

文章编号: 1001-3806(2005)04-0358-03

用作飞秒脉冲展宽器的新型多膜光栅的设计

于云龙¹, 穆参军¹, 白晋涛¹, 侯 洵^{1, 2}

(1. 西北大学 光子学与光子技术研究所 陕西省光电子技术省级重点开放实验室, 西安 710069; 2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘要: 采用薄膜光学技术, 在传统反射式闪耀光栅的表面镀以多层薄膜以改善传统光栅的衍射特性和反射特性, 用于控制展宽后脉冲的光谱强度分布, 以及控制超短脉冲放大过程中的增益窄化效应。理论计算和实验表明, 应用多膜反射式闪耀光栅作为展宽器件, 种子脉冲的能量损耗小、展宽效率高, 且放大过程中的增益窄化效应得到很好的补偿, 另外, 采用多膜反射式闪耀光栅还有方便实验调节, 简化 CPA 系统, 便于集成化的优点。

关键词: 超短超强激光脉冲; 增益窄化效应; 多膜反射式闪耀光栅; 增益截面

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

The design of a new multilayer blazed reflective grating used in broadening fem tosecond lasers

YU Yun-long¹, MU Shen-jun¹, BAI Jin-tao¹, HOU Xun^{1, 2}

(1. Provincial Key Laboratory of Photoelectronics Technology, Institute of Photonics & Photo-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract: A new multilayer blazed reflective grating is shown. Using thin-film technology, the blazed reflective grating's diffraction property and reflectivity property have been improved greatly. Making use of these properties, the gain narrowing in fem tosecond lasers is restrained. The calculation result and experiment result show that using this new grating to broaden seed pulse has many advantages: the loss of seed pulse energy is less, the efficiency of broadening is high, the gain narrowing is attenuated much. Furthermore, it can make experiment easier and convenient for integration.

Key words: ultra short & ultrahigh intensity pulse laser; gain narrowing; multilayer blazed reflective grating; cross-section of gain

引 言

超短超强激光脉冲在实验室天体物理、惯性约束核聚变、激光离子加速器、强场物理等前沿科学研究中起着重要的应用。在超短激光脉冲放大技术中, 啁啾脉冲放大技术 (chirped pulse amplification, CPA) 是一个有效的放大手段。在此过程中, 种子脉冲经过产生、展宽、放大、压缩 4 个步骤后得到理想的放大脉冲。在展宽的过程中, 最常用的展宽器件就是光栅, 光栅又分为反射式光栅和透射式光栅, 因为反射式光栅引入的色散较小 (没有光束透射引入的物质色散), 所以, 目前多采用反射式光栅。在反射式光栅中, 反射式闪耀光栅的损耗低, 展宽效率高, 引入的高阶色散少, 因而得到了广泛的应用。在啁啾脉冲放大技术中, 理论上

种子脉冲的展宽效率愈高, 放大效率也越高, 压缩后脉冲的能量也越大。因此, 在展宽系统中, 一个性能优良的光栅是十分必要的。

很早, 人们就发现光学薄膜有着特殊的光学特性。然而, 由于技术方面的原因, 光学薄膜真正发挥广泛的作用是在 20 世纪 30 年代, 出现真空蒸镀设备以后。在现代光学技术中, 采用真空镀膜技术是改善光学器件特性的一个重要和不可缺少的方法。可以毫不夸张地说, 没有光学薄膜, 大部分的近代光学系统就不能正常工作。

反射式闪耀光栅的结构由基底介质、光栅刻痕介质、栅体保护膜层 3 部分组成。尽管反射式闪耀光栅有诸多的优点, 但在实验中也发现有一些不足: (1) 栅体保护膜层的反射光太多, 反射光在实验中是选单仪工作的重要参考信号, 然而, 由于现今生产的 PIN 管的响应效率可以达到很高, 故只要有小部分种子激光被反射就可以供给选单系统作为参考信号, 而过高的反射光则是对种子脉冲能量的白白浪费; (2) 反射式闪

