

高色散镜的设计和制备*

王胭脂¹⁾²⁾ 邵建达^{1)†} 董洪成¹⁾²⁾ 晋云霞¹⁾ 贺洪波¹⁾ 易葵¹⁾ 范正修¹⁾
 宋有建³⁾ 王思佳³⁾ 胡明列³⁾ 柴路³⁾ 王清月³⁾

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

3) (天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2010年6月4日收到; 2011年1月28日收到修改稿)

设计和制备了两种高色散镜, 分别在 780—870 nm 波长范围内提供约 -800 fs^2 群延迟色散补偿 (group-delay dispersion, GDD) 和在 1030—1050 nm 的波长范围内提供约 -2500 fs^2 的群延迟色散补偿. 设计的高色散镜用双离子束溅射方法进行制备. 从白光干涉仪的测试结果可以看出, 得到的 -800 fs^2 GDD 高色散镜和设计符合得比较好; -2500 fs^2 GDD 的高色散镜用在掺 Yb 光纤激光器中很好的抑制了脉冲展宽. 这是制备得到的国产高色散镜及在光纤激光器中应用的首次报道.

关键词: 高色散镜, 群延迟色散, 色散补偿, Yb 光纤激光器

PACS: 78.20.-e, 81.15.Cd, 81.15.-z

1. 引言

掺 Yb^{3+} 稀土元素的光纤锁模激光器^[1-3]是与固体锁模激光器同步发展起来的一种新型超短脉冲光源. 掺 Yb^{3+} 光纤工作在 $1.06 \mu\text{m}$, 具有超过 80% 的抽运光—激光转化效率, 适于开发高功率光纤激光系统. 光纤激光器具有比固体激光器更强的色散和非线性(克尔效应), 谐振器色散补偿的改变可以产生丰富的脉冲动力学过程, 并直接决定着输出脉冲的质量. 随着啁啾镜色散补偿技术的发展^[4-9], 不同带宽不同色散量的色散镜的应用日趋成熟, 满足了随着超短脉冲激光器的发展及广泛应用带来的对色散镜多样化的需求.

高色散镜^[10,11] (high dispersion mirror, HDM) 因为很高的反射率和极大的色散补偿量, 在大功率激光器中如 CPA 放大技术和光纤激光器中, 可以取代光栅和棱镜, 并且损耗低, 容易集成化, 小型化, 与用光栅对, 棱镜对等相比, 光路调节更加方便, 使激光器的设计更加灵活. 自从 2009 年高色散镜的首次报道以来, 已经受到越来越多的关注.

实验设计和制备了在 780—830 nm 的范围内提供约 -800 fs^2 的群延迟色散 (group-delay dispersion, GDD) 和大于 99.98% 的反射率, 及在波长范围 1030—1050 nm 内提供 -2500 fs^2 GDD 的色散补偿量和大于 99.99% 的反射率的两种高色散镜. 从测试和应用结果说明我们的高色散镜具有较好的色散补偿能力, 这是国产高色散镜的首次报道.

2. 高色散镜的设计

2.1. -800 fs^2 GDD 高色散镜

图 1 (a) 所示是设计的中心波长 800 nm 的高色散镜, 相应的膜层设计如图 1 设计得到的中心波长 800 nm 的 HDM, 如图 1 (b) 所示, 有 63 层, 高折射率材料选择 Ta_2O_5 ($2.06357 @ 800 \text{ nm}$), 低折射率材料选择 SiO_2 ($1.48677 @ 800 \text{ nm}$), 在 780—830 nm 的范围内提供 -800 fs^2 的 GDD, 反射率大于 99.98%.

图 2 所示分别是 780, 800 和 830 nm 的电场分布, 可以看出不同的波长在不同的穿透深度被反射

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327604, 2006CB806002) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: jidshao@mail.shcnc.ac.cn

