

液晶闪耀光栅波前相位测量方法

郑春艳¹ 杨若夫^{1*} 徐林¹ 孔令讲² 敖明武¹ 杨平³ 黄子强¹ 吴健¹

¹电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054
²电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 610054
³中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 电控液晶光栅在卫星激光通信、激光雷达的光束指向应用中具有体积小、光束灵活可控的优势。而获取电控液晶光栅对光波前的相位调制分布则是评价液晶光栅性能的关键。提出液晶光栅调制波前相位的共轭移相干涉测量技术,通过实验对比验证了实测远场分布与近场相位计算远场分布的一致性,由此可实现由近场相位测量的光束指向控制新方法。

关键词 测量;波前相位;共轭移相干涉仪;液晶光栅

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1008004

Wave-Front Measurement Approach of Liquid-Crystal Blazed Gratings

Zheng Chunyan¹ Yang Ruofu¹ Xu Lin¹ Kong Lingjiang² Ao Mingwu¹
Yang Ping³ Huang Ziqiang¹ Wu Jian¹

¹Opto-Electric Information School, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

²College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

³Key Laboratory for Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract Electronically controlled liquid-crystal gratings have advantages such as small volume and agile optical beam steering in satellite laser communication and laser radar. However, the key issue for performance evaluation of liquid-crystal gratings is to obtain the modulated beam wavefront by it. Conjugation phase shifting interferometry measuring liquid-crystal gratings wavefront is presented. In the experiment, the measured far-field intensity is in accordance with the theoretic analysis on near-field wavefront. This technology shows a new beam steering control method with near-field wavefront measurement.

Key words measurement; wavefront; conjugation phase shifting interferometry; liquid-crystal gratings

OCIS codes 230.3720; 070.5040; 100.5070

1 引言

卫星激光通信、激光雷达等应用需要光束对一定空域进行准确的动态指向,而其光束指向的精度、速度以及控制能力是衡量这些系统性能优劣的一个

重要指标。光学相控阵技术为解决激光雷达、卫星激光通信发展瓶颈展现了良好的前景。光学相控阵技术核心是通过调节出射光波前局部相位分布,使其在特定方向上彼此同相产生相长干涉,干涉结果

收稿日期: 2011-05-23; 收到修改稿日期: 2011-06-11

基金项目: 国家“十一五”预研项目(H04010201)资助课题。

作者简介: 郑春艳(1975—),女,博士研究生,主要从事液晶光栅测试方面的研究。E-mail: zcygz2010@yahoo.cn

导师简介: 吴健(1942—),男,教授,主要从事大气激光传输理论以及激光雷达等方面的研究。

E-mail: jwu@uestc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yang_ruofu@163.com

是在所需方向上产生一束高强度的光束,从而实现
对激光束的无机械灵活偏转控制。液晶光栅相控阵
技术是利用液晶作为移相器,它利用液晶材料的相
移随加载电压变化的特性,通过控制液晶移相器阵
列的电极电压分布,实现液晶移相器阵列出射光束
的波前分布和光束偏转。液晶光栅实际上类似于周
期可调的闪耀光栅,由于液晶材料的特殊性,只需提
供较小的控制电压(通常为几伏)就可实现对光束偏
转角的灵活控制,并且液晶移相器体积小、重量轻,
从而展现出更为广泛的研究前景与应用价值^[1]。

