 150.30 mJ 时,太赫兹波输出能量随频率的变化

Fig. 4 THz wave output energy versus frequency at pump energy of 150.30 mJ

1.59 THz 时,太赫兹波输出的能量达到最大值,为 16.28 μJ ,对应的能量转换效率为 1.08×10^{-4} ;当太赫兹频率为 3.50 THz 时,太赫兹输出的能量达到最小值,为 0.09 μJ 。当太赫兹频率大于 1.70 THz 时,太赫兹波的输出能量开始降低,这主要是由晶体对太赫兹波吸收系数增大造成。此外,随着太赫兹频率的增大,抽运光和斯托克斯光之间的相位匹配角度变大,这会导致两者之间的非线性作用模体积变小,从而使得产生的太赫兹波能量降低。

对基于近化学计量比的铈酸锂晶体的两种太赫兹波参量振荡腔型进行对比。图 5 中实线代表的是基于线形驻波腔的太赫兹波参量振荡源,其中包含腔镜 M_9 、 M_4 和 M_{10} , M_9 和 M_{10} 都是入射角为 0° 的特殊镀膜镜片,在 1063.00~1064.70 nm 波长范围内其透射率大于 98%,在 1067.00~1070.00 nm 波长范围内其反射率大于 70%,在 1070.00 ~

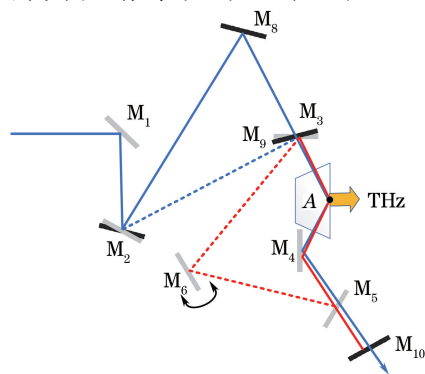


图 5 传统线形腔太赫兹波参量振荡源(实线)与环形腔参量振荡源(虚线)的腔型对比

Fig. 5 Comparison of cavity type between conventional linear-cavity THz parametric oscillator (solid line) and ring cavity THz parametric oscillator (dashed line)

1078.00 nm 波长范围内其反射率大于 90%。该结构的斯托克斯光单次往返光程等于上述环形腔(行波腔)中的单次光程。图 6 所示为当太赫兹频率为 1.50 THz 时两种腔输出的太赫兹波能量随抽运能量的变化关系。可以看到:环形腔在高抽运能量的情况下能够产生更大的太赫兹波输出能量,当抽运能量 150.30 mJ 时,环形腔输出的太赫兹波能量约为驻波腔的 2.35 倍;在抽运能量较低的情况下,传统线形驻波腔太赫兹参量振荡源具有更低的阈值,这主要是因为环形腔具有更多的腔镜,产生更大的腔损,从而具有较高的阈值。

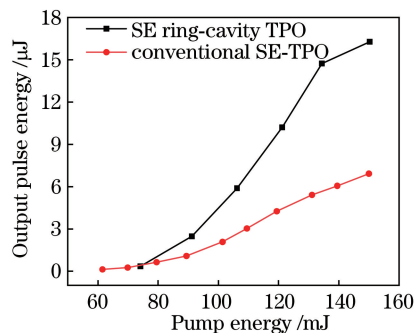


图 6 当太赫兹频率为 1.50 THz 时,线形腔与环形腔参量振荡源产生的太赫兹波随着抽运能量的变化关系

Fig. 6 THz wave output energy versus pump energy for linear-cavity and ring-cavity parametric oscillators at THz frequency of 1.50 THz

4 结 论

对基于 SLN 晶体的环形腔太赫兹参量振荡源进行了研究。实验结果表明,该太赫兹参量振荡源能够实现更宽范围和更高能量的太赫兹波输出。通过控制一个振镜旋转,实现了太赫兹波频率从 0.99~3.84 THz 的快速调谐输出。当太赫兹频率为 1.59 THz 时,太赫兹波输出能量达到最大值,为 16.28 μJ ,对应的能量转换效率为 1.08×10^{-4} 。这种高功率、高速可调谐的太赫兹参量振荡源对太赫兹波在实际测量分析领域的应用具有重要的推动作用。

参 考 文 献

- [1] Zhang X B, Shi W. THz electromagnetic radiation based on the stimulated Raman scattering of polariton [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 1012-1016. 张显斌, 施卫. 基于耦合场量子受激拉曼散射的太赫兹波辐射[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 1012-1016.
- [2] Li Y, Zhang X Y, Cong Z H, et al. Injection-seeded

- terahertz parametric oscillator based on ring-cavity configuration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1014001.
- 李圆, 张行愚, 丛振华, 等. 基于环形腔结构的种子注入式太赫兹参量振荡器[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1014001.
- [3] Wang W T, Cong Z H, Chen X H, *et al.* Terahertz parametric oscillator based on KTiOPO₄ crystal[J]. Optics Letters, 2014, 39(13): 3706-3709.
- [4] Yan C, Wang Y Y, Xu D G, *et al.* Green laser induced terahertz tuning range expanding in KTiOPO₄ terahertz parametric oscillator[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(1): 011107.
- [5] Ortega T A, Pask H M, Spence D J, *et al.* Stimulated polariton scattering in an intracavity RbTiOPO₄ crystal generating frequency-tunable THz output[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10254-10264.
- [6] Wang W T, Cong Z H, Liu Z J, *et al.* THz-wave generation via stimulated polariton scattering in KTiOAsO₄ crystal[J]. Optics Express, 2014, 22(14): 17092-17098.
- [7] 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.
- [8] Shikata J, Sato M, Taniuchi T, *et al.* Enhancement of terahertz-wave output from LiNbO₃ optical parametric oscillators by cryogenic cooling[J]. Optics Letters, 1999, 24(4): 202-204.
- [9] Ikari T, Zhang X B, Minamide H, *et al.* THz-wave parametric oscillator with a surface-emitted configuration[J]. Optics Express, 2006, 14(4): 1604-1610.
- [10] Kawase K, Sato M, Taniuchi T, *et al.* Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO₃ with monolithic grating coupler [J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(18): 2483.
- [11] Lee K S, Ko D K, Takekawa S, *et al.* Characterization of *in-situ* terahertz detection by optical interaction in a periodically poled stoichiometric lithium tantalate nonlinear crystal[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014, 35(10): 833-839.
- [12] Minamide H, Ikari T, Ito H. Frequency-agile terahertz-wave parametric oscillator in a ring-cavity configuration[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(12): 123104.
- [13] Yang Z, Wang Y Y, Xu D G, *et al.* High-energy terahertz wave parametric oscillator with a surface-emitted ring-cavity configuration[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2262-2265.
- [14] Loewen E G, Popov E. Diffraction gratings and applications [M]. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 1997.