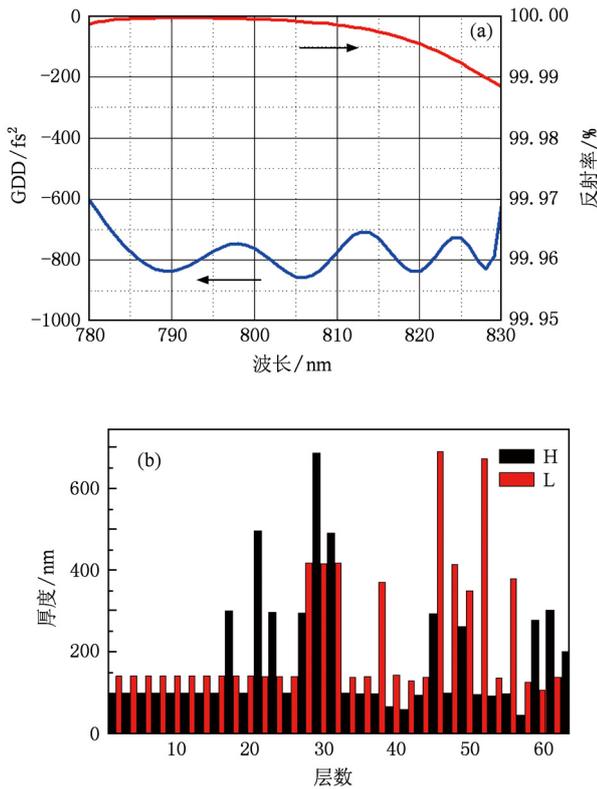


图1 设计得到的中心波长 800 nm 的 HDM (a) 反射率和 GDD; (b) 膜层结构

并且存在电场极值,这符合啁啾镜的特点. 同时设计中有很厚的类似于 Gires-Tournois interferometer (GTI) 腔的膜层,这些 GTI 腔给予波长足够的延迟以提供高的群延迟色散补偿. 此外,从图 3 设计膜层的相对敏感度可以看出,靠近空气的膜层比较敏感,这些是 GTI 镜的特征. 因此高色散镜是综合了啁啾镜和 GTI 镜的特点得到的结果.

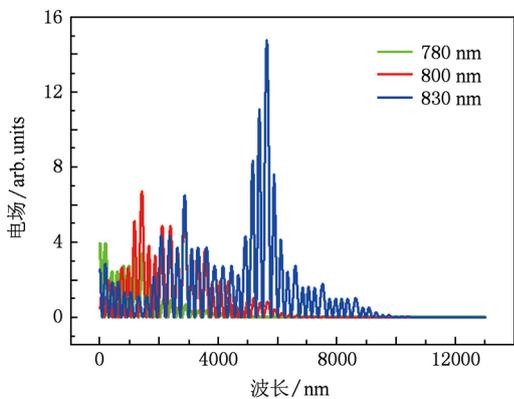


图2 不同波长的电场分布

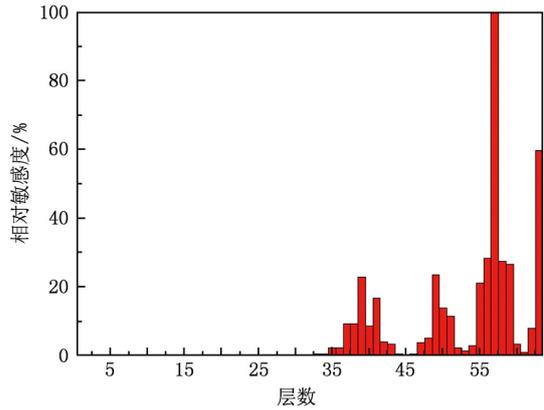


图3 膜层测相对敏感度

2.2. -2500 fs²GDD 高色散镜

图 4 (a) 所示是设计的中心波长 1040 nm、波长范围 1030—1050 nm 的高色散镜,在 20 nm 的带宽内提供 -2500 fs²GDD 的色散补偿量和大于 99.99% 的反射率. 图 4 (b) 所示是相应的膜层结构,由高折射率材料 (Ta_2O_5) 和低折射率材料 (SiO_2) 交替 55 层组成,膜系相对来说比较规整,膜层厚度在 60—360 nm 之间.