早在 1991 年, Raytheon 公司就研制成功 43000
阵列的 $4.3\text{ cm} \times 4.1\text{ cm}$ 一维液晶相位光栅,并在
1996 年^[1]发表了综述性的文章介绍液晶光学相控
阵相关技术以及在激光雷达、空间光通信中的应
用前景,由此引发了国内外学者极大的研究兴趣。目
前,国内外针对液晶光栅作为光束指向器分别从理
论分析^[2~4]、液晶光栅研制^[5]、特性测试以及应
用^[6~8]等展开了一系列广泛而又深入的研究与探
讨。1996 年, Raytheon 公司 Friedman 等^[9]提出了
针对液晶光栅相位测试方法,他们基于 Phase-
imaging 技术利用移相干涉仪获得了透射式液晶光
栅出口端波前相位,即利用成像系统实现液晶后表
面与电荷耦合器件(CCD)感光面共轭,并与入射参
考光干涉,进而提取波前信息(但并未说明成像系统
的具体结构)。获取液晶出射端波前相位具有如下
优点: 1) 根据测量的近场相位分布可以准确计算衍
射效率; 2) 利用近场相位可通过频谱变换计算光束
指向角; 3) 卫星激光通信中, 卫星运动过程中其相
对位置是实时变化的, 因此光束偏转角度也需实时修
正, 而修正角度的高精度计算则可由测量液晶出射
端相位来获得; 4) 液晶光栅制造过程中的静态相位
分布以及上电后相位分布测量可获知每个成品液晶
光栅的性能指标, 并量化其具体性能参数, 为改进工
艺提供有益帮助。目前, 国内对液晶波前相位测量
的研究鲜有报道。2009 年, 郑春艳等^[10]提出采用径
向剪切干涉仪方案测量液晶波前相位, 此方法只能
测量某一衍射角上的相位分布, 通过对相位分布进
行波长周期折叠来近似获取液晶调制相位, 它并不
能准确评估液晶出射端真实波前相位, 并且对不同的
衍射角还需进行光路调整, 实验复杂, 速度慢。

本文在前人工作的基础上, 针对液晶光栅相位
测量的特殊性, 提出了基于 $4f$ 系统的共轭相位方
式, 探索利用马赫-曾德尔移相干涉仪测量液晶光栅
相位, 从理论及实验上验证其可行性。

2 液晶光栅相位测量原理

液晶光栅波前相位是衡量液晶偏转系统性能的一个
重要指标, 它决定了光束的指向角、衍射效率等
重要参数^[9]。因此, 液晶光栅波前相位分布的获取
在液晶光束指向性能评价中具有非常重要的作用。

2.1 $4f$ 系统波前共轭原理

对于普通像差的测量通常可以直接采用技术上
成熟的商用干涉仪、Shack-Hartmann 或者曲率传感
器等来测量^[11~13]。但是对于液晶光栅的相位测量,
具有一定的特殊性, 主要问题在于光束透过液晶光
栅后产生各级明显衍射, 除衍射方向不变的 0 级之
外, 还有 ± 1 级、 ± 2 级以及更高级次光束, 每一个衍
射光束的角度均不同, 为测量整个液晶光栅的相位
分布情况, 就有必要获知更多级次的衍射光束相位
分布情况。因此, 需利用一种光学组件将光束各级
衍射光再次会聚起来。为此, 提出采用共轭移相干
涉仪的液晶光栅波前测量方法, 利用 $4f$ 系统, 将液
晶出射端的波前相位在它的共轭位置上波前再现,
并与参考光干涉, 利用传统移相干涉测量方法来测
量液晶出射端准确的相位分布。相位共轭原理如
图 1 所示。

