

用短谐振腔结构优化 THz 电磁波参量 振荡器的输出特性*

张显斌[†] 施 卫

(西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

(2005 年 7 月 19 日收到 2006 年 3 月 27 日收到修改稿)

以 MgO:LiNbO₃ 为非线性光学介质, 通过采用一种高性能腔反射镜实现了一种 85mm 短腔长的法布里-珀罗式的光学参量振荡器, 产生 THz 电磁波实验结果. 这种短腔长 THz 参量振荡器比传统的 160mm 腔长的振荡阈值降低了 22.3%, 峰值能量提高了 170%, 频率调谐范围从 0.5—2.4THz 提高到 0.8—3.1THz. 还报道了一种基于平面金属丝网的法布里-珀罗干涉仪测量 THz 波线宽的实验结果.

关键词: THz 电磁波, OPO, 非线性光学, LiNbO₃

PACC: 4265, 5235, 4270

1. 引 言

近几年来, THz 电子学的研究发展迅速^[1-7], 也越发引起人们的广泛关注. 在整个电磁波频段, THz 波一般是指频率从 0.1THz 到 10THz, 也即波段位于微波频段和光频段之间的亚毫米电磁波. THz 电子学的主要研究内容包括: THz 波源器件, THz 波探测器和 THz 波的应用. THz 源器件大体上可分为宽带 THz 源和频率可调谐的 THz 波源, 且以宽带 THz 源的研究和讨论更为广泛和深入. 例如, 利用飞秒脉冲激光照射非线性光学晶体, 或者利用飞秒脉冲激光触发直流偏压下的超快光电导开关^[8-10], 都可以产生脉冲宽度在亚 ps 量级的超短电磁脉冲, 其频谱宽度可以从数十 MHz 延伸到数十 THz. 这种建立在超短电磁脉冲技术上的宽带 THz 源, 可应用于 THz 时域光谱(TDS)研究和 THz 成像实验. 除宽带 THz 源外, 另一类频率可调谐的 THz 波源, 同样引起了广泛关注. 这类 THz 源可应用于包括高精度 THz 频谱, THz 多谱成像等众多科学研究和实际应用领域. 目前能够实现频率可调谐的 THz 波源主要有^[11, 12] (1) 远红外自由电子激光器(FIR-FEL)可以产生 kW 量级, 0.89—4.76THz 之间可调谐的 THz 波 (2) P-Ge 激光

器可以产生 1W 左右, 0.9—4.0THz 之间可调谐 THz 波 (3) 回波振荡器(BWO). 远红外自由电子激光器和 P-Ge 激光器体积庞大, 造价昂贵, 操作复杂, 而且后者需要在液氮冷却的超低温下工作, 因此, 这两种可调谐 THz 源只是在世界少数几个高端专业实验室里做纯科学研究. 而回波振荡器的输出功率低, 频率调谐范围窄, 上限频率一般不超过 1.5THz, 在使用上受到限制.

Shen, Johnson 和 Nishizawa 在上世纪中叶^[13, 14]分别提出用非线性光学晶体产生亚毫米电磁波的理论, 而日本理化学研究所(RIKEN)的 Ito 实验室, 在 1997 年首次实现了基于非线性 LiNbO₃ 光学参量振荡器结构的 THz 电磁波参量振荡器^[15]. 这种 THz 波源具有频率连续可调谐, 窄线宽(高单色性), 高空间和时间相干性、输出能量大, 且在室温下工作的特点. 但其频率调谐范围, 能量转换效率, 振荡阈值, 损伤阈值等技术指标还需要进一步优化. 本文采用一种镀有高性能短波长滤光薄膜(SWPF)的腔反射镜, 将 THz 电磁波参量振荡器的腔长, 从原来 160mm 缩短到 85mm. 测试结果表明, 与原先 160mm 腔长 THz 波源相比, 这种短腔 THz 波源的振荡阈值降低了 22.3%, 能量输出提高了 170%; 频率调谐范围从原来的 0.5—2.4THz 提高到 0.8—3.0THz. 实验还表明,

* 国家自然科学基金(批准号: 10376025)及陕西省教育厅专项基金(批准号: 03JK068)资助的课题.