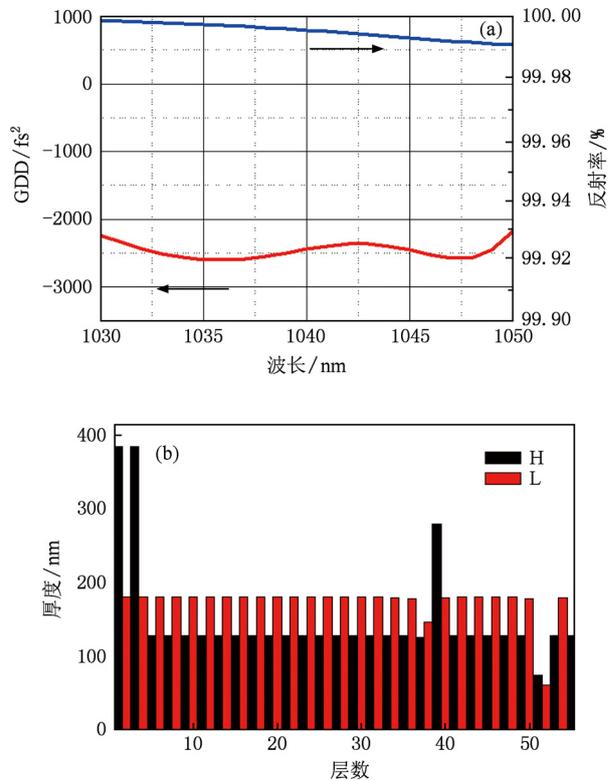


图4 设计得到的中心波长 1040 nm 的 HDM (a) 反射率和 GDD; (b) 膜层结构

3. 高色散镜的制备

我们采用双射频离子束溅射镀膜机制备啾啾镜. 离子束溅射制备的薄膜致密, 折射率高, 并且采用时间控制, 能尽可能减小折射率和膜厚误差, 提高控制精度^[12-16]. 镀膜机有两个离子源(16 cm 主源和 12 cm 的辅助源), 其中 16 cm 主源用来产生高能氩离子束溅射轰击靶材, 12 cm 离子源用来辅助沉积. 靶材 Ta 和 SiO₂ 纯度达到 99.999%, Ta₂O₅ 是溅射 Ta 靶材和 99.995% O₂ 反应生成. 本底真空 1 × 10⁻⁵ Pa, 制备过程中真空度为 1 × 10⁻² Pa, 烘烤温度 80 °C.

4. 高色散镜的测试和应用

4.1. -800 fs²GDD 高色散镜的测试

相对 1040 nm 的长波长而言, 要对波长 800 nm 提供等量的延迟, 腔的个数和膜层厚度都须比长波长增加很多. 中心波长 800 nm 的高色散镜膜层厚度达到 12 μm, 是本实验室制备的色散镜里比较厚的, 这对于设备长时间运行的稳定性和精度控制都有很高的要求.

制备得到的啾啾镜用实验室搭建的白光干涉仪进行了测试, 从干涉条纹中提取位相信息, 对位相信息求二阶导数得到的 GDD 曲线如图 5 所示, 可以看出制备得到的 GDD 曲线和设计值相趋近, 在 780—830 nm 的范围内提供大约 -800 fs² 的 GDD.

反射率测量由 Lambda 900 光谱仪完成. 设计的镜子在 780—830 nm 的范围内提供大于 99.9% 的反射率(由透射率曲线得到, 反射率 = 1 - 透射率), 如图 5 所示. 但是测量的曲线和设计之间有一定的偏移, 我们进行了反射率的反演, 图 6 中的拟合曲线是中心波长为 803 nm 时的反射率, 可以看出当中心波长为 803 nm 时, 和测量的结果符合得非常好, 这个从图 4 中 GDD 曲线上也能反应出来. 通过反演, 证明制备得到的高色散镜仅向长波方向漂移了 3 nm 左右, 制备和设计值符合得较好.

