

文章编号: 0253-2239(2009)05-1352-06

光谱调制反射镜的数控加工控制结构函数

李 铭^{1,2} 张 彬¹ 戴亚平² 王 韬² 范正修³ 黄 伟⁴

(¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064; ²中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)
(³中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ⁴中国科学院成都光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 在千焦耳拍瓦高功率放大系统设计中, 激光脉冲的时空和光谱整形技术一直受到人们的广泛关注。利用经光学微纳超精细加工而成的电介质结构反射镜可在高功率条件下实现啁啾脉冲的光谱整形。在光谱整形介质结构反射镜的设计与制造中, 需要根据加工精度来合理设计数控加工的控制结构函数以及加工刻蚀深度结构函数。针对神光 II 千焦耳拍瓦高功率放大系统设计中提出的多层介质光谱调制反射镜, 推导出数控加工的控制结构函数及其刻蚀深度结构函数, 并通过数值模拟计算, 分析了调制结构反射镜逼近调制函数的效果及其光谱调制特性。

关键词 光学器件; 光谱整形; 介质膜结构微纳超精细加工; 高斯调制反射镜; 增益窄化与增益饱和效应; 聚焦功率密度与信噪比

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092905.1352

Control Construction Functions of Digital-Control Fabrication for Multilayer Dielectric Thin Film Reflector for Spectral Reshaping

Li Ming^{1,2} Zhang Bin¹ Dai YaPing² Wang Tao² Fan ZhengXiu³ Huang Wei⁴

¹ College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China
² Shanghai Institute of Laser and Plasma, Chinese Academy of Engineering and Physics, Shanghai 201800, China
³ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
⁴ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract In order to compensate the gain-narrowing and gain-saturation effects and improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the output high-power laser pulse, attentions have been paid to the spatial distribution, the temporal profile, and the spectral reshaping in the design of kilo-joule peta-watt chirped pulse amplification (CPA) systems. The multilayer dielectric thin film reflector fabricated by top-down nano-fabrication processes can be used to realize spectral reshaping of high-power chirped pulse. In the design and fabrication of the multilayer dielectric thin film reflector, it is necessary to determine the fabrication control functions appropriately. The control construction function of digital-control fabrication and the etching depth construction functions of the multilayer dielectric thin film reflector for spectral reshaping of chirped pulse laser in Shengguang-II system are investigated. The spectral modulation properties of the multilayer dielectric thin film reflector have been analyzed, and the effect of the reflectivity distribution of the multilayer dielectric film reflector approaching to the object function has also been observed.

Key words optical devices; spectral reshaping; multilayer dielectric film construction by top-down nano-fabrication; Gaussian-reflectivity mirror; gain-narrowing and gain-saturation effects; power density in focus and the signal-to-noise ratio

收稿日期: 2008-06-17; 收到修改稿日期: 2008-10-22

基金项目: 国家 863 计划, 四川省青年科技基金(05ZQ026-013)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0784)资助的课题。

作者简介: 李 铭, 男, 博士研究生, 主要从事激光与光通讯传输方面的研究。E-mail: taylerlm@126.com

导师简介: 张 彬, 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光物理和技术等方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com (通信联系人)

