

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^{*}

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, 成都 610064)

2) 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) 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2007 年 11 月 10 日收到; 2008 年 3 月 4 日收到修改稿)

在千焦拍瓦高功率啁啾脉冲放大系统设计中,为了尽量消除增益窄化和增益饱和效应的影响,同时尽可能提高高功率激光输出脉冲信噪比参数,激光脉冲时空和光谱的整形问题备受关注.提出一种光谱整形新方法,利用特定结构的多层介质膜反射镜,可实现对大能量高功率啁啾脉冲钕玻璃放大系统中啁啾脉冲的光谱整形.研究结果表明,只要合理选择多层介质膜系的结构参数,可有效地控制其反射率分布,且在保证反射相位基本不变的条件下其调制度可超过 60%.针对钕玻璃 1053 nm 波长设计而成的光谱整形反射镜,反射带宽可达到 196 nm,色分辨率约为 0.1 nm,在几十纳米波长范围所对应的相位偏差小于 12 mrad,相当于 $\lambda/524$,能够满足“神光 II”千焦拍瓦改造的技术指标要求.

关键词: 介质反射膜, 光谱整形, 千焦拍瓦, 啁啾脉冲

PACC: 4225, 2410H, 7755, 0365G

1. 引 言

在惯性约束聚变(ICF)研究中,物理实验要求非常苛刻的高功率激光输出脉冲参数.在“神光 II”千焦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,同时还需要尽可能提高高功率激光输出脉冲信噪比参数.目前,常用的方法^[1-3]主要有插入可调谐空气隙标准具、使信号光源中心波长蓝移、采用长波长注入法和采用可编程声光色散滤波器(AOPDF).在再生放大器中加入可调谐空气隙标准具可以用来调制光谱,但该装置调节复杂,而且在“神光 II”千焦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,因而该方法并不适用.使信号光源中心波长蓝移,即相对于增益介质中心波长,使长波长方向具有

较长的脉冲沿,以直接调整光谱,但这种方法对功率超过太瓦的系统也不适用.采用长波长注入法,即利用增益窄化效应来补偿饱和效应的影响,但这将影响到系统的稳定性.采用可编程 AOPDF,能提供较大的增益补偿能力和较大的色散补偿范围.中国工程物理研究院激光聚变中心在国内首次引进 AOPDF 并成功用于百太瓦装置^[4],但 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,而对钕玻璃系统并不适用.同时,为了提高高功率激光脉冲的信噪比,还要求对光谱形状、色散以及相位偏差进行严格控制.为此,我们提出了一种新的光谱整形方法,该方法利用具有特殊结构的多层电介质反射膜组件.由于电介质反射膜可以做到大口径、高损伤阈值^[5-9],其模场分布应由严格模式理论求解^[10],因此,该整形器可以插入放大器链路的任何地方,通过光栅变换其色分辨率可以达 0.1 nm.本文将着重讨论这种光谱整形多层介质膜的结构设计原理,并对其性能进行分析.

^{*} 四川省青年科技基金(批准号 05ZQ026-013)和教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号 NCET-05-0784)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhangbinff@sohu.com

2. 设计原理

假设 n_H 和 n_L 为多层介质膜的高折射率层和低折射率层的折射率,介质膜系两边最外层均为高折射率层,每层的厚度均为 $\lambda_0/4$,则垂直入射时多层介质膜对波长为 λ_0 的入射光的反射率为^[11]

$$R = \left[\frac{1 - (n_H/n_L)^{2m} (n_H^2/n_g)}{1 + (n_H/n_L)^{2m} (n_H^2/n_g)} \right]^2, \quad (1)$$

式中 n_g 为基片的折射率, m 为膜堆周期数. 分析(1)式可知, n_H/n_L 值越大、膜层数越多,则反射率越高. 由此可见,在膜层材料给定的情况下,只要合理地控制膜系的参数,就可以通过设计膜系结构对多层介质膜的反射率进行有效控制.