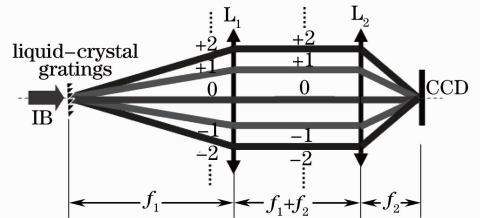


图 1 液晶光栅相位共轭原理

Fig. 1 Phase conjugation principle of
liquid-crystal gratings

图 1 中, 入射光束 (IB) 经液晶光栅衍射后产生
 $\pm 1, \pm 2, 0$ 等各个级次的衍射光束, 液晶光栅置于
 $4f$ 系统前透镜 L_1 的前焦面, CCD 置于 $4f$ 系统后
透镜 L_2 的后焦面。采用光路共轭结构, 可以使液晶
出口端出射的各个方向的衍射光束最终都能在
CCD 面上会聚, 采用这种结构可尽可能地会聚各个
衍射级次的光束到 CCD 靶面上。对于一个理想的
液晶相位闪耀光栅, 它与普通透射式闪耀光栅没有
本质区别, 普通透射式闪耀光栅每一个锯齿面是连
续的, 而液晶光栅则是用多个不同相移量的液晶微
移相器来逼近连续锯齿面。由于相位台阶效应、电
压相移误差、电场边缘效应等因素会造成液晶光栅
相位与等效理想闪耀光栅相位的偏差, 从而引起衍
射效率的下降, 由此在其他衍射级次上光强不可忽

略。采用上述相位共轭方法可将液晶出射端的波前相位在 CCD 感光面上再次还原出来,从而可利用各种相位测量手段对液晶出射端波前相位进行测量。

2.2 基于 $4f$ 系统共轭移相干涉仪的在线标定以及液晶波前测量原理

移相干涉仪在大口径镜面检测、光束波前诊断中取得了极大的成功,它结构简单、测量准确、分辨率高,国内外均已研制了成熟的商用测量仪器。但是若单独采用普通的移相干涉仪是不能准确测量液晶光栅的波前分布的。根据 2.1 节 $4f$ 系统的相位共轭原理,提出了基于 $4f$ 系统的马赫-曾德尔共轭移相干涉仪测量方法,光路原理如图 2 所示。

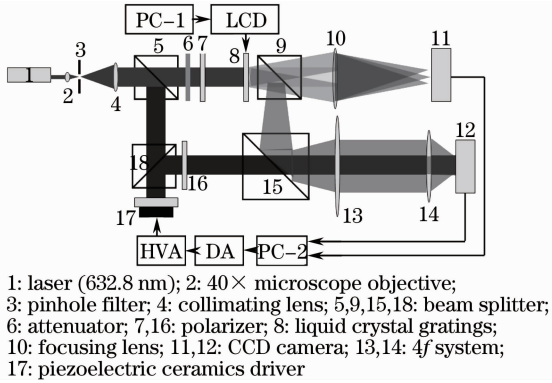


图 2 基于马赫-曾德尔共轭移相干涉仪的液晶光栅相位测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of phase measurement based on Mach-Zehnder conjugation phase-shifting interferometer

图 2 中,波长 632.8 nm 的激光器 1 经过 2,3,4 空间滤波扩束准直后通过分束器 5 分成两路,一路为参考光,另一路为测量光,测量光经衰减器 6 衰减到与参考光光强相当的强度(提高干涉条纹对比度)。测量光再经偏振片 7 后将光束偏振方向调整到与液晶光栅分子长轴指向一致,由液晶光栅闪耀各级衍射光束经分束镜 9 分束,一路由分束镜 15 以及 $4f$ 系统 13,14 传输最终在 CCD 上会聚,这里 $4f$ 系统保证液晶出射端与 CCD 光敏面端物像共轭,测量光束另一路经分束镜 9 透射后由聚焦透镜 10 聚焦在 CCD(11)上进行远场指向角测量。准直光经分束镜 5 分束后的另一路由分束镜 18 以及压电陶瓷反射镜 17 反射以及分束镜 15 透射后再经 $4f$ 系统在 CCD(12)上与测量光会合,从而在 CCD 上获得其参考光与测量光的干涉条纹,偏振片 16 保证测量光与参考光偏振方向一致。

由于采用 $4f$ 共轭系统实现液晶出射端与 CCD 感光面共轭。因此在 $4f$ 系统口径内的从液晶出射端的各级衍射光束均能最终会聚到 CCD 光敏面上,

从而保证探测的液晶光栅出射端光波前相位信息的完整与再现性。

移相干涉仪电压相移的准确标定是波前相位测量的关键,移相标定的方法在许多文献中已有相关报道。考虑到在系统运行过程中,由于干涉仪移相器特性变化引起电压相移参数的改变,本文提出了在线标定方法,也即在系统光路搭建好之后,无需进行任何修改,通过程序来标定。