[†] E-mail: wuli2@xaut.edu.cn

缩短腔长后并没有失去输出窄线宽 THz 波的特点.

2. THz 电磁波参量振荡器的原理

非线性晶体当中的参量振荡过程,是产生强相干可调谐红外辐射的重要方法,也是本文实验中产生 THz 亚毫米电磁波的基本物理机制.如图 1 原理图所示,当抽运激光束入射进入非线性光学晶体时,非线性晶体受到频率为 ω_p 的激光抽运后,即可对频率 ω_s 的信号场和频率为 ω_T 的闲频场提供增益.如果将非线性光学介质放在谐振腔内,则形成典型的参量振荡器结构形式.光学参量振荡器的谐振腔可以同时信号场和闲频场共振,形成双腔振荡器(DRO);也可以对其中一个频率的辐射场共振形成单振荡器(SRO).在参量放大的增益超过损耗时,器件将达到振荡阈值实现对信号场或闲频场的振荡,而且此时输出的信号场和闲频场具有相干特性.一旦抽运激光超过阈值,参量振荡器便有效地把抽运激光辐射场转变为连续可调谐的信号光和闲频光辐射.从物理学角度讲,参量振荡器可实现由一个抽运光子带来两个光子的过程.按照习惯约定,一般把能量较高的光波称为信号光,另一束称为闲频光.然而由于在谐振腔当中建立起来的两个不同频率的光辐射,任何一个光波都可以称为信号光或者闲频光,因此在本文产生 THz 电磁波实验中,将参量振荡器辐射的 THz 波作为信号光,而把出射的能量较高的光波,且波长与抽运光波长接近的 1065—1080nm 范围的光称为闲频光.

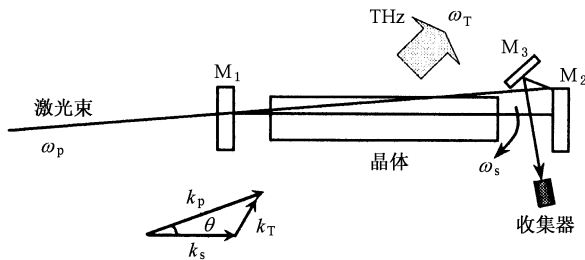


图 1 基于 LiNbO_3 材料的 THz 电磁波参量振荡器结构示意图

由参量振荡器基本原理,对于长度为 L 的非线性介质,信号波的单程增益因子 G_s 表达式为

$$G_s = (\Gamma_0 L)^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) - \delta L, \quad (1)$$

式中函数 $\text{sinc} = \sin x / x$, Δk 为相位失配大小, Γ_0 为相位匹配($\Delta k = 0$)时增益系数, δ 为非线性晶体对

信号波的损耗系数.

上式表明在相位匹配条件下,即 $\Delta k = k_p - k_s - k_T = 0$ 时,可以获得最大的参量增益和最小的谐振腔振荡阈值.利用双折射、磁光效应,介质波导和周期结构晶体(如 PPLN)可以实现共线相位匹配;而对于 LiNbO_3 晶体也可以采用角度匹配的非共线相位匹配方式,即抽运光和产生的新光束以一定的角度在晶体中传播实现相位匹配.在角度相位匹配条件下应满足