根据膜系设计的干涉矩阵方法,可得到多层膜系的特性反射率和透射率分别为^[12]

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

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

反射相位为

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

式中 η_0 和 η_K 分别为入射介质和第 K 层介质的光学导纳, B, C 为薄膜组件的特征矩阵元,

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

这里 δ_j 为第 j 层介质的相位厚度,可表示为

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

式中 n_j 和 d_j 分别为第 j 层介质的折射率和厚度, θ_j 为第 j 层介质的光线折射角.

对于标准膜堆,对应于(5)式的基本周期特征矩阵为^[12]

$$M = \begin{pmatrix} \cos(\delta) & i \sin(\delta) \eta_L \\ i \eta_L \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\delta) & i \sin(\delta) \eta_H \\ i \eta_H \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

式中 η_H 和 η_L 分别为多层介质膜的高折射率层和低折射率层的光学导纳. 由于膜层厚度相等(7)式中的所有变量均去掉了角标.

按照 Weinstein 的理论,可通过(7)式估算反射

膜的截止区. 于是, Chebyshev 多项式截止区边界条件可以表示为^[13]

$$\left| \cos^2 \delta_e - \frac{n_H^2 + n_L^2}{2n_H n_L} \sin^2 \delta_e \right| = 1. \quad (8)$$

于是,相应的高反射带边界值 λ_e 可表示为

$$\lambda_e = \frac{2\pi}{\delta_e} \frac{\lambda_0}{4}. \quad (9)$$

根据(8)和(9)式,经过进一步推导可得到高反射带的波长宽度为

$$\Delta\lambda = \lambda_{e2} - \lambda_{e1} = \frac{4\pi\lambda_0 \arcsin\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right)}{\pi^2 - 4\arcsin^2\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right)}. \quad (10)$$

由(10)式表明,高反射带的波长宽度仅与构成多层膜的两种膜料的折射率有关. 材料折射率的比值越大,高反射带就越宽.

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以及提高高功率激光输出脉冲信噪比参数,需要利用光谱整形装置使放大前的脉冲光谱分布在中心波长附近出现凹陷^[14-18]. 为此,可利用上述膜系设计方法设计出一种全新的光谱整形器,该光谱整形器为一种具有特殊结构的多层介质反射镜. 当啁啾脉冲通过光栅等光学色散分光元件时,不同波长的同级主极大光强值将出现在不同的空间方位上. 长波长的衍射角通常更大,而且衍射光场将严格按照波长顺序在空间上线性排开^[19]. 因此,啁啾脉冲经光栅后在像平面上的空间分布即对应于相应的光谱分布. 在实际工作中,可采用具有特定结构的多层介质膜反射镜,对啁啾脉冲经光栅衍射后的空间光强分布进行调制,从而可实现光谱调制. 对于啁啾脉冲放大链路,利用本文提出的光谱整形反射镜可以使啁啾脉冲在光谱中心频率附近出现凹陷. 在实验过程中,通过移动光谱整形器与输入脉冲的相对位置即可调制出所需的脉冲光谱分布,以补偿啁啾脉冲放大过程中的增益饱和和增益窄化效应的影响.

3. 光谱整形多层介质膜的特性计算

针对钕玻璃激光驱动器仅为若干纳米的光谱调制,调制色分辨率(可调制最小波长差)要求达到 0.1 nm. 由光栅色散本领可知,若采用 1740/mm 光栅设计的光谱调制器,其色分辨本领即可达到 0.1

nm/mm,即将 0.1 nm 的波长展开到 1 mm 的空间操作.对于带宽为 12 nm 的啁啾脉冲,对应像面上的光谱整形器膜层结构尺寸约为 120 nm.