采用的标定方法是以最小步长的电压递增连续加载到移相器上,对每一次不同的移相电压采集一干涉图像,并对干涉图像进行处理,从而标定出电压与相移的关系曲线。图 2 中,采用 USB 接口数模转换(DA)卡输入低电压给压电陶瓷驱动器的高压放大器(HVA),驱动压电陶瓷产生相应的纳米级位移而改变参考光与信号光的相移。为电压步进准确起见,直接输入源码给 DA 卡,DA 输出范围为 $0\sim 5\text{ V}$,分辨率为 12 bit,因此最小的电压步进约为 1.22 mV 。在连续在线标定中,对采集到的二维条纹取几行或者几列相加得到一维光强分布,并进行均值去噪以平滑光强。根据干涉条纹特性,采用正弦拟合算法对一维光强进行拟合来获取其不用相移电压下的正弦拟合参数(角频率、幅值、相位)^[14]。根据其相对相位变化利用线性插值即可获得在 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 相位变化下对应的标定相移电压源码值,如图 3 所示。

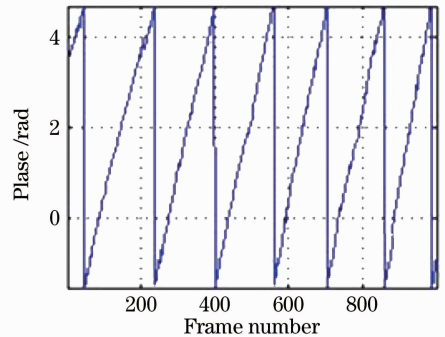


图 3 图像帧序号与正弦拟合相位关系

Fig. 3 Sinusoidal fitting phase with different frame number

测试系统采用 12 位 DA 卡,最大电压为 5 V ,电压步进为 2,因此从图 3 就可以直接得到其相移为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的电压数码值分别为 0,104,186,280,对应的电压为 $(0,104,186,280)\times 5000/2^{12}\text{ mV}$ 。

建立起电压相移标定关系后,为提高测量精度,采用 5 步相移法采集其相应的 5 次光强分布,在 5 步相移法中,相移分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$,由此可

获得 5 帧光强图像 $I_i(x, y) (i=1, 2, 3, 4, 5)$, 则计算得到其波前相位分布为

$$\phi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{2[I_2(x, y) - I_4(x, y)]}{2I_3(x, y) - I_5(x, y) - I_1(x, y)} \right\}, \quad (1)$$

得到的相位分布为 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, 经过简单的像限判断, 可将相位分布扩展到 $[-\pi, \pi]$, 于是可以得到其液晶相位在 $[-\pi, \pi]$ 之间的分布。如果不加电的液晶相位为 0 相位, 可将液晶调制相位扩展到区间 $[0, 2\pi]$ 。由于液晶光栅对波前相移不超过 2π , 因此可以不用再对相位解缠绕。

3 实验结果

基于上述测量原理, 搭建了实验测量平台, 利用马赫-曾德尔移相共轭干涉波前测量方法测量了本课题组研制的某向列液晶相位光栅, 测量光路如图 2 所示, 并采用 2.2 节标定方法对移相器进行了在线标定。入射激光波长为 632.8 nm, 光栅孔径为 9.6 mm × 9.6 mm。实验系统相移是通过计算机控制 DA 输出低电压来驱动 HVA 产生压电陶瓷工作的高电压, 进而驱动压电陶瓷纵向移动使参考光相对于测量光产生所要求的准确相移。PC-1 计算机、液晶驱动器(LCD)驱动液晶光栅产生周期性折射率

