

刻划微棱锥抗反射层的 GaP 太赫兹波发射器*

刘丰 胡晓堃 栗岩锋[†] 邢岐荣 胡明列 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 超快激光研究室, 太赫兹波研究中心, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2011年4月14日收到; 2011年5月9日收到修改稿)

报道了利用出射面加工有微棱锥结构抗反射层的 GaP 晶体 THz 发射器产生超快 THz 脉冲. 基于微结构界面等效折射率渐变原理, 设计并利用超精密微加工技术在 GaP 块状 THz 发射器出射面加工了亚波长微棱锥结构层, 用以提高所产生的 THz 波的耦合输出. 实验验证了该微结构层能提高所产生的 THz 波的耦合输出效率, 并能够有效散射剩余抽运光, 提高系统运转的稳定性.

关键词: 超快 THz 波, 微纳加工, 微棱锥, 抗反射层

PACS: 07.57.Hm, 42.79.Wc, 87.85.Va

1 引言

超快太赫兹 (THz) 波在成像、无损探伤、安检、医疗、物化分析等生产科研领域有很好的应用前景^[1-3], 许多有机大分子、尤其是生物材料, 其分子转动、振动能级多位于 THz 波段, 利用 THz 波技术可以快速得到其在这个频段丰富的信息, 且信噪比远高于传统的红外傅里叶变换光谱仪^[4], 是人们研究物理化学过程的新工具, 已经形成了 THz 波谱学^[5-8], 另外基于宽带 THz 波优良的穿透特性和相干特性, 使其成为新一代理想的非接触成像波源^[9].

光整流方法是产生宽带 THz 波的一种重要方法, 利用飞秒激光脉冲在非线性晶体中的光学整流效应, 获得亚皮秒量级的 THz 脉冲, 是 THz 时域频谱技术 (THz-TDS) 的理想辐射源. THz 波从实验室走向应用的一个瓶颈为现有 THz 波源发射功率有限, 转换效率太低. 为了提高 THz 辐射功率, 已经开展了许多卓有成效的研究, 例如使用大口径的发射器与扩束后的强抽运光斑匹配^[10], 使用高功率窄脉宽的飞秒激光抽运源^[11], 运用准相位匹配方法延长晶体中的作用距离^[12], 这些方法都有效提高了 THz 波的输出功率. 但是我们也注意到在这些实验结构中, 所产生的 THz 波的耦合输出

及透射抽运光的处理仍存在一定的问题: 用于发射器的非线性晶体在 THz 波段的折射率普遍都很高, 例如 GaP 晶体和 LN 晶体, 其折射率分别为 3.3 和 5.2^[13], 因而 THz 波在其出射端面的菲涅耳反射损耗高达 28.6% 和 45.9%, 如此高比例的 THz 波能量被反射回晶体内部, 不但发射功率受到限制, 且多次反射的 THz 波会在时间上形成子峰, 进而造成频域上的干涉, 影响 THz 波的频谱应用; 另外晶体透射的抽运光依旧具有很高的能量, 传统钛宝石振荡器抽运源由于本身光功率较低, 泄露的抽运光可以使用无特征吸收的 PE 材料或半导体材料滤除^[14], 但是在高功率 THz 系统中, 过强的剩余抽运光下会将 PE 材料烧毁, 半导体材料也会受到光激发作用产生大量载流子, 对 THz 波产生很强的吸收. 本文报道一种发射面具有微棱锥结构的 GaP 块状晶体发射器, 其微棱锥层能有效将 THz 波耦合输出, 并使剩余抽运光在出射面被散射, 大大降低剩余抽运光对 THz 波应用的诸多不便.

2 基于折射率渐变的微棱锥输出端面

GaP 晶体具有有效非线性系数大、THz 波段吸收小的特点^[15], 被广泛用于 1 μm 波段的超快

* 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (批准号: 2007CB310408, 2010CB327604 和 2011CB808101), 国家自然科学基金 (批准号: 61077083, 61027013, 60838004 和 61078028), 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 200800560026), 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目 (批准号: 2007B34), 高等学校学科创新引智计划 (批准号: B07014) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCE1-07-0597) 资助的课题.