$$\omega_p = \omega_i + \omega_T, \quad (2)$$

以及

$$k_p = k_i + k_T, \quad (3)$$

其中 ω_T 和 k_T 代表信号场,也即所产生的 THz 信号的频率和波矢. ω_i 和 k_i 代表闲频光频率和波矢.而(2)式和(3)式也表明在参量转换当中必须满足能量守恒和动量守恒(相位匹配).由图 1 当中的 k_p, k_i, k_T 三个波矢构成的矢量三角形可以看到,改变抽运激光与闲频光束之间的夹角,相位匹配条件相应发生变化,而 THz 电磁波的频率同时改变,从而实现 THz 电磁波的频率调谐.光学参量振荡器理论表明,选用双谐振腔或者三谐振腔结构可以获得较低的振荡阈值,因此可以使用低功率的抽运激光器.然而双谐振腔或三谐振腔的缺点之一是限制了 THz 波的频率调谐范围,因为在谐振腔调谐过程中有超过一个以上的频率要与谐振腔的腔长频率保持一致,使得调谐范围受到限制;其次多腔结构也使得 THz 波产生器件的结构变得复杂.本文实验中采用的是由两平面高反射镜组成的法布里-珀罗单腔谐振腔结构,且仅对闲频光进行谐振.虽然单腔结构与双腔结构相比有较大的振荡阈值,但是却保留了较宽的 THz 波频率调谐范围和结构简单的重要特性.这种建立在光学参量振荡器结构基础上的 THz 波产生器件,可以实现产生高功率、窄线宽、可调谐的相干 THz 亚毫米电磁波.

3. 短腔长 THz 电磁波参量振荡器的实现及输出特性

THz 电磁波参量振荡器工作时,只允许闲频光在谐振腔中建立谐振,而要求抽运激光从 M_2 透射出谐振腔.否则,如果形成抽运激光在腔内的多次来回反射甚至谐振,极容易在瞬间形成非线性晶体表面或者内部的损伤,甚至碎裂.因此在谐振腔内

部还需要放置一平面反射镜 M_3 将抽运激光束和闲频光束分开,并将抽运光束引出谐振腔,以避免晶体的光学损伤.由于抽运激光束和闲频光束夹角很小 (1.4° 左右),因此在光路上要将二者分开就必须加长谐振腔长度,谐振腔的腔长.此外在结构上也要求增加腔长给 M_3 反射镜的放置和调整留下足够的几何空间.然而,由非线性光学理论知道,在晶体长度不变的情况下,缩短参量振荡器腔长,可以提高增益因子,降低振荡阈值.振荡阈值的降低意味着 (1) 提高了由抽运光产生 THz 波的效率 (2) 在 THz 波能量输出不变的前提下,提高 THz 波源的使用寿命 (3) 可以使用体积小、功率低的激光器作为抽运激光源,减小整个系统体积.此外,缩短腔长可以增加抽运激光束入射晶体的角度改变范围,扩大了 THz 波的频率调谐范围.

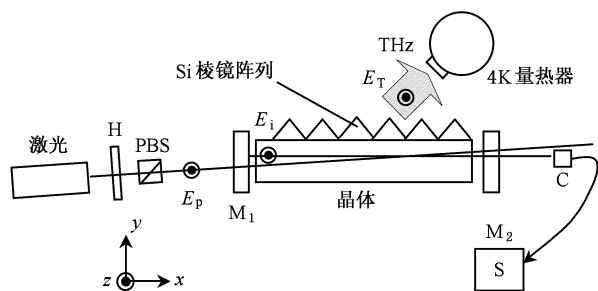


图2 短腔长 THz 波参量振荡器结构及实验示意图

图2为实验结构示意图.非线性光学介质使用 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体 ($65\text{mm} \times 12\text{mm} \times 12\text{mm}$),其中 MgO 的掺杂浓度为 5.0% mol,以减小由于光折变效应带来的输出功率降低;抽运激光器为 LOTIS TII LS-2136 型 Nd:YAG Q-Switch 脉冲激光器,输出波长为 1064nm ,其典型输出能量为 140mJ ,脉冲宽度 16ns ,重复频率 50Hz .抽运激光束经半波片 H、极化分束片 PBS 后成为能量输出可调的偏振光,然后进入谐振腔中.精确调整谐振腔反射镜确保闲频光光束形成振荡,而同时输出的 THz 波方向如图2所示. THz 波由聚氯乙烯树脂一次成型的 THz 专用透镜聚焦于探测器. THz 探测器为 Infrared Laboratories·HDD-5 型低温真空量热器.工作时真空量热器的 Si 基探测部位由液氮和液氦联合冷却到 4K 的低温,而探测器将 THz 信号转换成电压信号后送入示波器显示.抽运激光、闲频光以及 THz 波的极化方向 E_p , E_i , E_T 沿 z 轴方向.图2中,形成法布里-珀罗谐振腔结构的腔反射镜 M_1 和 M_2 表面,都镀有一种短波长滤