作者简介: 于云龙 (1979-), 男, 硕士, 主要研究方向是瞬态光学和超快现象。

E-mail: raki_yu@hotmail.com

收稿日期: 2004-04-19; 收到修改稿日期: 2004-05-26

耀光栅能够提供较宽的展宽,但是其展宽性能上还有较大的改进空间。比如,通过改善展宽后,脉冲的光谱强度分布可以有效的消弱增益窄化效应。笔者欲通过在反射式闪耀光栅上按设计要求蒸镀光学薄膜的方法,用于改善展宽后种子脉冲的光谱强度分布特性,以消弱放大过程中的增益窄化效应。

1 理论依据

脉冲宽度小于 30 fs 以下的激光脉冲的光谱是相当宽的,而增益介质的增益截面是按频率呈钟形的分布。这就意味着在某一中心频率附近,增益介质的增益截面比较大,种子脉冲的放大效率比较高,而在脉冲的边沿,相应的增益截面小,种子脉冲的放大效率也低。由于在脉冲边沿附近,本身的光强就比较弱,加之增益介质在脉冲边沿处的增益截面又小,导致这部分信号的放大有限。而增益介质本身又有吸收损耗,由此导致脉冲的边沿部分的吸收损耗反而大于放大。这样,这部分的谱线就慢慢消失,最终得到的放大脉冲的光谱宽度变窄。这就是所谓的增益窄化效应。在低于 30 fs 的超短激光脉冲的放大过程中,增益窄化效应带来的负面影响很严重,因此,在放大 30 fs 以下种子脉冲时,增益窄化效应是必需想法克服的。

对于消除飞秒脉冲放大过程中的增益窄化效应,已经有好多人做过有益的探索^[1~3]。根据 BARTY, SALIN 等人的理论计算和实验结果,在种子脉冲的脉宽低于 30 fs 的情况下,可以通过整形放大后的脉冲的光谱强度的分布来有效消除在放大过程中的增益窄化效应。BARTY 等人于 1996 年,通过在再生放大腔中加入薄膜偏振标准具(thin-film polarizer etalon, TFPE)等元件,整形再生放大脉冲的技术,首次得到由于补偿了增益窄化效应而获得短于 20 fs 的超短脉冲放大结果^[1]。而 SALIN 等人则通过蓝移种子脉冲而使红端得到较多的放大从而补偿放大过程中的增益窄化效应^[2]。

抑制增益窄化效应的原理可用下面两个图来简要说明。假设入射种子脉冲是高斯型啁啾脉冲,其表达式如下^[3,4]:

$$E_{in} = E_0 \exp\left[-2\frac{t^2}{T^2}\right] \exp\left[-i\frac{\beta}{2}\left(\frac{t}{T}\right)^2\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (1)$$

式中, T 是脉冲的半宽度, β 是线性啁啾系数, ω_0 是中心频率。对 (1) 式进行傅里叶变换,可计算出脉冲光谱强度表达式是:

$$I_{in}(\omega) = \frac{\pi \epsilon_0 c n T^2 \exp\left[\frac{8 T^2 (\omega - \omega_0)^2}{2(16 + \beta^2)}\right]}{\sqrt{16 + \beta^2}} \quad (2)$$

其光谱曲线图如图 1 中虚线所示。对高斯型的啁啾种

子脉冲引入一个调制函数:

$$T(\xi \omega) = \xi - 0.999 \cos[15.708(\chi + 0.01)] \quad (3)$$

式中, ξ 是调制深度函数,它是根据调制的要求来选择的。调制后的脉冲的光谱强度分布可以表示为^[5]:

$$I_m'(\omega) = I_{in}(\omega) T(\xi \omega) \quad (4)$$

实验中,种子飞秒脉冲的脉冲宽度为 $T=10\text{ fs}$ 对应的中心波长 $\lambda_0=800\text{ nm}$, $\beta=1$, $\chi=\frac{\pi}{50\omega}$, $\xi=1$, 计算出光谱强度曲线图,如图 1 中实线所示。