4.2. -2500 fs²GDD 高色散镜在掺 Yb 光纤激光器中的应用

石英光纤在 1 μm 波段呈现正常色散, 脉冲在光纤中的长距离传输会导致脉冲展宽, 并积累线性

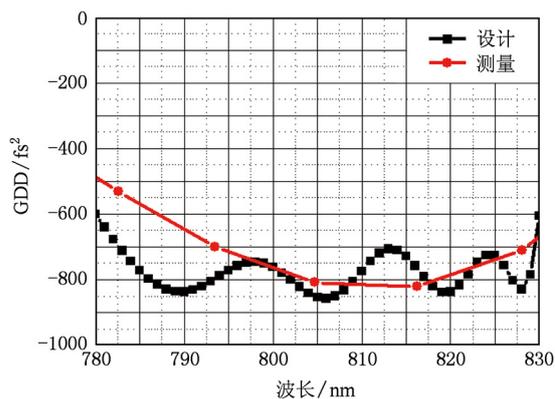


图 5 设计和测量得到的 GDD

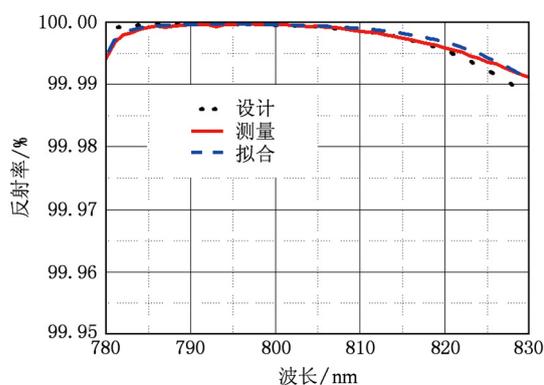


图 6 测量得到的反射率及波长漂移反演

啾啾. 这种现象在激光器的腔内净色散量接近于零色散点时, 即激光器就进入呼吸孤子锁模状态时更为明显. 因此, 只有通过腔外色散补偿, 才能得到傅里叶变换极限的脉冲宽度. 一般情况下, 利用光栅对输出脉冲进行腔外色散补偿, 但是光栅对脉冲有很强损耗, 经过色散补偿, 脉冲能量大幅降低.

图 7 是利用高色散镜对掺 Yb 大模场面积光子晶体光纤呼吸孤子锁模激光器的输出脉冲进行腔外色散补偿的示意图. 制备得到的高色散镜用做腔外补偿, 在 1030—1050 nm 的波长范围内提供约

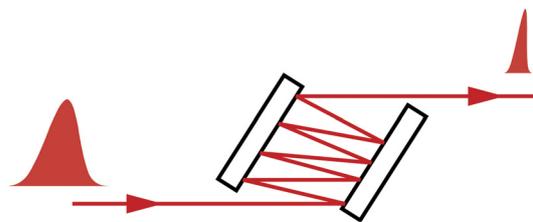


图 7 高色散镜补偿示意图

-2500 fs²GDD的色散补偿,每个镜子反射4次,两个镜子总共进行8次色散补偿,色散补偿量约为-20000 fs².补偿后的脉冲宽度如图8(a)所示,激光器的直接输出脉冲宽度为1500 fs,由图8(b)的光谱可知,其光谱的半极大全宽度为15 nm,理论上

可以支持百飞秒的脉冲宽度,说明从激光器直接输出的脉冲有强烈的正啁啾.经过高色散镜后,输出脉冲压缩为接近变换极限的150 fs,证明了制备得到的高色散镜提供了有效的反常色散量,达到很好的脉冲压缩效果.

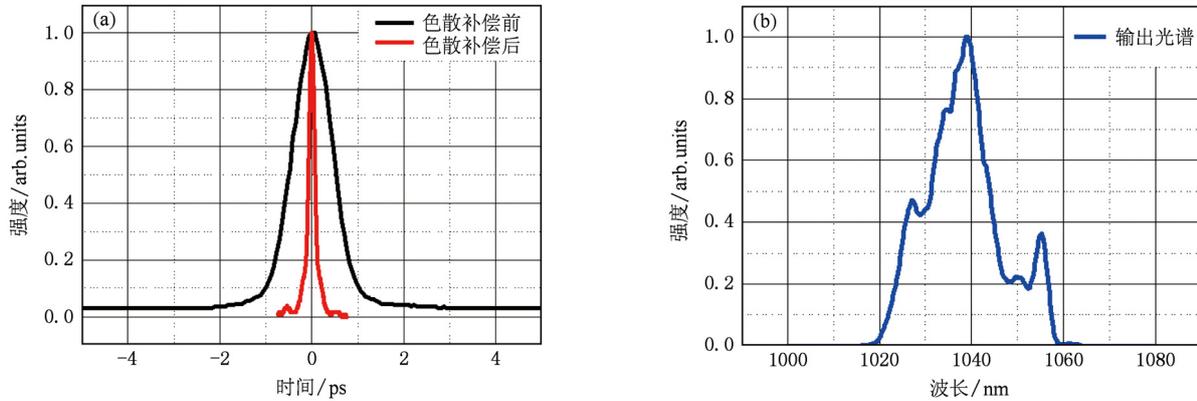


图8 (a)色散补偿前后的脉冲图;(b)输出的光谱图

5. 结 论

设计和制备了两种高色散镜,分别在780—830 nm的范围内提供-800 fs²的色散和大于99.98%的反射率,及在波长范围1030—1050 nm内

提供-2500 fs²GDD的色散补偿量和大于99.99%的反射率.测量和实际应用的结果说明制备得到的啁啾镜和设计值符合得比较好,其中-2500 fs²的高色散镜很好的补偿了Yb光纤激光器中的色散,脉冲由1.5 ps压缩到150 fs,这是国内制备得到的高色散镜及在光纤激光器中应用的首次报道.