[†] E-mail: yanfengli@tju.edu.cn

激光脉冲光整流产生 THz 波. 但是由于 GaP 晶体在 THz 波段的折射率高, 故所产生的 THz 波在普通块状发射器的晶体 - 空气界面上菲涅耳反射率很高, THz 不能够有效耦合输出. 为了降低反射, 人们类比光学波段的基于 1/4 波长膜系的抗反射镀膜技术, 很自然联想到在有关器件的表面生成增透膜 [16], 但是这种固定厚度和折射率的增透膜仅适用于窄带 THz 波源, 而不适用于 TDS 所需的宽带 THz 系统, 并且数十微米量级的介质薄膜的制备非常困难, 性质也非常不稳定.

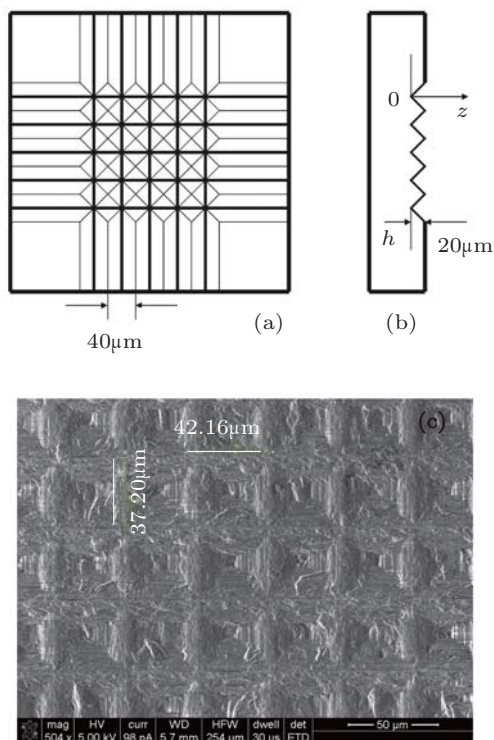


图 1 微棱锥结构图 (四棱锥单元高度 20 μm , 底边宽度 40 μm) (a) 俯视结构图; (b) 侧视结构图; (c) 实物 SEM 照片

有研究表明, 利用亚波长尺度的一维或者二维突起微结构构成的折射率渐变层, 能降低 THz 波的反射率 [17-19]. 这种结构实际是构成一个有效折射率渐变的耦合层. 现在较为常用的为微棱锥型渐变折射率层, 其某一层等效折射率为

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{pn_s^2 + (1-p)n_b^2}, \quad (1)$$

其中 n_s 为基片材料的折射率, n_b 为周围环境的折射率, 对于空气中的器件, 取 $n_b = 1$, p 为每一层基底材料的面积占用率. 对于棱锥型微结构层, 假设微结构层的厚度为 h , 在纵向某个位置 z , 该层等效折射率表示为

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{1 + (n_s^2 - 1) \times (1 - z/h)^2}, \quad (2)$$

可以看到, 较折射率突变的块状晶体, 具有微结构渐变折射率层的器件每一个薄层与前后薄层间的

折射率差非常小, 相当于在基片材料和环境之间增加了一个耦合层, 故而总体的菲涅耳反射率降低, 实现了耦合增透的目的 [20]. 我们将这个原理应用在 THz 发射晶体上, 在发射器的出射面上设计微棱锥耦合层以利于所产生的 THz 波高透射率地输出, 微棱锥结构如图 1(a),(b) 所示.

微机械加工 (micro-fabrication) [21,22] 是一种高精度加工技术, 相较传统加工方法具有加工精细度高、加工结构灵活多样、加工稳定性好等优点, 与激光微加工和离子束刻蚀等方法相比具有成本较低, 能够加工较大尺度元件且加工速度快等优点, 故而我们用来加工 THz 频段的亚波长尺度微结构增透层. 在超精密加工车床上 (反馈精度 34 nm), 选用单点金刚石尖刀飞刀技术 (fly-cutting), 单条刻线一次成型, 形成底边 40 μm \times 40 μm , 高度 20 μm 的金字塔形四棱锥微结构, 实际加工结果在扫描电子显微镜 (SEM) 下观察如图 1(c) 所示.