1 引言

啁啾脉冲放大(CPA)系统中,由于增益窄化、增益饱和以及群延迟色散等效应均会严重影响输出激光脉冲的焦斑质量。在神光II千焦耳拍瓦高功率放大系统设计中,所关心的一个问题是如何有效地对激光脉冲的时空特性和光谱特性进行整形。光谱整形的目的是尽量消除放大过程中的增益窄化和增益饱和效应的影响,同时还要提高高功率激光输出脉冲的信噪比。目前,常用的方法主要有^[1~5]:1) 可调谐空气隙,但调节复杂,同时在神光II千焦耳拍瓦系统中已用光参量啁啾脉冲放大器(OPCPA)替代了再生放大器,因而该方法不适用;2) 信号光源中心波长蓝移,但这种方法对功率超过太瓦级的系统也不适用;3) 长波长注入,即利用增益窄化效应来补偿增益饱和效应的影响,但这将影响到系统的稳定性;4) 变栅距光栅,即通过改变光栅栅距来改变衍射效率,但特种光栅难以制造,同时存在光谱混叠;5) 双折射晶体,但由于晶体做不大,且存在法布里-珀罗(F-P)效应,对高功率高能量系统不能使用;6) 光参量啁啾脉冲放大调制,但只能小能量使用,且光谱调制深度和控制参数难以控制,尤其依靠抽运光质量,这种方法对高功率高能量系统不适用;7) 可编程声光色散滤波器(AOPDF)能提供较大的增益补偿能力和较大的色散补偿范围^[6]。但是AOPDF的色分辨率仅能用于像钛宝石这样的宽带啁啾脉冲放大系统,且AOPDF的强烈色散给啁啾脉冲的压缩带来很大的干扰,其稳定性受声光调制器件的稳定性影响严重。同时对于大能量高功率啁啾脉冲放大系统多级直接调制也不适应。为了实现神光II千焦耳拍瓦高功率放大系统中激光脉冲光谱形状及色散相位差的有效控制。提出了一种新的光谱整形方法,先利用光栅等色散元件将啁啾脉冲的光谱在空间上展开,再通过空间整形来实现光谱整形^[7,8]。本文将着重讨论用于这种光谱整形的多层介质膜反射镜的数控加工中的理论问题与设计。针对千焦耳拍瓦光谱整形设计要求,推导出数控加工的控制结构函数以及加工刻蚀深度结构函数,以加工出反射率曲线呈现中心凹陷的调制反射镜。通过数值模拟,给出对多层介质光谱调制反射镜逼近调制函数的效果及其特性。

2 设计原理

在实际工作中,为了补偿啁啾脉冲放大过程中产生的增益窄化和增益饱和效应,需要利用光谱整

形装置使放大前的脉冲光谱分布中心波长附近呈现一定形状的凹陷^[9~12]。利用具有特定结构的多层介质膜反射镜来实现对大能量高功率啁啾脉冲玻璃放大系统中啁啾脉冲的光谱整形。针对玻璃1053 nm波长设计了多层介质膜光谱调制反射镜,其幅度调制在保证相位不变的条件下超过60%,高反射带波长宽度为196 nm,在垂直入射传播方向的色分辨本领可以达一埃^[7,8],其结构如图1所示。然而,在多层介质膜光谱调制反射镜的设计和加工过程中,不仅需要合理设计膜层介质材料的折射率比以及膜系结构参数,还需要设计多层介质膜光谱调制反射镜的空间加工精度与数控加工控制结构函数和加工刻蚀深度结构函数。

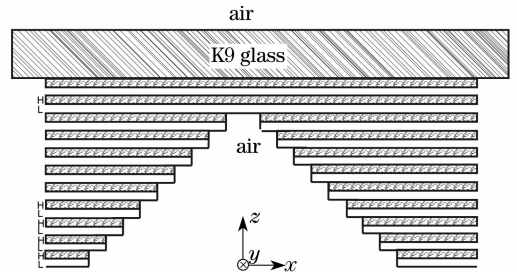


图1 数控加工的多层介质光谱调制反射镜的结构示意图
fig. 1 Multilayer dielectric film construction of a Gaussian-reflectivity mirror for the spectral reshaping fabricated by using digital-control processing

啁啾脉冲的光谱分布在中心波长附近要求呈现出高斯分布凹陷的情况,相应的目标函数为

$$M_g(x, \omega_g, x_d, A) = 1 - A \exp \left[- \frac{(x - x_d)^2}{\omega_g^2} \right], \quad (1)$$

式中 ω_g 为目标高斯函数半峰全宽, x_d 为偏移量, A 为调制深度参数。

由于多层电介质反射膜可以有多种结构形式,甚至可以是变折射率电介质交替层结构,可以做到大口径和高损伤阈值,其模场分布应由严格模式理论求解^[13]。因此,光谱整形介质膜结构反射镜的数控加工控制结构函数应该按照严格的膜系设计的干涉矩阵方程来设计。由文献^[14]可得到多层膜系的反射率和透射率分别为

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*, \quad (2)$$

$$T = \frac{4 \eta_0 \eta_{K+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (3)$$

反射相位为^[14]

$$\phi = \arctan \left(\frac{i \eta_0 (CB^* - BC^*)}{\eta_0^2 BB^* - CC^*} \right), \quad (4)$$

式中 η_0 为入射介质导纳, η_k 为第 k 层介质导纳, B 、 C 为薄膜组件的特征矩阵元, 其表达式为^[14]

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^m \begin{pmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_{m+1} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j, \quad (6)$$