图 1 给出了设计得到的可用作光谱整形器的多层介质膜反射镜典型结构示意图.图 1 中的宝塔型结构外侧为高反射膜系,宝塔型结构内侧则为增透膜系结构.高反射膜系结构是为了实现对啁啾脉冲经光栅后的衍射光场进行光强调制,从而达到光谱整形目的,而增透膜系结构是为了增加光谱调制的灵活性而加入的.宝塔型结构的不同台阶所对应反射镜面上的横向空间位置即为利用光谱整形反射镜进行光强调制的空间位置,在结构设计时需要尽可能保证所有反射光同相或反相.设计得到的多层反射膜系的典型结构为 $H31(HL)^m H0.5L2.4H$,即由两层高反介质膜构成 $\lambda/2$ 引导层,一层高反介质膜与一层低反介质膜构成高反射膜系周期, m 为周期数, $H0.5L2.4H$ 是为提高反射膜带宽而设计的.增透膜系的典型结构为 $H(LH)^2 L2$.计算所用参数如下: $\lambda_0 = 1053 \text{ nm}$, $n_H = 1.96$, $n_L = 1.46$, $n_0 = 1$, $n_s = 1.5$.

对于图 1 所示的具有特定结构的光谱整形反射镜的制作,可先在基底材料上均匀镀制增透膜系,然后利用离子束刻蚀数控床根据设计要求刻蚀出如图

1 所示的具有特定结构的宝塔型台阶,最后在宝塔型结构的外侧镀制高反射膜系.

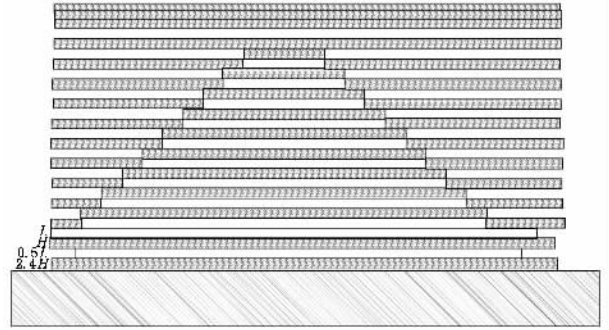


图 1 光谱整形多层介质反射膜典型结构示意图

3.1. 反射调制特性

为了说明光谱整形多层介质反射膜的幅度调制特性,表 1 列出了理想的 $\lambda/4$ 膜系在不同周期数情况下所对应的介质膜反射率.分析表 1 可知,多层介质反射膜的幅度调制随周期数增加是离散变化的.然而,只要合理地选择膜系参数,其反射率是可以有效控制的,且图 1 所示的光谱整形多层介质反射膜结构中的台阶数越多,调制精度就越高.

表 1 多层介质反射膜的幅度调制特性

周期数 m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
反射率/%	19.08	41.30	61.56	76.47	86.18	92.08	95.53	97.49	98.60	99.57

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以及提高输出脉冲信噪比参数,需要利用光谱整形装置使放大前的脉冲光谱分布在中心波长附近出现一定形状的凹陷.根据图 1 所示的多层介质膜系结构,通过选择不同的膜系结构参数可得到如图 2 和图 3 所示的多层介质反射镜的反射率曲线和相应的光谱整形效果.图 2 给出了在像平面中心波长处进行不同深度光谱调制的结果,图 3 给出了在像平面偏离中心波长处进行不同深度光谱调制的结果.图 2 和图 3 中的曲线 a 为输入啁啾脉冲光谱分布,曲线 b 为光谱整形多层介质反射镜的反射调制曲线,曲线 c 为整形后脉冲光谱分布.

从图 2 和图 3 可以看出,通过合理设计膜系结构参数和有效控制加工精度,可使放大前的啁啾脉冲经光谱整形多层介质反射镜反射后,其光谱分布在中心波长附近出现不同调制形状和调制深度的凹

陷,从而可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.