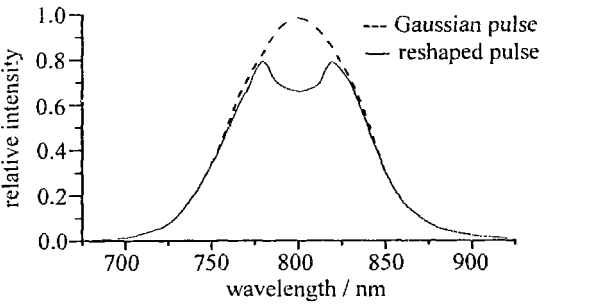


Fig 1 The spectrogram of Gaussian pulse and shaped Gaussian pulse

2 实验装置

实验中,在不加任何调制器件的情况下,直接从钛宝石激光器中输出的锁模飞秒种子脉冲激光的光谱强度分布如图 2 中虚线所示。而不管采取哪种实验方法、哪些实验器材。其最终用来消除增益窄化的方法都是设法减弱脉冲在增益中心频率处的光谱强度,以此来补偿增益介质在此处增益截面过大而引发的增益窄化现象^[6]。由图 2 虚线可看出,输出的锁模激光已经不是严格标准的高斯光束(在自由运转状态下,激光输出是标准的高斯光束),这是因为钛宝石自锁模的影响。理想状态下,最终整形后脉冲的光谱强度分布呈现图 2 实线所示之分布时,增益窄化效应就可以基本得到抑制。

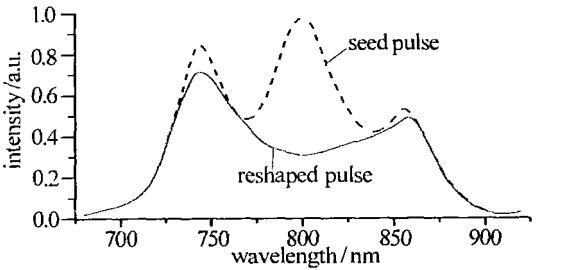


Fig 2 The spectrogram of seed pulse and theoretical shaped seed pulse

知道了抑制增益窄化效应的原理后,在实验中,设计了一种新型多膜反射式闪耀光栅。其基本原理就是采用光学薄膜技术,在普通反射式闪耀光栅的表面蒸镀一系列的光学薄膜,而这些薄膜的光学透射特性曲线是根据实验的要求计算好后,再采用真空镀膜工艺加工而成。采用这种全新设计的多膜反射式闪耀光栅作为飞秒种子脉冲的展宽元件,种子脉冲在经过该光

栅展宽后的光谱强度分布基本符合补偿增益窄化效应的光谱强度的分布要求,使得在进入放大腔前的展宽脉冲得到预期的调制,省去了在放大腔中添加额外的调制器件,简化了实验的光路结构,降低了实验的调节难度。

实验中所采用的展宽部分的实验光路如图 3 所示,在这个光路中,所用的展宽光栅的设计具有以下两

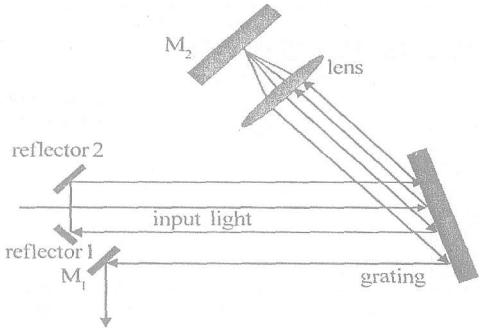


Fig 3 Schematic of light path in our experiment

个特点^[7~9],光栅的剖面图如图 4 所示:(1)设计的光栅的透过率系数与波长的关系基本满足如下要求:波长在 750nm~820nm 范围内的种子脉冲光的透射率为 80%左右(见图 5)^[8];而在这个波长范围以外的种子脉冲光几乎可以无损透过;(2)该光栅在加工中是采用真空镀膜工艺,镀膜材料根据透射率要求来选定^[9]。