式中 δ_j 为第 j 层介质相位厚度, n_j 为第 j 层介质折射率, d_j 为第 j 层介质垂直厚度, θ_j 为第 j 层介质光线折射角, m 为周期数。

针对(1)式给出的在中心位置呈现高斯分布凹陷的目标函数, 经严格设计和理论推导, 可得到 x 方向上的数控加工控制结构函数为

$$x[j] = \frac{\omega_g}{2} \left\{ \sqrt{-\ln \left[\left(1 - \left(\frac{\eta_0 B^{j+1} - C^{j+1}}{\eta_0 B^{j+1} + C^{j+1}} \right) \left(\frac{\eta_0 B^{j+1} - C^{j+1}}{\eta_0 B^{j+1} + C^{j+1}} \right)^* \right) / A \right]} + \sqrt{-\ln \left[\left(1 - \left(\frac{\eta_0 B^j - C^j}{\eta_0 B^j + C^j} \right) \left(\frac{\eta_0 B^j - C^j}{\eta_0 B^j + C^j} \right)^* \right) / A \right]} \right\}, \quad (7)$$

式中 B^{j+1} 、 C^{j+1} 、 B^j 、 C^j 分别为 $j+1$ 层薄膜组件的特征矩阵元和 j 层薄膜组件的特征矩阵元, $x[j]$ 为加工第 j 个台阶时, 数控床的刻蚀头在 x 方向的位置。

由于数控床加工总是从反射镜表面开始刻蚀, 选择数控床的刻蚀头零点在表面中心位置, 如图 1 所示。在实际加工时, 原点定在反射镜表面边缘时只需作水平平移即可。公式仅仅做了平移简化, 没有改变其实质规律。由于 $\lambda/4$ 的标准膜系具有最大的反射率和最小的相位移动, 因此, 工程设计中通常选用这种标准膜系。于是, 第 j 层介质相位厚度 δ_j 设计为 $\lambda/4$ 。进一步根据(6)式可以确定 z 方向加工刻蚀深度结构函数为

$$z[j] = (M - j) \frac{\lambda}{4 \cos \theta_j} \left(\frac{1}{n_H} + \frac{1}{n_L} \right) \quad (8)$$

式中 $z[j]$ 为加工第 j 个台阶时, 数控床的刻蚀头在 x 方向的 $x[j]$ 位置的刻蚀深度; M 为总的膜堆周期数; λ 为对应中心波长; θ_j 为第 j 层介质刻蚀方向角, 实际上刻蚀粒子束发散角能做到 10° 以内, 从而使 $\cos \theta_j \approx 1$ 。

本文设计的结构函数外形象光栅结构, 故简称光栅型光谱调制反射镜。光栅型光谱调制反射镜的 y 方向加工位置为自由移动方向, 这给数控床的刻蚀头的移动以及废料的排除带来便利。严格的结构函数位置确定方法应该由根据膜系设计的干涉矩阵方程, 由多层膜系的特性反射率式(2)和透射率式(3), 通过计算机程序辅助计算得到相应的加工位置。同时, 再用(4)式检测干涉相位的变化, 以控制加工质量。进一步根据(7)和(8)式给出的结构函数经数控生产可加工出具有特殊结构的多层介质膜反射镜, 利用该调制反射镜可使啁啾脉冲在其中心波长附近出现高斯分布凹陷, 以补偿增益窄化效应。此外, 还可通过移动光谱整形器调制出所需的具有

不对称光谱分布的啁啾脉冲, 以补偿增益饱和效应。可以通过该光谱调制反射镜调制得到所要求的光谱形状, 提高啁啾脉冲放大的信号噪声比。

4 数值计算结果

钕玻璃激光放大器仅几个纳米带宽的光谱调制, 调制谱分辨率要求达 0.1 nm/mm 。对于带宽 (FWHM) 为 3 nm 的啁啾脉冲, 要求光谱调制器将脉冲光谱展开到空间约 60 mm 。图 1 给出了可用作光谱整形器的多层介质膜反射镜结构示意图。由于在后续的啁啾脉冲传输放大过程中要求群速度色散管理, 以及 CPA 系统展宽与压缩的严格匹配, 因此, 在结构设计时需要保证所有反射光同相或反相, 这是设计限制条件。反射膜系结构的典型设计例为 $B2L(HL)^m H$, 即是两层低反介质膜构成 $\lambda/2$ 引导层用作修正基片厚度误差, 高折射率介质与低折射率介质膜交替构成反射膜系, m 为周期数。采用 HfO_2 和 SiO_2 构成介质膜系, 从而使多层电介质反射膜可以做到大口径、高损伤阈值。计算所用参数, 中心波长 $\lambda_0 = 1053 \text{ nm}$, 多层介质膜的高、低折射率层的折射率分别为 $n_H = 1.96$ 和 $n_L = 1.46$, 空气折射率 $n_0 = 1$, 基片折射率 $n_g = 1.5$, 输入激光半峰宽 $\omega_g = 3 \text{ mm}$, 目标函数的调制深度参数 $A = 0.3$ 。