3 实验

首先将该发射器作为无源器件置于 8-f 型 THz-TDS 系统 (详细实验装置结构见参考文献 [6]) 的 THz 波束束腰 (直径约 1 mm) 处, 并测量其对 THz 波的透射信号, 以及同一块晶体上无微结构位置处的 THz 波透射信号, 其对应的透射谱相比较地示于图 2, 显示出可以观察到的增透效果, 且制备的器件没有明显的特征峰 (频谱中 1.6 THz 处的吸收峰为自由空间传输路径的水汽吸收).

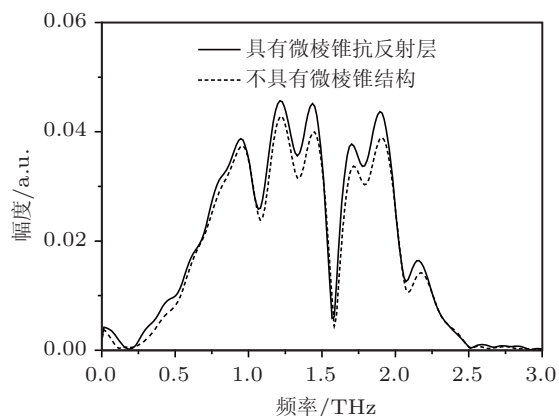


图 2 有无抗反射层的 GaP 发射器的透射谱比较

然后将该器件作为 THz-TDS 的发射器, 对其所产生的 THz 波的透射特性进行测量. 实验中使用的抽运源为实验室自制的大模场面积光子晶体光纤飞秒激光放大系统 [23,24], 具有整体效率高、结构紧凑、散热特性优良、输出平均功率高等优

势. 实验中抽运源工作参数为: 输出光脉冲中心波长 1040 nm, 重复频率 52 MHz, 脉冲宽度 61 fs, 平均功率 2.5 W. 聚焦的抽运光斑直径约 300 μm , 覆盖约 45 个微棱锥单元, 故而平滑了由于加工原因造成的单元之间不均匀性. 得到测量结果如图 3 所示.

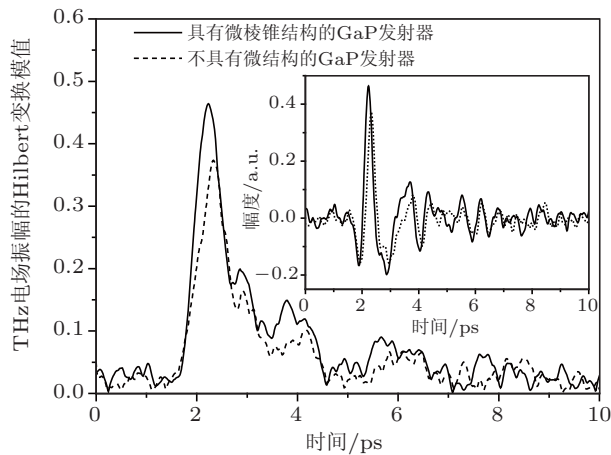


图 3 使用带有微结构抗反射层和不具有微结构的普通发射器产生的 THz 时域信号及其 Hilbert 变换模值的比较

从实验曲线可以看到两点: 首先, 相干探测得到的 THz 电场振幅峰峰值得到提高, 说明该结构具有增透效果, 假设由折射率数值计算得到的单面透射率为 71%, 使用 THz 时域电场的 Hilbert 变换模值测算^[25]得, 具有微棱锥抗反射层的输出面透射率提高到约 88%; 其次, 具有增透层的发射器产生的 THz 脉冲在时间上较无结构发射器有一个提前量, 约为 93 fs, 其原因为增透层部分有效折射率低于纯 GaP 晶体, 经计算获得 20 μm 的增透层等效折射率约为 1.9.