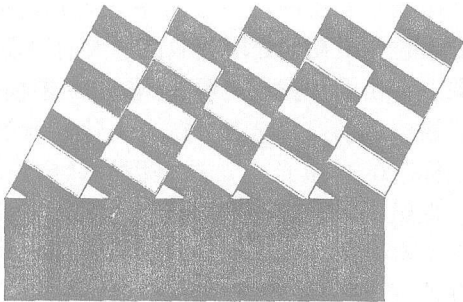


Fig 4 The profile of our grating

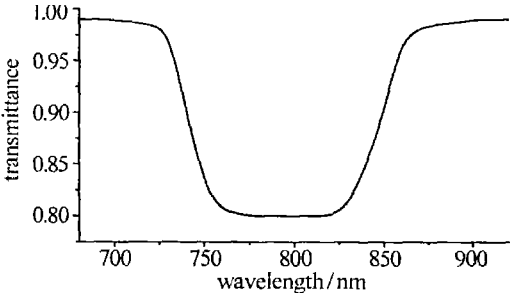


Fig 5 Transmittance ratio of our grating

实验中,入射光束首先以李特洛角入射到多膜光栅 G 上,镀膜层在镀膜时是与入射光线垂直的,在这个方向上,光栅镀膜层对入射光的透过率满足设计要求值。因为光栅镀膜层在既定的波长范围内的透过率有所不同。种子脉冲光在经过多膜光栅的过程中,不仅经历了展宽过程,而且是同时添加进去了调制脉冲

形状的作用,故多膜光栅的作用不只是作为展宽器件,而是一个展宽器和调制器的结合体。它把需要添加在再生放大腔中的调制器件与光栅展宽器有效的结合在一起。入射的种子脉冲经过 4 次的展宽和调制,最终出射后的激光的光谱强度分布如图 6 所示。

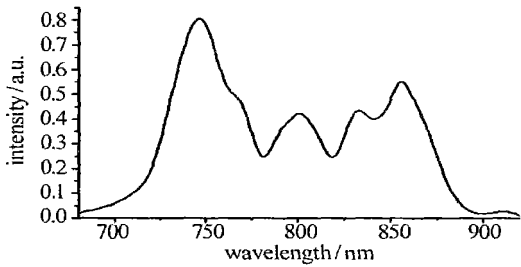


Fig 6 The spectrogram of shaped seed pulse

由图 6 可以看出,该光栅基本能符合抑制增益窄化效应的理论要求,能有效的对脉冲的形状进行调制。

3 结果与讨论

激光脉冲经放大后的光谱可表示为^[10]: $I_{out}(\omega) = I_{in}'(\omega)G(\omega)^n$,其中 $G(\omega) = e^g$ 是频率增益函数。l 是钛宝石的增益长度, n 是放大的次数, g 是增益系数。

对均匀加宽介质: $g = g_h(\omega_0) \frac{1}{1 + 4(\omega - \omega_0)^2 / \Delta\omega_h^2}$, $g_h(\omega_0)$ 为中心频率处的小信号增益, $\Delta\omega_h = \frac{1}{\tau}$, τ 是上

能级寿命,钛宝石的上能级寿命约是 $3\mu s$ 。对于钛宝石, $g_h(\omega_0)$ 的典型值是 2。取 $l=1mm$, $n=10$, 分别计算并画出不采用新型光栅调制展宽后的光谱强度分布图和采用新型光栅调制放大后的光谱图,如图 7 所示。