光薄膜 (SWPF),滤光薄膜的透过率和波长关系曲线如图3所示.从该曲线可知:当抽运激光束和闲频光束同时入射反射镜时,只有闲频光束可以在 M_1 和 M_2 产生高反射,而抽运激光几乎全部透射出谐振腔.从 M_2 透射的部分闲频光经过光纤接头 C 耦合进入光纤后输入光频谱仪 S (ADVANTEST Q8381A).

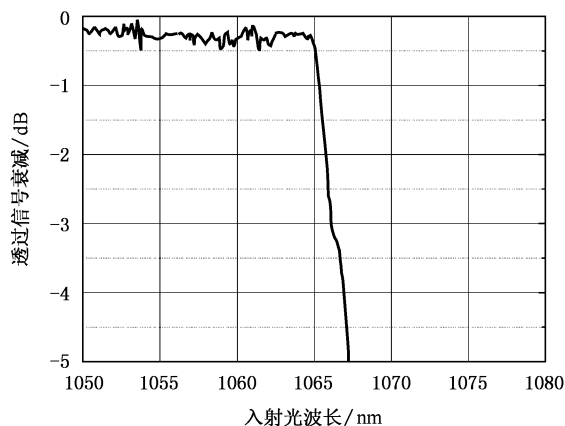


图3 镀有 SWPF 薄膜的腔反射镜对不同波长的透过率曲线

$\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体在 THz 频段的折射率很高 ($n > 5.0$),因此在晶体内部产生的 THz 波很容易在晶体和空气的界面上形成多次全反射,最终被 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体大部分吸收. Si 对 THz 波折射率为 3.4 ,因此在实验当中采用了由日本 RIKEN 研究所和 Ito 实验室^[16]最早提出的 THz 波耦合输出方式:将 Si 棱镜阵列紧靠于 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体发射面(如图2),棱镜的角度设计成 (90° 40° 50°)以确保 THz 波几乎垂直从 Si 棱镜发射面出射,消除了 THz 波在晶体界面处的全反射.测试表明在采用 Si 耦合棱镜阵列后的输出功率,比没有采用 Si 耦合输出之前提高 6 倍以上.

图4为 160mm 和镀有 SWPF 膜的 85mm 短腔长的 THz 参量振荡器的输入、输出特性曲线比较.可以看出 85mm 短腔长 THz 参量振荡器的振荡阈值(每脉冲,下同)为 18.5mJ ,而原先 160mm 腔长的振荡阈值为 23.8mJ ,表明缩短腔长后振荡阈值降低了 22.3% . THz 波参量振荡器振荡阈值降的低意味着可以在激光能量不变的情况下,提高输出的 THz 波的能量和功率.图5为在抽运激光同为 28.0mJ 时, 160mm 和 85mm 两种不同腔长的 THz 波参量振荡器输出的 THz 波信号能量随调谐频率的变化曲线.图5的对比实验表明 (1) 160mm 腔长下的 THz 波峰值能量输出为 51pJ ,对应的频率为 1.08THz ,而

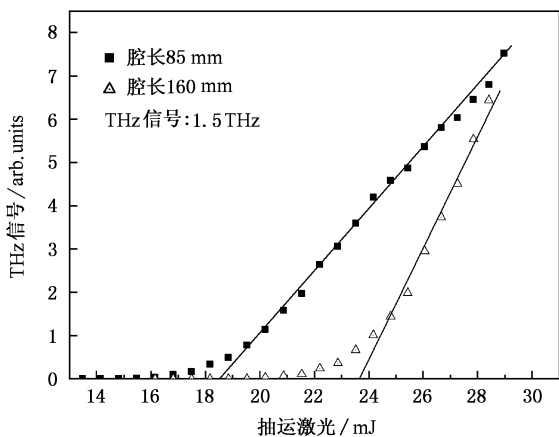


图4 两种不同腔长的 THz 波参量振荡器振荡阈值比较
160mm 腔长阈值为 23.8mJ, 算短到 85mm 后, 阈值为 18.5mJ (均指每脉冲能量)