表 1 给出了图 1 所示数控加工的多层介质光谱调制反射镜的加工特性和调制特性。按照图 1 的坐标系, 加工原点选择在周期膜反射镜表面。表 1 中对应台阶数为 0 表示反射镜表面, 对应 x 方向几何偏移加工量 $447.1 \mu\text{m}$ 为调制反射镜以收敛级数 $x[j]$ 逼近目标函数 $M_g(x, \omega_g, x_d, A)$ 取十阶近似的剩余最大项。该台阶不需要加工, 仅仅表示调制反射镜逼近目标函数的加工截断和 x 方向逼近能力。

此时,对应 x 方向刻蚀头位置为 $7092.8 \mu\text{m}$,对应 y 方向几何偏移加工量为 0 ,对应 z 方向加工刻蚀深度量为 0 。从反射镜表面到纵深进行台阶数编号 $0、1、2、\dots、10$ 。台阶 1 对应第一台阶,对应 x 方向刻蚀头位置 $6615.9 \mu\text{m}$, x 方向几何偏移加工量 $476.8 \mu\text{m}$,取 y 方向几何偏移加工量大于入射光束宽度的十倍以上。例如,针对千焦拍瓦设计的 3 mm 的 OPCPA 输出光束, y 方向几何偏移加工量要大于

30 mm ,而对应 z 方向加工刻蚀深度量为 314.6 nm 。通过 x 方向、 y 方向、 z 方向的加工刻蚀,从而在相位保持不变的条件下,获得的反射率偏移量为 0.35% 。如此类推,即可根据表 1 给出的各台阶的加工参数,加工出调制深度 $A=0.3$ 的目标函数。由于设计的目标函数的调制深度 $A=0.3$,根据(7)式计算得到第 9 台阶和第 10 台阶不用加工。

表 1 多层介质光谱调制反射镜的加工特性和调制特性

Table 1 Fabrication feature and modulation feature of the multilayer dielectric film Gaussian-reflectivity mirror

Ordinal of step	x -axial position of etching head / μm	x -axial processing migration / μm	y -axial processing migration / mm	z -axial etching depth / nm	Reflectivity offset / $\%$
0	7092.8	447.1	0	0	0
1	6615.9	476.8	>30	314.6	3.5
2	6102.7	513.2	>30	629.2	6.2
3	5543.7	559.0	>30	943.8	11.1
4	4924.8	618.8	>30	1258.5	19.6
5	4222.7	702.1	>30	1573.1	34.4
6	3391.0	831.7	>30	1887.7	59.0
7	2288.8	1102.2	>30	2202.3	97.1
8	821.4	1467.4	>30	2516.9	149.1
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0

图 2 给出了多层介质光谱调制反射镜的加工量特性,(a) x 方向;(b) y 方向及 z 方向。从图 2(a)可以看出, x 方向的刻蚀头位置随台阶数增加而迅速减小,而 x 方向的几何偏移加工量则随台阶数增加而从百微米量级到毫米量级迅速增大。图 2(b)表明, z 方向加工刻蚀深度量随台阶数增加呈线性线从百纳米量级到微米量级增大,而 y 方向的加工刻蚀量需要明显大于激光光斑尺寸。工程上波长拼接加工精度存在精度的限制,进一步研究表明^[15],对于 1053 nm 钕玻璃激光系统,要求加工定位位置