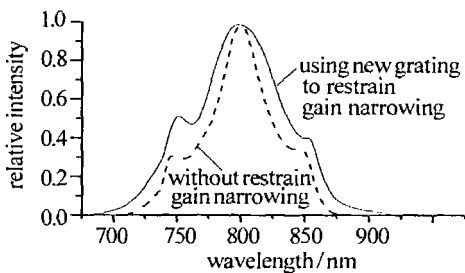


Fig 7 Contrastive scheme of the output amplified pulse between traditional method and using the new grating as broaden component

由图 7 中的光谱可以清楚地看出:采用新型多膜反射式闪耀光栅所得到的输出光谱与种子脉冲光谱相比,各个光谱成分的相对强度有一些偏差,但是增益窄化效应已经得到很好的抑制。另外,由于所镀薄膜的光学厚度仅为几个波长的量级,所以,引入的色散可以忽略。因此,采用该光栅有效地减少了加入腔内的元件所引入的色散,而且,应用该光栅作为展宽器件进行种子脉冲的展宽和调制,便于进行集成化和商品化。

(下转第 376 页)

这也是激光柔性布线技术区别于传统技术的最大优势,同时也是现代电子技术发展的需求;(2)高效率、低成本方向发展。提高效率 and 降低成本是相辅相成的,同时也是一对矛盾,如何使之完美统一,是众多学者梦寐以求的目标;(3)高精度、高性能方向发展。传统的制备方法由于本身的缺点,很难进一步提高精度(线宽、线密度),激光柔性布线技术的引入,提供了解决这一难题的契机。

毋庸置疑,线路板的激光柔性布线技术的发展潜力和空间是巨大的。尽管和国外差距是明显的,但是只要我们迎头赶上,甚至超过他们也是完全可能的。

参 考 文 献

- [1] MOILANEN H, REMES J, LEPPÄVUORIS et al. Low resistivity LCDVD direct write Cu conductor lines for IC customization [J]. *Physica Scripta* 1997, 69: 237~241.
- [2] TERRILL R E, CHURCH K H, MOON M. Laser chemical vapor deposition for microelectronics production [J]. *IEEE Aerospace Applications Conference Proceedings* 1998, 1: 377~382.
- [3] LEHMANN O, STUKE M. Laser-driven movement of three-dimensional microstructures generated by laser rapid prototyping [J]. *Science* 1995, 270 (5242): 1644~1646.
- [4] SATO Y, YOSHIDA M, NISHIYAMA T et al. Laser-enhanced palladium electroless plating [J]. *Transactions of the Institute of Metal Finishing* 1997, 75(1): 4~6.
- [5] KORDÁS K, BALIK, LEPPÄVUORIS et al. Laser direct writing of palladium on polyimide surfaces from solution [J]. *Applied Surface Science* 1999, 152(3): 149~155.
- [6] KORDÁS K, REMES J, LEPPÄVUORIS et al. Laser-assisted selective deposition of nickel patterns on porous silicon substrates [J]. *Applied Surface Science* 2001, 178(1~4): 93~97.
- [7] KORDÁS K, NÁNAI L, GALBÁCS G et al. Reaction dynamics of CW Ar⁺ laser induced copper direct writing from liquid electrolyte on polyimide substrates [J]. *Applied Surface Science* 2000, 158(1):

127~133.