改变, 利用共轭移相干涉原理来测量不同液晶光栅电压下的相位分布。

首先测量了不加电压下液晶光栅的静态相位分布, 采用 5 步相移法测量。测量结果如图 4 所示。

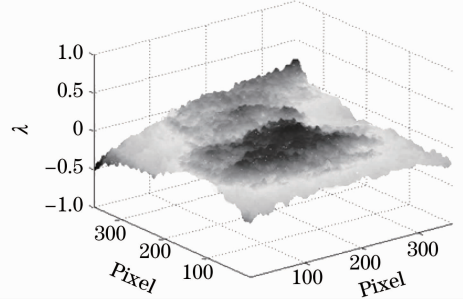


图 4 初始 0 电压下液晶光栅的静态波前
Fig. 4 Static wavefront of liquid-crystal gratings under zero initial voltage

由此得到静态液晶光栅波前起伏峰谷值(PV)为 0.83λ , 均方根(RMS)值为 0.11λ , ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)。然后通过给液晶光栅栅指电极施加周期电压, 从而生成各种周期的液晶相位光栅, 利用上述共轭移相干涉技术对液晶出射端波前相位进行测量, 并利用图 2 中远场 CCD 相机(11)采集其远场光强分布, 得到不同周期下的光栅相位分布和远场光强分布如图 5 所示(由于液晶微移相器最大相移为 1 个波长, 因此无需进行去包裹处理)。

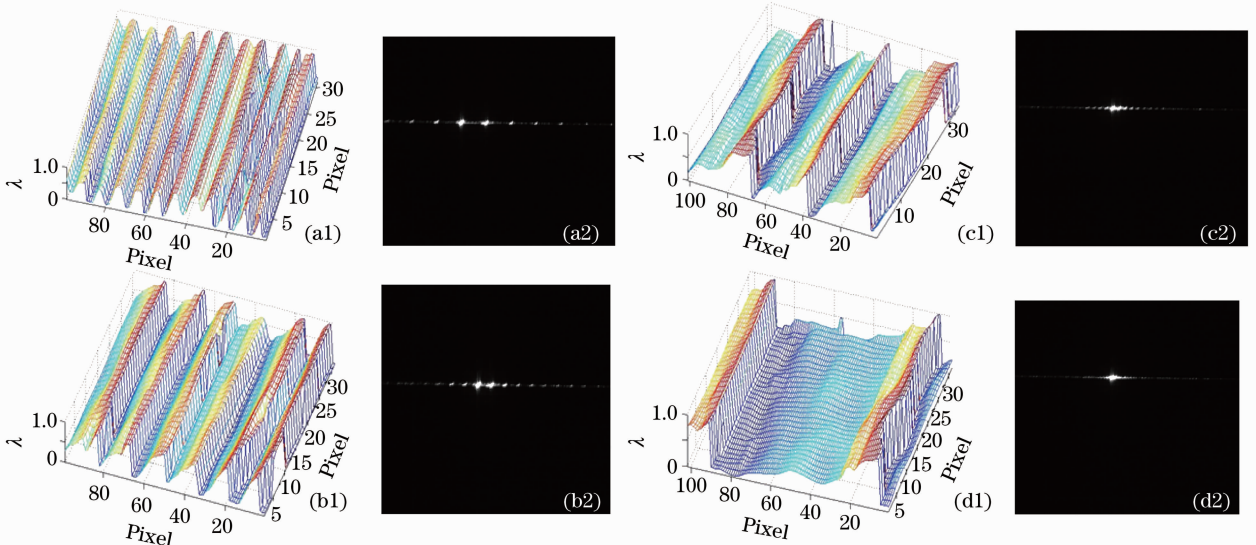


图 5 不同光栅周期下近场相位与实测远场光强分布。(a1)~(d1)分别是光栅周期为 32、64、128、256 下的近场相位;
(a2)~(d2)是与(a1)~(d1)相对应的实测远场光强分布