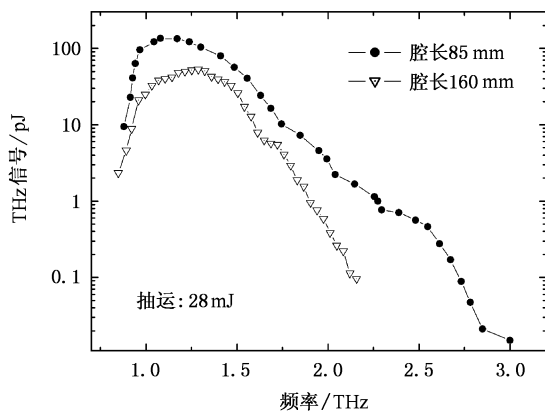


图5 两种不同腔长的 THz 波参量振荡器, THz 信号输出随频率调谐变化曲线

85mm 腔长下峰值能量为 138pJ, 对应频率为 1.28THz. THz 的输出能量提高接近 170% (2)160mm 腔长的 THz 波频率调谐范围为 0.5—2.4THz, 而 85mm 腔长的频率调谐范围扩宽为 0.8—3.0THz, 即通过缩短腔长使 THz 波的频率调协范围增大了约 1.16 倍.

为了测试输出的 THz 波窄线宽特性, 可以使用由两片高平整度的细金属丝网形成的 THz 波法布里-珀罗干涉测量仪, 直接测量 THz 波的波长和线宽. 实验时调整 THz 波方向, 使其从干涉仪一端垂直进入, 然后从另一端垂直输出. 金属丝网对于 THz 波相当于高反射镜, 因此 THz 波在这两片相互平行的金属丝网形成的谐振腔当中形成振荡. 该 THz 波法布里-珀罗干涉仪的自由光谱区为 750MHz, 精细度为 10.0. 干涉仪的腔长可由 Labview 程序和

控制单元精确调整. 实验当中测量从干涉仪输出的 THz 波的强度随干涉仪腔长变化曲线如图 6 所示, 可知在输出频率为 2.2THz 下的 THz 波线宽为 109GHz. 而 160mm 腔长下的线宽典型值也在 100GHz 左右, 因此可以判定缩短腔长后没有明显的增加 THz 波的线宽, THz 波的输出仍然具有比较好的单色特性.