精度 $1 \mu\text{m}$,刻蚀高折射率介质加工误差容限为 35 nm ,相当于 $\lambda/15$ 的误差容限;刻蚀低折射率介质加工误差容限为 60 nm ,相当于 $\lambda/11$ 的误差容限;刻蚀低折射率介质的加工误差对反射率的影响曲线斜率要明显小于刻蚀高折射率介质的情况;就加工难易程度而言,可优选反应离子束刻蚀方案采用刻蚀并残留低折射率介质的方案更容易实现。刻蚀高折射率介质表面粗糙度容限为 8.5 nm ,相当于 6% 薄膜厚度。应用离子束刻蚀或反应离子束刻蚀技术是完全能够满足上述要求的^[16~23]。

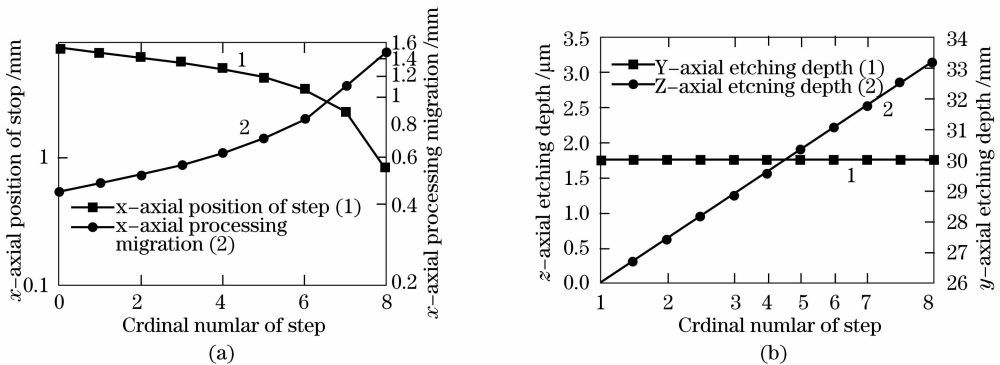


图 2 多层介质光谱调制反射镜的加工量特性

Fig. 2 Fabrication offset of the multilayer dielectric film Gaussian-reflectivity mirror

图 3 给出了多层介质光谱调制反射镜的调制增量特性曲线和光谱调制特性。(a) 调制增量特性;(b) 光谱调制特性。从图 3(a)可以看出,反射率偏移量随台阶数的增加而几乎呈指数增加。多层介质光谱调制反射镜的光谱调制特性是离散的,调制反射镜调制能力受到膜层本身反射机制以及制造精度

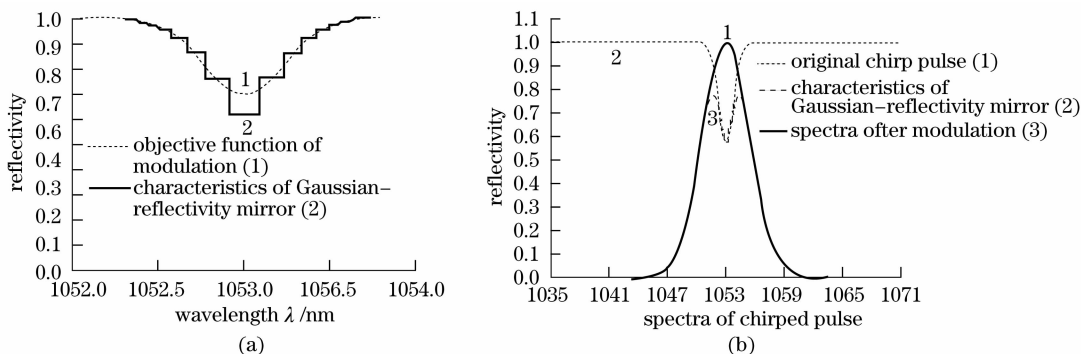


图 3 多层介质光谱调制反射镜的调制增量特性曲线和光谱调制特性

Fig. 3 Modulation offset and spectral modulation of the multilayer dielectric film Gaussian-reflectivity mirror