Fig. 5 Near-field phase and far-field intensity distribution with different grating periods. (a1)~(d1) are the near-field phase with grating periods of 32, 64, 128 and 256; (a2)~(d2) are the far-field intensity corresponding to (a1)~(d1)

液晶光栅主要通过其周期性折射率改变从而将光束在一级方向上相干叠加实现合成最大光强, 而

通过改变其光栅周期, 使一级衍射角度变化, 从而达到光束的非惯性指向控制, 通过图 5 验证了这一点,

不同的光栅周期折射率使入射光束经衍射后在远场的一级闪耀光与0级产生不同的衍射角。

为验证其近场测量准确性,对近场测量得到的相位计算其远场光强分布,得到远场光斑如图6所示。

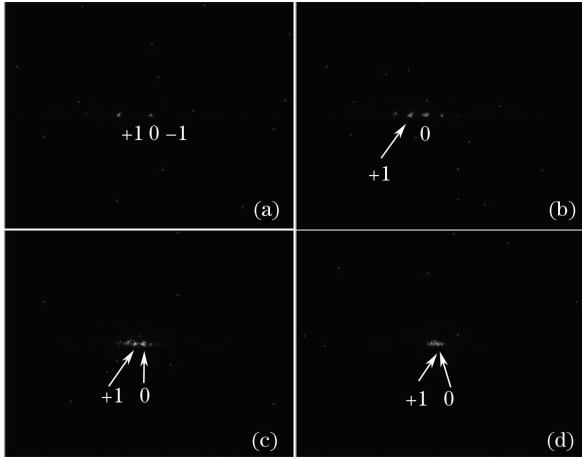


图6 不同光栅周期下实测光栅相位计算出的远场光强分布。(a)~(d)表示光栅周期分别为32、64、128、256

Fig. 6 Far-field intensity distribution calculated by the near-field phase distribution, the grating periods of (a)~(d) are 32, 64, 128, 256, respectively

比较图5与图6中的远场光强分布,发现其+1级闪耀光斑与0级光斑的距离在不同光栅周期下是一致的,因此该结果证明了测量的可行性与有效性。实验对 $4f$ 系统的成像质量以及共轭距有较为严格的要求,因此在设计之初对液晶后表面以及CCD与 $4f$ 系统的距离进行了定位安装约束,从而保证了共轭精度要求。通过实验计算发现,实际上液晶光栅的衍射效率并不高,从光栅相位图分析可以基本确定,衍射效率下降的主要原因在于液晶相位分布与理想闪耀相位有一定偏差,而液晶的初始像差对衍射效率的影响则比较小。因此通过本文的相位测量方法可对某指向角下计算其液晶相位分布,通过优化电压的方法使测量的液晶相位逼近理想相位从而实现光束指向的可控并同时提高衍射效率。

4 结 论

提出基于 $4f$ 系统相位共轭移相干涉技术对液晶折射率相位分布的测试原理以及方法,通过由近场相位分布计算远场与实测远场分布的一致性验证了其相位测量可行、准确。通过实验发现,这种测量方法简单、快速并且可靠。但是由实验发现,由于 $4f$ 共轭系统视场有限,因此从液晶出射端衍射的光束只有前几级能通过共轭系统,当液晶光栅周期减

小引起衍射角增加时,较高阶的光束将偏离 $4f$ 系统,故波前相位测量具有一定误差。但对于液晶光栅来说,在 ± 2 级之外的光束的衍射强度已经非常微弱,可忽略由高阶衍射引起的波前偏差。因此实际上只需设计合适的共轭系统使视场大于 ± 2 级衍射角即可得到较为准确的液晶出射端的波前再现。