3.2. 光谱特性

图 4 给出了光线垂直入射时,对应于图 1 的多层介质膜系的反射率 R 随膜层周期数 m 和调制波长 λ 的变化曲线.从图 4 可以看出,对于 $\lambda/4$ 膜系,存在一个随着膜层数 m 的增加其反射率稳定增加的区域.由图 4 清晰可见高反射带的存在,相应的波长宽度 $\Delta\lambda$ 由(10)式确定.通常情况下, $\Delta\lambda$ 是有限的,它取决于薄膜高折射率与低折射率的比值.在高反射带的两侧,反射率陡然下降.图 4 中在高反射带的两侧出现调制是由于其他功能膜层引入的调制,而在高反射带的两侧出现不同的振荡频率是由于介质薄膜的高阶振荡特性所引入的,并且短波长端随波长变化振荡强烈,而长波长端随波长变化振荡相对缓慢.在我们设计的光谱整形器中只需要利用高

反射带内有限的带宽,且随着膜层数的继续增加高反射带的宽度变化并不大,只是反射带内的反射率将有所提高.此外,从图 4 还可以进一步看到,当 $m = 0$ 时,中心波长附近的本底反射率约为 40%.因此,只要合理选择多层介质膜系的结构参数,就可有效地控制其反射率分布,并进一步降低本底反射率,从而使其光谱调制度可超过 60%.

进一步利用(10)式计算得出,该反射镜的高反射带的波长 λ 范围为 963—1162 nm,高反射带宽 $\Delta\lambda$ 为 196 nm,完全满足“神光 II”千焦拍瓦改造的技术指标要求.

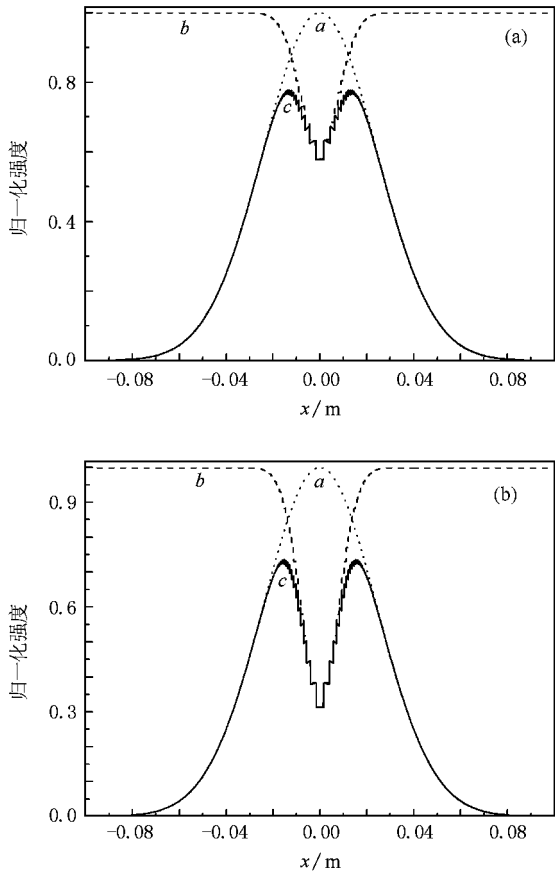


图 2 在像平面中心波长处进行不同深度调制后的光谱 (a)调制度为 40% (b)调制度为 60%

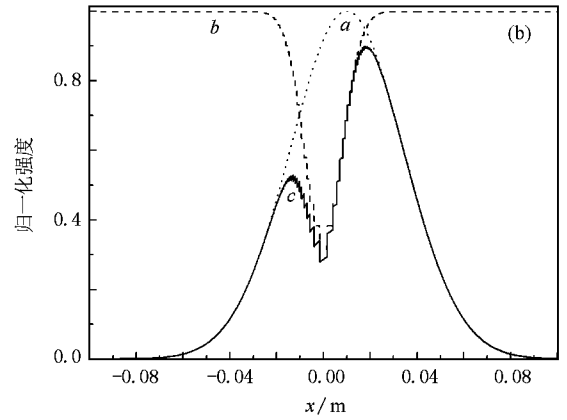
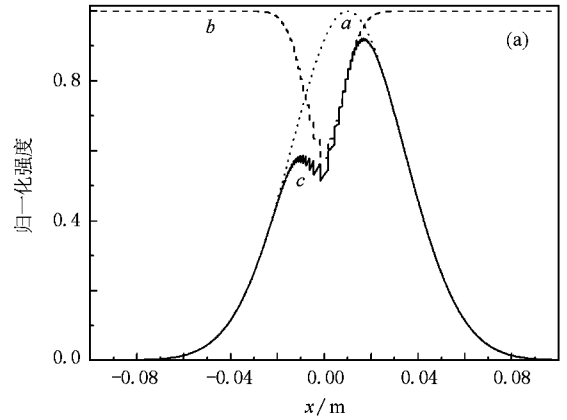