4 结 论

提出一种用于千焦耳拍瓦高功率放大系统光谱整形的多层介质膜反射镜新方法,设计出光谱调制反射镜的膜系结构为 $B2L(HL)^mH$ 。针对应用需要的反射率曲线呈现中心凹陷的调制反射镜,推导出了数控加工的控制结构函数及其刻蚀深度结构函数,并给出了调制反射镜的反射率逼近目标函数的效果及其特性。研究表明,针对不同的目标调制函数,通过合理的膜系结构设计,并利用本文给出的方法,可确定数控加工结构位置以及相应的加工量。 x 方向的刻蚀头位置随台阶数增加而迅速减小,而 x 方向的几何偏移加工量则随台阶数增加而从百微米量级到毫米量级迅速增大。 z 方向加工刻蚀深度量随台阶数增加呈线性从百纳米量级到微米量级增大,而 y 方向的加工刻蚀量需要明显大于激光光斑尺寸。通过 x 方向、 y 方向、 z 方向的加工刻蚀,从而在相位保持不变的条件下,以收敛级数 $x[j]$ 逼近目标函数 $M_g(x, \omega_g, x_d, A)$ 取十阶近似,获得的反射率最大偏移量为 1% 的调制反射镜。对于 1053 nm 钕玻璃激光系统,要求加工定位位置精度 1 μm ,刻蚀高折射率介质加工误差容限为 35 nm,相当于 $\lambda/15$ 的误差容限;刻蚀低折射率介质加工误差容限为 60 nm,相当于 $\lambda/11$ 的误差容限;刻蚀高折射率介质表面粗糙度容限为 8.5 nm,相当于 6% 薄膜厚度。反射率偏移量随台阶数的增加而几乎呈指数增加。多层介质光谱调制反射镜的光谱调制特性是离

的限制,从而使调制出现台阶结构。然而,通过合理控制膜系的参数,随着台阶数的增多,调制精度也会提高。从图 3(b)可以看出,该光谱调制反射镜对高斯啁啾脉冲的调制效果。图中,曲线 1 为输入啁啾脉冲光谱分布,曲线 2 为光谱整形多层介质反射镜的反射调制曲线,曲线 3 为整形后脉冲光谱分布。

散的,调制反射镜调制能力受到膜层本身反射机制以及制造精度的限制,从而使调制出现台阶结构。然而,通过合理控制膜系的参数,随着台阶数的增多,调制精度也会提高。研究表明,该光谱调制反射镜可以通过国内成熟的微纳超精细加工工艺技术制造出来,通过调制器调制可以使放大前的脉冲光谱分布中心波长附近呈现所需要的形状的凹陷调制效果。

参 考 文 献

- Barty C P J, Korn G, Raksi F *et al.*. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 219~221
- Cha Y H, Kang Y I, Nam C H. Generation of a broad amplified spectral in a femtosecond terawatt Ti: sapphire laser by a long-wavelength injection method [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(8): 1220~1223
- Huang Xiaojun, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. Ultra-short ultra-intense Ti: sapphire laser facility with peak power of hundred terawatt level [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11): 1685~1689
黄小军、彭翰生、魏晓峰等. 100 TW 级超短超强钛宝石激光装置 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(11): 1685~1689
- Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong *et al.*. Chirped pulse spectral shaping by spatial grating with variable line-space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 272~274
郭爱林、杨庆伟、谢兴龙等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 272~274
- Lu Xiaoming, Li Chuang, Leng Yuxin *et al.*. Birefringent plate design for broadband spectral shaping in a Ti: sapphire regenerative amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8): 493~496
- Peng H S, Huang X J, Zhu Q H *et al.*. 286-TW Ti: sapphire