在本文工作的基础上,下一步将开展液晶电压的优化控制研究,即利用液晶出口端的实测相位逼近理想光栅相位从而实现光束指向的可控并同时提高衍射效率。

参 考 文 献

- 1 F. M. Paul, A. D. Terry, L. C. David *et al.*. Optical phased array technology[J]. *IEEE*, 1996, **84**(2): 268~298
- 2 Wang Li, Lu Yaxiong, Huang Ziqiang *et al.*. Influence of marginal effect of electric field on properties of liquid crystal grating[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, **22**(1): 61~64
- 3 王 俐, 卢亚雄, 黄子强等. 电场边缘效应对液晶光栅特性的影响[J]. *液晶与显示*, 2007, **22**(1): 61~64
- 4 Gu Lanlan, Chen Xiaonan, Jing Wei. Fringing-field minimization in liquid-crystal-based high-resolution switchable gratings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(20): 201106
- 5 Zheng Zhigang, Ma Ji, Song Jing *et al.*. Theory investigation of holographic polymer dispersed liquid crystal based on acrylate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(1): 15~24
- 6 郑志刚, 马 骥, 宋 静等. 基于丙烯酸酯的全息聚合物分散液晶光栅的动力学理论研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(1): 15~24
- 7 Ma Ji, Liu Yonggang, Ruan Shengping *et al.*. Preparing polymer/liquid crystal grating by photolithography[J]. *Journal of Function Materials and Devices*, 2003, **9**(2): 309~312
- 8 马 骥, 刘永刚, 阮圣平等. 光刻法制备聚合物/液晶光栅[J]. *功能材料与器件学报*, 2003, **9**(2): 309~312
- 9 H. Michinori, N. Toshiaki. Liquid-crystal blazed grating with azimuthally distributed liquid-crystal directors[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(27): 5193~5197
- 10 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1231~1235
- 11 张翠玉, 黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1231~1235
- 12 Kong Lingjiang, Zhu Ying, Yang Jianyu *et al.*. A new method of scanning angles screening of liquid crystal phased array component[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1961~1966
- 13 孔令讲, 朱 颖, 杨建宇等. 一种新的液晶相控阵组件波控方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1961~1966
- 14 L. J. Friedman, D. S. Hobbs, S. Lieberman *et al.*. A spatially resolved phase imaging of a programmable liquid-crystal grating [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(31): 6236~6240
- 15 Zheng Chunyan, Wu Jian. Measuring the wavefront distortion of a phased-array laser radar by using a real-time optoelectronic measurement system[C]. *SPIE*, 2009, **7511**: 75111T
- 16 Jiang Wenhan. Adaptive optical technology[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, **28**(1): 7~13
- 17 姜文汉. 自适应光学技术[J]. *自然杂志*, 2006, **28**(1): 7~13
- 18 M. Daniel. *Optical Shop Testing*[M]. New York: A John Wiley & Sons Inc, 2007. 547~687
- 19 Paul M. Blanchard, David J. Fisher, Simon C. Woods *et al.*. Phase-diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6649~6655
- 20 Zhang Jianqiu, Zhao Xinmin, Hu Xiao *et al.*. Sine wave fit

2.0 μm 石墨烯被动调 Q 掺铥全光纤激光器

石墨烯(Graphene)材料作为可饱和吸收体与半导体可饱和吸收镜(SESAM)相比具有制作简单、成本低廉、恢复时间快、可饱和吸收阈值低、并能覆盖从可见光到中红外(400~2000 nm)波段的超宽带宽等优点。在 1.0~1.1 μm 掺镱和 1.5~1.6 μm 掺铒波段,基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调 Q 激光器的研究已有报道。目前,石墨烯材料作为可饱和吸收体用于 2.0 μm 波段激光器的被动锁模或被动调 Q 的研究国内外还未见任何报道。

北京工业大学高功率光纤激光课题组首次成功实现了全光纤结构石墨烯被动调 Q 的 2.0 μm 掺铥脉冲光纤激光器。整个激光器采用了环形腔结构设计,而新型功能材料石墨烯作为激光被动调 Q 器件,图 1(a)为石墨烯可饱和吸收体的拉曼光谱,其 G 峰和 2D 峰分别位于 1581 cm⁻¹和 2710 cm⁻¹处,G 峰位