- [8] KORDÁS K, BALIK, LEPPÄVUORIS et al. Laser direct writing of copper on polyimide surfaces from solution [J]. *Applied Surface Science* 2000, 154~155: 399~404.
- [9] SZÖRÉNYI T, GERETOVSZKY Z, TÓTH J et al. Laser direct writing of tin oxide patterns [J]. *Vacuum* 1998, 50(3~4): 327~329.
- [10] CHRISSEY D B, PIQUE A, MODIR et al. Direct writing of conformal mesoscopic electronic devices by MAPLE DW [J]. *Applied Surface Science* 2000, 168(1~4): 345~352.
- [11] CHRISSEY D B, PIQUE A, FITZGERALD J et al. New approach to laser direct writing active and passive mesoscopic circuit elements [J]. *Applied Surface Science* 2000, 154~155: 593~600.
- [12] SANO T, YAMADA H, NAKAYAMA T et al. Experimental investigation of laser induced forward transfer process of metal thin films [J]. *Applied Surface Science* 2002, 186(1~4): 221~226.
- [13] SHIGENOBU M, MIKIO H, HARUHIISA S et al. Method of modifying conductive lines of electronic circuit board and its apparatus [P]. *US Patent* 5832595, 1998-11-10.
- [14] KRIPESH V, GUSTW, BHATNAGAR S K et al. Effect of Nd:YAG laser micromachining on gold conductor printed over ceramic substrates [J]. *Materials Letters* 2000, 44(6): 347~351.
- [15] YABE H, TAKAHASHI A, SUMIYOSHI T et al. Direct writing of conductive aluminum line on aluminum nitride ceramics by transversely excited atmospheric CO₂ laser [J]. *APL* 1997, 71(19): 2758~2760.
- [16] SENGUPTA D K, QUICK N R, KAR A et al. Laser direct write of conducting and insulating tracks in silicon carbide [J]. *Materials Research Society Symposium Proceedings* 2000, 624: 127~133.
- [17] 谢湘华, 张谊华, 方尔梯 et al. 激光诱导醋酸铜乙醇溶液反应直写金属铜线 [J]. *应用激光*, 1996, 16(6): 252~260.
- [18] 黄妙良, 林建明, 林煜 et al. 激光诱导化学沉积(铜)的实验研究 [J]. *激光杂志*, 1996, 17(5): 249~251.
- [19] 张国庆, 姚素薇, 刘冰 et al. 半导体硅上激光诱导选择性电镀铜 [J]. *应用化学*, 1997, 1(14): 33~36.
- [20] LIX Y, LIH L, LIU JW et al. Conductive line preparation on resin surfaces by laser microcladding conductive pastes [J]. *Applied Surface Science* 2004, 233(1~4): 51~57.

(上接第 360 页)

参 考 文 献

- [1] BARTY C P J, KORN G, RAKSIF et al. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses [J]. *Opt Lett* 1996, 21(3): 219~221.
- [2] LeBLANC C, CURLEY P, SALIN F. Gain narrowing and gain-shifting of ultra-short pulses in Ti:sapphire amplifiers [J]. *Opt Commun* 1996, 131: 391~398.
- [3] CHAMBARET J P, LeBLANC C, CHÉRIAUX G et al. Generation of 25TW, 32fs pulses at 10Hz [J]. *Opt Lett* 1996, 21(23): 1921~1923.
- [4] 曹东茂, 魏志义, 滕浩 et al. 整形种子脉冲克服放大过程中的增

益窄化效应的研究 [J]. *物理学报*, 2000, 49(6): 1202~1205.

- [5] 贺晓旭, 白晋涛, 侯洵. 高斯型光谱设计在飞秒激光放大器中消除增益窄化效应的研究 [J]. *光子学报*, 2001, 30(8): 957~960.
- [6] 赵尚弘, 王屹山, 陈国夫 et al. 钛宝石超短脉冲放大过程中的增益窄化效应 [J]. *光子学报*, 1997, 26(3): 197~200.
- [7] 崔宏滨, 刘文汉. 多层膜闪耀光栅衍射的运动学研究 [J]. *光学技术*, 2001, 27(3): 272~277.
- [8] MACLEOD H A. *Thin-film optical filters* [M]. Philadelphia: Institute of Physics Publishing 2001. 53~85.
- [9] 唐晋发, 郑权. *应用薄膜光学* [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 30~56.
- [10] SIEGMAN A E. *Lasers* [M]. California: University Science Books 1986. 221~279.