- laser at CAEP[C]. *SPIE*, 2005, **5627**:1~5
- 7 Li Ming, Zhang Bin, Dai Yaping *et al.*. Multilayer dielectric thin film reflector for spectral reshaping of chirped pulse laser in Nd: glass chirped pulse amplification system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8): 4542~4550
李 铭,张 彬,戴亚平等. 用于钕玻璃啁啾脉冲放大系统光谱整形的多层介质膜反射镜[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8):256~261
- 8 Li Ming, Zhang Bin, Dai Yaping *et al.*. Multilayer dielectric thin film reflector for spectral reshaping of chirped pulse laser in Nd: glass chirped pulse amplification system[P]. 2006 *China Patent*: 200710049516.5, 200720080292. x.
李 铭,张 彬,戴亚平等. 用于啁啾脉冲放大光谱整形的介质膜结构反射镜 [P]. 2006 中国专利号: 200710049516.5, 200720080292. x
- 9 Chu Xiaoliang, Zhang Bin, Cai Bangwei *et al.*. Study of the multipass amplification of the chirped pulse and its inverse problem[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10):4696~1701
楚晓亮,张 彬,蔡邦维等. 啁啾脉冲多程放大及其逆问题的研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(10): 4696~1701
- 10 Zhang Bin, Lü Baida. An inverse problem of multistage and multipass pulsed-laser amplifiers[J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **24**(6): 495
张 彬,吕百达. 多级和多程脉冲激光放大器的逆问题[J]. *中国激光*, 1997, **24**(6): 495
- 11 Zhang Ying, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Spectral shaping in high-power Nd: Glass chirped pulse amplification system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1767~1771
张 颖,魏晓峰,朱启华等. 高功率钕玻璃啁啾脉冲放大系统光谱整形[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1767~1771
- 12 Zhang Bin, Lü Baida. Inverse problem of a laser amplifier system containing a spatial filter [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(1):1~8
张 彬,吕百达. 含空间滤波器的激光放大系统的逆问题[J]. *物理学报*, 1998, **47**(1): 1~8
- 13 Fu Kexiang, Zhang Dayue, Wang Zhiheng *et al.*. Rigorous modal theory of phase grating and the total reflectance property [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(8):1278~1289
傅克祥,张大跃,王植恒等. 位相光栅的严格模式理论及其全反射特性[J]. *物理学报*, 1998, **47**(8):1278~1289
- 14 Tang Jifa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press
唐晋发,顾培夫,刘 旭等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州:浙江大学出版社
- 15 Li Ming, Zhang Bin, Dai Yaping *et al.*. Tolerance of ion beam etching on the multilayer dielectric thin film reflector for spectral reshaping[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **21**(3): 761~766
李 铭,张 彬,戴亚平等. 多层介质膜光谱调制反射镜的反应离子束刻蚀误差容限[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(3): 761~766
- 16 Li M, Zhang B, Dai Y P *et al.*. Micro lens medium film structure reflecting lens for chirped pulse amplifying spectrum[P]. China: CN101140332-A, 2008-03-12 Derwent Primary Accession: 2008-G35706[41]
李 铭,张 彬,戴亚平等. 用于啁啾脉冲放大光谱整形的介质膜结构反射镜[P]. 中国专利号: CN101140332-A, 2008-03-12
- 17 Britten J A, Molander W, Komashko A M *et al.*. Multilayer dielectric grating for petawatt-class laser system[C]. *SPIE*, 2004, **5273**:1~7
- 18 Dong xiaohao, Liu Ying, Zhao Feiyun *et al.*. Characteristic of a large-scale ion beam etcher based on radio frequency linear source[J]. *J. Univ. Sci. and Tech. China*, May, 2007, **37**(4~5):530~536
- 19 Wang Xudi, Liu Ying, Hong Yilin *et al.*. Reactive ion etching of HfO₂ films[J]. *Vacuum Science and Technology (China)*, 2004, **24**(4):313~316
王旭迪,刘 颖,洪义麟等. HfO₂ 薄膜的反应离子刻蚀特性研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2004, **24**(4):313~316
- 20 Wang Xudi, Liu Ying, Xu Xiangdong *et al.*. Ion beam etching of quartz and BK7 Glass [J]. *Vacuum Science and Technology (China)*, 2004, **24**(5):397~400
王旭迪,刘 颖,徐向东等. 石英和 BK7 玻璃的离子束刻蚀特性研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2004, **24**(5):397~400
- 21 Li M, Dai Y P, Wang T *et al.*. Spectrum modulating and shaping device for amplifying chirped pulse[P]. China: CN10231382-A, 2008-07-30 Derwent Primary Accession Number: 2008-K68608 [64]
李 铭,戴亚平,王 韬等. 用于啁啾脉冲放大的光谱整形装置 [P]. 中国专利号: China: CN10231382-A, 2008-07-30
- 22 Li M, Dai Y, Wang T *et al.*. Self-collimation concave modulation spectral modulation shaping device with compact structure[P]. China: CN1012383-A, 2008-07-30 Derwent Primary Accession Number: 2008-K09902[60]
李 铭,戴亚平,王 韬等. 用于啁啾脉冲放大的自准直凹面调制光谱整形装置[P]. 中国专利号: CN1012383-A, 2008-07-30
- 23 Li M, Dai Y, Wang T *et al.*. Auto-collimation plane modulation spectrum modulation shaping device for chirped pulse amplification[P]. China: CN101231384-A, 2008-07-30 Derwent Primary Accession Number: 2008-K68609[64]
李 铭,戴亚平,王 韬等. 用于啁啾脉冲放大的自准直平面调制光谱整形装置[P]. 中国专利号: CN101231384-A, 2008-07-30