置处于 1581 cm⁻¹以及 2D 峰的形状较窄表明石墨烯的层数在 4~6 层之间,饱和吸收调制深度约为 10%。当抽运功率为 1.3 W 时,开始得到稳定的重复频率为 44 kHz 的调 Q 激光脉冲输出,平均输出功率约为 2.9 mW,脉冲宽度约为 3.0 μs。随着抽运功率的增加,平均输出功率和重复频率几乎成线性增加[图 1(b)]。当抽运功率增加到 1.6 W 时,最大平均输出功率约为 5.0 mW,相应的单脉冲能量为 89 nJ,脉冲宽度为 1.4 μs,中心波长为 2007 nm[图 1(c)]。为了研究调 Q 激光脉冲的稳定性,我们采用频谱分析仪测量了重复频率为 51 kHz 时的信噪比[图 1(d)],其值大约为 40 dB,表明调 Q 激光脉冲很稳定。本实验结果充分证明石墨烯材料在 2.0 μm 波段具有可饱和吸收特性,为石墨烯可饱和吸收体成为很有潜力的激光被动锁模、被动调 Q 器件奠定了基础。

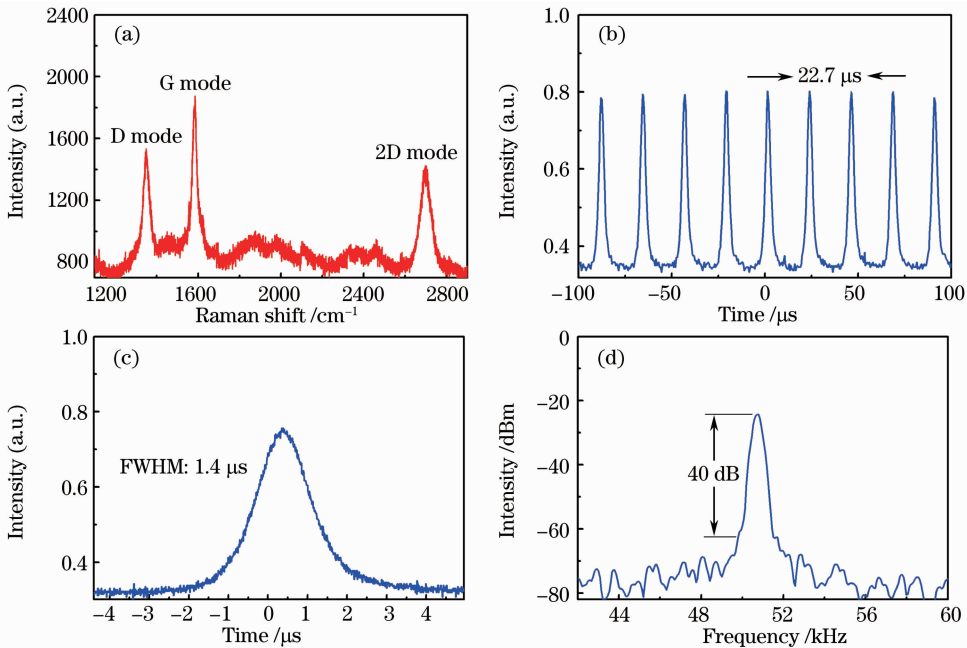


图 1 (a)石墨烯的拉曼光谱;(b)石墨烯调 Q 脉冲串;(c)石墨烯调 Q 最窄脉冲宽度;
(d)石墨烯调 Q 激光脉冲的无线电频谱

Fig. 1 (a) Raman spectrum of the graphene saturable absorber; (b) pulse train of the Q-switched graphene; (c) minimal pulse width of the Q-switched graphene; (d) radio frequency spectrum of the Q-switched graphene fiber laser

刘 江 王 璞*

(北京工业大学激光工程研究院 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

* E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

收稿日期: 2011-07-21; 收到修改稿日期: 2011-08-29