图 3 在像平面偏离中心波长处进行不同深度调制后的光谱 (a)调制度为 40% (b)调制度为 60%

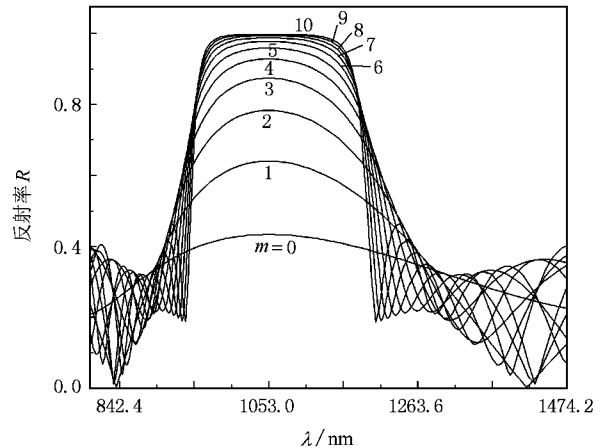


图 4 多层介质反射膜的光谱特性

3.3. 相位调制特性

为了使得在啁啾脉冲放大过程中展宽和压缩保持严格共轭互补,并提高高功率激光脉冲的信噪比,要求严格控制光谱形状及相位偏差.图 5 给出了反射相位随波长的变化曲线.

从图 5 可以看出,多层介质反射镜的反射相位 ϕ 随着膜层周期数 m 和波长 λ 的变化而改变.中心

波长两侧的反射相位变化规律为向短波方向逐渐减小,向长波方向逐渐增加,而且在截止频率附近出现最小值或最大值.此外,在截止频率外出现振荡减小趋势,其特征是向短波方向逐渐在坐标轴下方振荡减小,向长波方向逐渐在坐标轴上方振荡减小.在中心波长附近,随着介质膜层数 m 的增加,反射相位

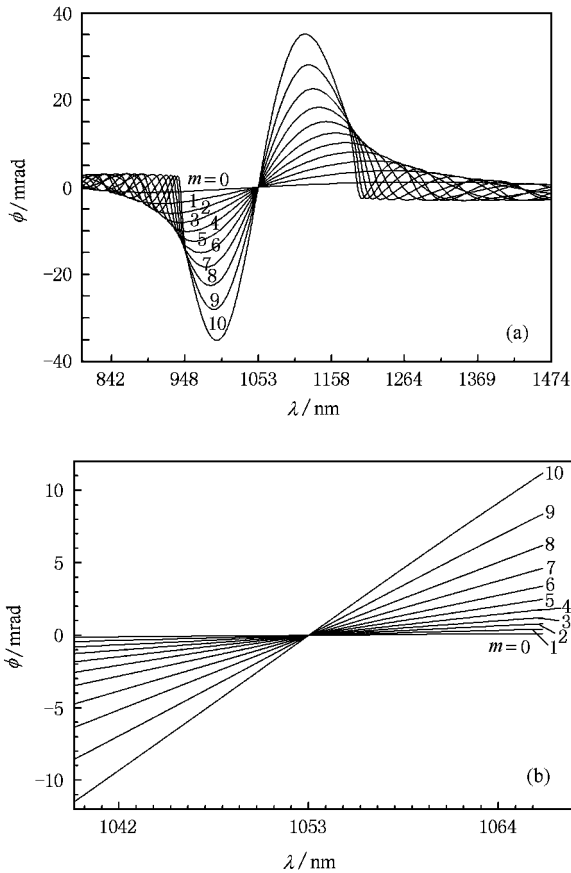


图5 多层介质反射膜的反射相位变化 (a) 全带宽范围内的相位变化 (b) 啁啾脉冲频率宽度范围内的相位变化

变化近似呈线性,且斜率逐渐增大.如果干涉级次为零次,间隔层的厚度仅为 $\lambda/4$,则波长在几十纳米范围内变化时薄膜结构对反射相位的影响很小.进一步从图5(b)可以看出,对于啁啾脉冲波长范围为1040—1066 nm的钽玻璃系统,对应的相位偏差最大值小于12 mrad,相当于 $\lambda/524$.这可以满足“神光II”改造的技术指标要求.