- [1] Song Y J 2009 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [宋有建 2009 博士学位论文(天津:天津大学)]
- [2] Zhang X, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1863 (in Chinese) [张鑫、胡明列、宋有健、柴路、王清月 2010 物理学报 **59** 1863]
- [3] Song Y J, Hu M L, Xie C, Chai L, Wang Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7097 (in Chinese) [宋有健、胡明列、谢辰、柴路、王清月 2010 物理学报 **59** 7097]
- [4] Szpöcs R, Köházi-Kis A 1997 *Appl. Phys. B* **65** 115
- [5] Szpöcs R, Ferencz K, Spielmann C, Krausz F 1994 *Opt. Lett.* **19** 201
- [6] Zavelani-Rossi M, Cerullo G, De Silvestri S 2001 *Opt. Lett.* **26** 1155
- [7] Steinmeyer G 2006 *Appl. Opt.* **45** 1484
- [8] Szpöcs R, Köházi-Kis A, Lakó S 2000 *Appl. Phys. B* **70** [Suppl.] S51
- [9] Pervak V, Tikhonravov A V, Trubetskov M K 2007 *Appl. Phys. B* **87** 5
- [10] Pervak V, Teisset C, Sugita A, Naumov S, Krausz F, Apolonski A 2008 *Opt. Exp.* **16** 10220
- [11] Péter D, Péter R, Miklós L, Volodymyr P, Ferenc K 2009 *Opt. Exp.* **17** 20598
- [12] Wang Y Z, Zhang W L, Fan Z X, Huang J B, Jin Y X, Yao J K, Shao J D 2008 *Chin. J. Lasers* **35** 760 (in Chinese) [王胭脂、张伟丽、范正修、黄建兵、晋云霞、姚建可、邵建达 2008 中国激光 **35** 760]
- [13] Wang Y Z, Shao J D, Jin Y X, Huang J B, He H B, Fan Z X 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 1563 (in Chinese) [王胭脂、邵建达、晋云霞、黄建兵、董洪成、贺洪波、范正修 2009 中国激光 **36** 1563]
- [14] Wang Y Z, Shao J D, Dong H C, Zhang W L, Cui Y, He H B, Fan Z X 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 094209
- [15] Wang Y Z, Shao J D, Zhang W L, Wei C Y, Huang J B, Jin Y X, Fan Z X 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 105202
- [16] Wang Y Z, Shao J D, Dong H C, Jin Y X, He H B, Yi K, Fan Z X, Song Y J, Hu M L, Chai L, Wang Q Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 018101 (in Chinese) [王胭脂、邵建达、董洪成、晋云霞、贺洪波、易葵、范正修、宋有建、胡明列、柴路、王清月 2011 物理学报 **60** 018101]

Design and manufacture of high dispersion mirror^{*}

Wang Yan-Zhi¹⁾²⁾ Shao Jian-Da^{1)†} Dong Hong-Cheng¹⁾²⁾ Jin Yun-Xia¹⁾ He Hong-Bo¹⁾ Yi Kui¹⁾
Fan Zheng-Xiu¹⁾ Song You-Jian³⁾ Wang Si-Jia³⁾ Hu Ming-Lie³⁾ Chai Lu³⁾ Wang Qing-Yue³⁾

1) (*Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-electronic
Information Science and Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 4 June 2010; revised manuscript received 28 January 2011)

Abstract

The designed and manufactured high dispersion mirror combines the characteristics of chirped mirror and Gires-Tournois interferometer (GTI) mirror and provides high dispersion compensation with about -800fs^2 GDD in a wavelength range of 780—830 nm and about -2500fs^2 GDD in a wavelength range 1030—1050 nm, respectively. The dispersion mirror is manufactured by ion beam sputtering. The performance of the mirror has reached the designed values and can compensate the normal dispersion from ultrafast laser system effectively.

Keywords: high dispersion mirror, group delay dispersion, dispersion compression, Yb fiber laser

PACS: 78.20.-e, 81.15.Cd, 81.15.-z

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2010CB327604, 2006CB806002).

[†] Corresponding author. E-mail: jdashao@mail.shnc.ac.cn