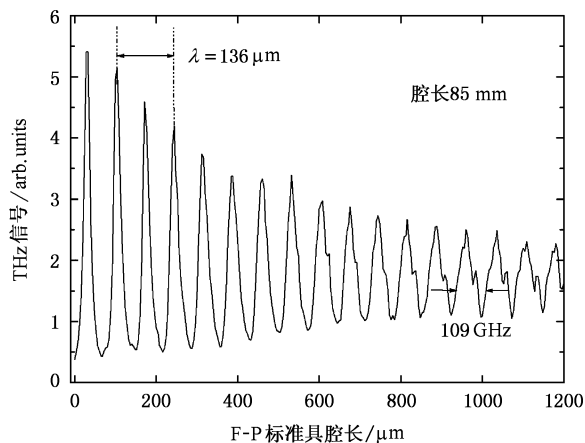


图6 利用 F-P 标准具测量 THz 信号的波长和线宽 参量振荡器腔长为 85mm, THz 信号频率 2.2THz

4. 结 论

以非线性光学晶体 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 为介质, 采用光学参量振荡器结构, 通过引入一种镀短波长滤光薄膜 (SWPF) 的高性能腔反射镜, 将 THz 电磁波参量振荡器的腔长, 从原来 160mm 缩短到 85mm. 测试结果表明, 与原先 160mm 腔长 THz 波源相比, 这种短腔 THz 波源的振荡阈值降低了 22.3%, 能量输出提高了 170%, 频率调谐范围从原来的 0.5—2.4THz 提高到 0.8—3.0THz. 通过法布里-珀罗干涉仪, 直接测量这种短腔长的 THz 波源可以输出线宽在 109GHz (2.2THz 下) 的 THz 电磁波, 具有良好的单色特性. 今后通过对这种具有低振荡阈值、高能量输出、宽频率调谐范围特性的短腔长 THz 波参量振荡源作进一步的优化, 有可能实现一种能广泛应用于物质的高精细 THz 频谱检测, THz 多谱成像等众多研究领域中的优良可调谐 THz 波源.

感谢日本理化学研究所 Ito 实验室, 以及日本东北大学电气通信研究所 C. Takyu, T. Shoji 先生在晶体加工中的对测试工作的支持. 同时感谢西安理工大学余宁梅教授对研究工作提供的帮助.

- [1] Suto K ,Nishizawa J 2004 *Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics* PLTU.2
- [2] Wang S ,Zhang X-C 2004 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **37** R1-R36
- [3] Hu Y ,Zhang C L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1772 [胡颖、张存林 2004 物理学报 **53** 1772]
- [4] Yang Y P ,Shi Y L ,Yan W *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4079 [杨玉平、施宇蕾、严伟等 2005 物理学报 **54** 4079]
- [5] He L R ,Gu C M ,Shen W Z *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4938 [贺莉蓉、顾春明、沈文忠等 2005 物理学报 **54** 4938]
- [6] Zhang T Y ,Cao J C 2004 *Chin. Phys.* **13** 1742
- [7] Lu K Q ,Zhao W *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 2077
- [8] Liu K ,Xu J Z ,Zhang X C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 863
- [9] Han P Y ,Huang X G ,Zhang X C 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2864
- [10] Shi W ,Zhang X B 2004 *Chin. J. of Semiconductors* **25** 1672 (in English) [施卫、张显斌 2004 半导体学报 **25** 1672]
- [11] Ikari T ,Zhang X B ,Minamide H ,Ito H 2004 *The Physics annual conference of Japan in north east area* 10Aa4 62
- [12] Bolotin V P ,Kayran D A 2004 *Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics* PLM.1
- [13] Shen Y R 1977 *Nonlinear Infrared Generation* (Berlin , Heidelberg , New York :Springer-Verlag) p7
- [14] Nishizawa J ,Suto K 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 2429
- [15] Kodo K ,Takaaki H ,Hidenori T 2000 *Optics Letters* **25** 1714
- [16] Kodo K ,Manabu S ,Tetsuo T 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 2483

Optimize the output performance by shortening the cavity length of the THz electromagnetic wave parametric oscillator

Zhang Xian-Bin[†] Shi Wei

(Department of Applied Physics , Xi 'an University of Technology , Xi 'an 710048 , China)

(Received 19 July 2005 ; revised manuscript received 27 March 2006)

Abstract

We realized a 85mm short cavity Fabry-Perot optical parametric oscillator by using high performance reflection mirror , and the experimental results of the THz wave output with this 85mm short cavity parametric oscillator based on the MgO :LiNbO₃ Crystal are reported. Compared with the conventional 160mm parametric oscillator , the threshold decreases by 22.3% , the peak energy output of THz wave increases by 170% , the frequency tuning range increases from 0.5—2.4THz to 0.8—3.0THz. The THz wave linewidth was measured by using a Fabry-Perot interferometer based on the metal mesh plate.

Keywords : THz electromagnetic wave , OPO , nonlinear optics , LiNbO₃

PACC : 4265 , 5235 , 4270

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10376025) and the Department of Education of Shaanxi Province , China (Grant No. 03JK068).

[†] E-mail : wuli2@xaut.edu.cn