4. 结 论

本文提出了一种光谱整形新方法,利用具有特定结构的多层介质膜反射镜,通过合理的膜系结构设计,可实现对大能量高功率钽玻璃啁啾脉冲放大系统中啁啾脉冲的光谱整形.利用该反射镜可以使啁啾脉冲中心波长附近出现凹陷分布,且在保证反射相位基本不变的条件下其调制幅度可超过60%.由于电介质反射膜可以做到大口径、高损伤阈值,其模场分布应由严格模式理论求解,因此该光谱调制器可以插入到放大器链路的任何地方,且设计能力上的色分辨率可达0.1 nm.针对钽玻璃1053 nm波长设计的反射镜,其高反射带波长宽度为196 nm,对于啁啾脉冲波长范围为1040—1066 nm的钽玻璃系统,对应相位偏差最大值小于12 mrad,相当于 $\lambda/524$.这完全可以满足“神光II”千焦拍瓦改造的技术指标要求.

- [1] Barty C P J, Korn G, Raksi F, Rose-Petruck C, Squier J, Tien A C, Wilson K R, Yakovlev V V, Yamakawa K 1996 *Opt. Lett.* **21** 219
- [2] Cha Y H, Kang Y I, Nam C H 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 1220
- [3] Huang X J, Peng H S, Wei X F, Wang X D, Zeng X M, Zhou K N, Guo Y, Liu L Q, Wang X, Zhu Q H, Lin D H, Tang X D, Zhang X M, Chu X L, Wang Q Y 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1685 (in Chinese) [黄小军、彭翰生、魏晓峰、王晓东、曾小明、周凯南、郭仪、刘兰琴、王道、朱启华、林东晖、唐晓东、张小民、楚晓亮、王清月 2005 强激光与粒子束 **17** 1685]
- [4] Peng H S, Huang X J, Zhu Q H, Wang X D, Zhou K N, Wei X F, Liu L Q, Zeng X M, Wang X, Guo Y, Lin D H, Yuan X D, Xu B, Xu L B, Chu X L, Zhang X M, Qian L J 2005 *Proc. SPIE* **5627** 1
- [5] Fan Z X, Shao J D 2001 *High Power Laser Unit Technique Center Annals* (Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences) Vol10 (in Chinese) [范正修、邵建达 2001 高功率激光物理联合实验室报告(上海:中国科学院上海光学精密机械研究所) **10** 卷]
- [6] Kong W J, Liu S J, Shen Z C, Shen J, Shao J D, Fan Z X 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 552 (in Chinese) [孔伟金、刘世杰、沈自才、沈健、邵建达、范正修 2006 中国激光 **33** 552]
- [7] Liu S J, Ma J Y, Shen Z C, Kong W J, Shen J, Jing Y X, Zhao Y A, Shao J D, Fan Z X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4542 (in Chinese) [刘世杰、麻健勇、沈自才、孔伟金、沈健、晋云霞、赵元安、邵建达、范正修 2007 物理学报 **56** 4542]
- [8] Kong W J, Liu S J, Shen Z C, Shen J, Shao J D, Fan Z X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1143 (in Chinese) [孔伟金、刘世杰、沈自才、沈健、邵建达、范正修 2006 物理学报 **55** 1143]
- [9] Liu S J, Shen J, Shen Z C, Kong W J, Wei Z Y, Jing Y X, Shao J D, Fan Z X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4588 (in Chinese) [刘世杰、沈健、沈自才、孔伟金、魏朝阳、晋云霞、邵建达、范正修 2006 物理学报 **55** 4588]
- [10] Fu K X, Zhang D Y, Wang Z H, Zhang Q Z, Zhang J 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1278 (in Chinese) [傅克祥、张大跃、王植恒、张奇志、张靖 1998 物理学报 **47** 1278]
- [11] Herpin A 1947 *C. R. Acad. Sci.* **225** 182
- [12] Tang J F, Gu P F, Liu X, Li H F 2006 *Modern Optical Thin Film Technology* (Hangzhou: Zhejiang University Press) (in Chinese) [唐