实验中观察到, 在普通块状发射器后, 透射的抽运光和与光整流同时产生的 520 nm 的二次谐波^[26](SHG) 均准直传输, 需要使用耐强光的滤波器或多层滤波器^[14]滤除以防干扰 THz 波探测, 这样大大衰减了到达接收端的 THz 信号强度; 而使用了带有 THz 增透层的发射器后, 由于微棱锥结构的表面对抽运光为不规则散射面, 剩余抽运光和倍频光皆被散射. 透射抽运光经一面离轴抛物面镜 (Melles Griot POA 013, $\Phi 44.5$ mm) 反射后投射在屏上使用 CCD 相机观察效果如图 4 所示, (a) 中抽运光束由没有微结构的晶体透射后保持准直, (b) 中散射抽运光被离轴抛物面镜准直为一个与抛物面镜等口径的均匀光斑 (CCD 相机观察

方向与屏有夹角, 故光斑呈现椭圆形), 同时正交的周期微结构使得抽运光在两个方向上衍射作用明显. 使用 367 mW 抽运光入射带有微结构的发射器, 在散射光斑中使用有效测量口径 $\Phi 19$ mm 的功率计探头 (COHERENT PowerMax PM10) 测量中心部位光功率为 28 mW, 通过无微结构晶体测量结果为 174 mW, 结果接近探测器面积与准直光束面积的比例关系, 可以认为经过微结构出射面, 抽运光被均匀散射. 此时选用普通的 PE 或单层半导体材料滤波器就可以有效将这两个光频段的噪声滤除, 保证系统稳定运转.

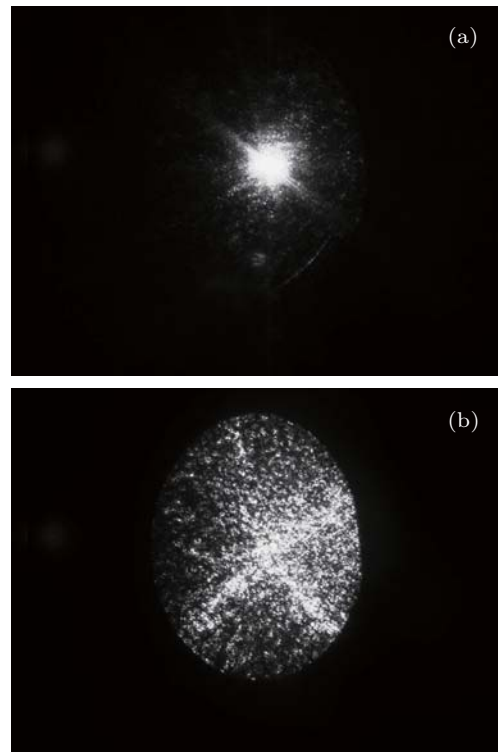


图 4 (a) 透过无微结构发射器的抽运光斑; (b) 透过微结构输出面的抽运光散射图像

4 结论

使用微机械加工技术, 在 GaP 发射器表面刻划出数十微米量级的四棱锥型折射率渐变的 THz 波输出耦合层, 使得产生的 THz 波能够更加有效地耦合输出; 同时透射的抽运光和倍频光均被微结构层有效散射. 这种带有微结构抗反射层的太赫兹发射器将在提高宽带太赫兹源功率和效率方面具有重要的应用.