- 晋发、顾培夫、刘旭、李海峰 2006 现代光学薄膜技术(杭州: 浙江大学出版社)
- [13] Weinstein W 1954 *Vacuum* **4** 3
- [14] Chu X L, Zhang B, Cai B W, Wei X F, Zhu Q H, Huang X J, Yuan X D, Zeng X M, Liu L Q, Wang X, Wang X D, Zhou K N, Guo Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4696 (in Chinese) 楚晓亮、张彬、蔡邦维、魏晓峰、朱启华、黄小军、袁晓东、曾小明、刘兰琴、王道、王晓东、周凯南、郭仪 2005 物理学报 **54** 4696
- [15] Zhang B, Lü B D 1997 *Chin. J. Lasers* **24** 495 (in Chinese) 张彬、吕百达 1997 中国激光 **24** 495
- [16] Zhang B, Lü B D 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1 [张彬、吕百达 1998 物理学报 **47** 1]
- [17] Wang T, Fan D Y 1999 *High Power Laser and Particle Beams* **11** 139 (in Chinese) 王韬、范滇元 1999 强激光与粒子束 **11** 139
- [18] Chu X L, Zhang B 2004 *Acta Photon. Sin.* **33** 641 (in Chinese) [楚晓亮、张彬 2004 光子学报 **33** 641]
- [19] Born M, Wolf E 1980 *The Principle of Optics* (New York : Pergamon Press)

Multilayer dielectric thin film reflector for spectrum reshaping of chirped pulse laser in Nd :glass chirped pulse amplification system *

Li Ming^{1)†} Zhang Bin^{1)†} Dai Ya-Ping²⁾ Wang Tao²⁾ Fan Zheng-Xiu³⁾ Huang Wei⁴⁾

1) College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

2) Shanghai Institute of Laser and Plasma, 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 610209, China)

(Received 10 November 2007 ; revised manuscript received 4 March 2008)

Abstract

In order to compensate for the gain narrowing and gain saturation effects, and also to improve the signal to noise ratio of the output high-power laser pulse, lots of attention have been paid to the spatial distribution, the temporal profile, as well as the spectrum reshaping in the design of kilo-joule peta-watt chirped pulse amplification (CPA) systems. In this paper, a new method for the spectrum reshaping is proposed, which utilizes a multilayer dielectric thin film reflector with specific construction to realize the spectrum reshaping of the chirped pulse laser in large energy and high power Nd :glass CPA system. The results show that the reflectivity distribution of the multilayer dielectric film reflector can be controlled effectively only if the parameters of the thin film reflector are chosen appropriately. The spectrum modulation ratio can be varied over 60% under the condition that the phase of the reflecting light remains nearly constant. The thin film reflector designed for spectrum reshaping of the Nd :glass CPA system with the central wavelength of 1053 nm exhibits a bandwidth of reflect light of 196 nm, the chromatic resolving capability of about 0.1 nm and the phase aberration in the range of the tens of nanometer of up to 12 mrad, which can meet the requirement of the "Senguang-II" kilo-joule peta-watt reconstruction project.

Keywords : multilayer dielectric film, spectrum reshaping, kilo-joule peta-watt, chirped pulse

PACC : 4225, 2410H, 7755, 0365G

* Project supported by the Outstanding Young Researchers Foundation of Sichuan Province, China (Grant No. 05ZQ026-013) and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education, China (Grant No. NCET-05-0784).

† Corresponding author. E-mail : zhangbinff @sohu.com