- [1] Tonouchi M 2007 *Nature Photon.* **1** 97
- [2] Hebling J, Yeh K L, Hoffmann M C, Nelson K A 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 345
- [3] Lang L Y, Xing Q R, Li S X, Mao F L, Chai L, Wang Q Y 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 677
- [4] Han P Y, Tani M, Usami M, Kono S, Kersting R, Zhang X C 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 2357
- [5] Ralph S E, Perkowitz S, Katzenellenbogen N, Grischkowsky D 1994 *J. Opt. Soc. Am. B* **11** 2528
- [6] Wang C, Gong J, Xing Q, Li Y, Liu F, Zhao X, Chai L, Wang C, Zheltikov A M 2010 *J. Biophot.* **3** 641
- [7] Chen H, Wang L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2785
- [8] Yang Y P, Feng S, Feng H, Pan X C, Wang Y Q, Wang W Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027802 (in Chinese) [杨玉平, 冯帅, 冯辉, 潘学聪, 王文全, 王文忠 2011 物理学报 **60** 027802]
- [9] He Y T, Jiang W S, Zhang Y D, Fan G L 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 162
- [10] Blanchard F, Razzari L, Bandulet H C, Sharma G, Morandotti R, Kieffer J C, Ozaki T, Reid M, Tiedje H F, Haugen H K, Hegmann F A 2007 *Opt. Express* **15** 13212
- [11] Liu F, Song Y J, Xing Q R, Hu M L, Li Y F, Wang C L, Chai L, Zhang W L, Zheltikov A M, Wang C Y 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 814
- [12] Walsh D A, Browne P G, Dunn M H, Rae C F 2010 *Opt. Express* **18** 13951
- [13] Vodopyanov K L 2008 *Laser & Photon. Rev.* **2** 11
- [14] Naftaly M, Dudley R 2009 *Opt. Lett.* **34** 674
- [15] Fülöp J A, Pálfalvi L, Almási G, Hebling J 2010 *Opt. Express* **18** 12311
- [16] Gatesman A J, Waldman J, Ji M, Musante C, Yngvesson S 2000 *IEEE Microw. Guided W.* **10** 264
- [17] Chen Y W, Han P Y, Zhang X C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 041106
- [18] Kuroo S, Oyama S, Shiraiishi K, Sasho H, Fukushima K 2010 *Appl. Opt.* **49** 2806
- [19] Zhou C L, Li X D, Wang W J, Zhao L, Li H L, Diao H W, Cao X N 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 038201 (in Chinese) [周春兰, 励旭东, 王文静, 赵雷, 李海玲, 刁宏伟, 曹晓宁 2011 物理学报 **60** 038201]
- [20] Brückner C, Pradarutti B, Stenzel O, Steinkopf R, Riehemann S, Notni G, Tünnermann A 2007 *Opt. Express* **15** 779
- [21] Fang F Z, Xiong Z, Hu X T 2006 *J. Micromech. Microeng.* **16** 214
- [22] Wang Y B, Wang C L, Xing Q R, Liu F, Li Y F, Chai L, Wang Q Y, Fang F Z, Zhang X D 2009 *Appl. Opt.* **48** 1998
- [23] Zhang X, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang C Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1863 (in Chinese) [张鑫, 胡明列, 宋有建, 柴路, 王清月 2010 物理学报 **59** 1863]
- [24] Zhang Y Y, Zhang C, Hu M L, Wang S J, Song Y J, Chai L, Wang C Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014212
- [25] Hoffmann M C, Turchinovich 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 151110
- [26] Liu F, Li Y F, Xing Q R, Wang C L, Hu M L, Chai L, Wang C Y 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** S10201

GaP terahertz emitter with micro-pyramid anti-reflection layer*

Liu Feng Hu Xiao-Kun Li Yan-Feng[†] Xing Qi-Rong Hu Ming-Lie
Chai Lu Wang Ching-Yue

(Ultrafast Laser Laboratory, Center for Terahertz Waves, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 14 April 2011; revised manuscript received 9 May 2011)

Abstract

We present the generation of terahertz pulses from a bulk GaP emitter fabricated with a micro-pyramid anti-reflection output coupling layer. The anti-reflection layer is designed by the graded effective refractive index principle. The micro-pyramid structure is manufactured by micro fabrication technique. The experimental results demonstrate that the micro structure layer can not only increase the output coupling efficiency but also scatter the transmitted pump power.

Keywords: ultrafast terahertz wave, micro fabrication, micro-pyramid, anti-reflection layer

PACS: 07.57.Hm, 42.79.Wc, 87.85.Va

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2007CB310408, 2010CB327604 and 2011CB808101), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077083, 61027013, 60838004 and 61078028), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 200800560026), FANEDD (Grant No. 2007B34), 111 Project (Grant No. B07014), and NCET (Grant No. NCET-07-0597).

[†] E-mail: yanfengli@tju.edu.cn