

文章编号: 0258-702X(2002)03-0213-05

# 用于飞秒脉冲激光腔内的啁啾镜的优化设计

赵江山, 张志刚, 柴路, 王清月

(天津大学精仪学院超快激光研究室, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

**提要** 介绍了啁啾镜的基本原理和优化设计思想, 阐述了优化设计的基本过程, 并通过计算机优化计算了啁啾镜设计。具体分析了影响啁啾镜色散补偿特性的几个主要因素, 如色散量、色散带宽、膜层数以及膜层的厚度变化对啁啾镜光学特性造成的影响。其中色散量的控制和色散带宽的选择是最重要的优化设计指标。

**关键词** 啁啾镜, 飞秒激光脉冲, 群延迟色散

中图分类号 TN 243 文献标识码 A

## Optimum Design of Chirped Mirror in the Femtosecond Pulse Laser Cavity

ZHAO Jiang-shan, ZHANG Zhi-gang, CHA Lu, WANG Qing-yue

(Ultrafast Laser Lab, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, and Key Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072)

**Abstract** This paper introduced the basic theory and the design method of chirped mirrors. The influence of some main factors, such as the group delay dispersion (GDD), the bandwidth of GDD, the thin film numbers and the thickness error of a single thin film on the dispersion characteristics of chirped mirror is analyzed. The choice of the GDD and the range of GDD are the key for optimum design.

**Key words** chirped mirror, femtosecond laser pulse, group delay dispersion

## 1 引言

人们通过大量的理论和实验研究发现, 激光腔内色散量的控制是锁模激光系统中超短激光脉冲形成的关键因素。1984年, Fork等<sup>[1]</sup>提出棱镜对可以作为色散补偿元件用于补偿色散。棱镜对的引入, 提供了可调谐的负的群延迟色散, 使之较好地补偿腔内来自于增益介质的正色散, 以获得脉冲宽度尽量窄的激光脉冲。

尽管利用棱镜对可以较好地补偿群延迟色散(GDD), 但是增益介质及棱镜材料自身的高阶色散并未得到充分补偿, 这成了脉冲进一步压缩的严重障碍。同时, 随着脉宽的变窄, 谱带宽度增宽, 原有的色散补偿元件无法在宽谱带范围内对各阶色散进

行完善的补偿。所以寻找一种新型的色散元件就成为飞秒激光技术领域中备受关注的研究课题。

1986年, 日本电子技术综合研究所的山下干雄等提出了双膜系反射镜的概念<sup>[2]</sup>。利用两个中心波长不同的膜系对不同中心波长的反射, 使不同的波长获得不同的延迟, 即可得到正负、大小可调的色散。1994年, 匈牙利固体物理研究所的R. Szipocs和奥地利维也纳大学的F. Krausz等提出了啁啾反射镜(chirped mirror)的概念<sup>[3,4]</sup>。即把更多不同中心波长的反射膜叠加在一起, 形成“多膜系反射镜”。1997年, 瑞士联邦工业大学的U. Keller等提出了双啁啾镜的思想, 在原有啁啾镜高低折射率布喇格层对的中心波长产生变化的同时, 高折射率层的厚度也相应地调制变化, 形成所谓“双啁啾”。“双啁啾”

收稿日期 2001-06-17; 收到修改稿日期 2001-10-10

基金项目 教育部高等学校骨干教师资助计划、天津市自然科学基金(020-413188)、国家重点基础研究专项经费、国家“九五”攀登计划、教育部重点科学基金资助课题。

作者简介 赵江山(1974—)男, 满族, 现于天津大学精密仪器与光电子工程学院攻读博士学位。主要研究方向为超短脉冲激光技术、可调谐自启动飞秒钛宝石激光器、半导体材料与器件、啁啾脉冲放大器。E-mail: zjstj@263.net

的引入使膜层间阻抗匹配情况得到了较好的解决,群延迟色散曲线的振荡趋缓<sup>[5]</sup>。啁啾镜的特殊设计既可以使腔内高阶色散的平衡变得更加有效,也可以保证镜子本身的高反射率,并且在较宽的波段范围内都具有所需要的群速度色散(GVD)补偿量,因此使得它能够在较宽的光谱范围内获得比较完善的色散补偿,从而支持更短激光脉冲的形成。由于啁啾镜可与腔镜结合起来,并可利用多次反射使腔内元件相对减少,从而使整个腔的尺寸大大减小。这是啁啾镜优于棱镜对的突出特点。现在已经可以利用啁啾镜结合棱镜对共同补偿色散得到4.8 fs的超短脉冲<sup>[6]</sup>。由于受到仪器设备精度和加工工艺等条件的限制,目前在国内还无法完全利用现有条件加工和制作啁啾镜。本文旨在通过对于飞秒脉冲激光腔内的啁啾镜优化设计过程的阐述,了解啁啾镜补偿色散的基本工作原理和设计思想,同时定性分析了影响啁啾镜光学特性的几个重要因素。

## 2 啁啾镜优化设计的基本原理

传统的介质膜镜是按照四分之一波长膜系镀制的,它可以提供最高的反射率。所谓啁啾镜就是要在特定的基底上交替地镀上不同折射率的膜层,并且膜层的厚度也会由于提供色散补偿的不同而形成变化,如图1所示。然而单纯线性地改变膜层厚度,会使光波在膜层间传输形成法布里-珀罗(F-P)效应,即长波长分量在深入膜层底部返回后,由于表层膜层一定的反射带宽,又被表层的膜层所反射,因而使得长波长分量在膜层间振荡,最终使色散曲线形成振荡,导致色散补偿不充分,甚至形成脉冲分裂。为了得到高反射率膜层,不一定非要使每个膜层的厚度都等于四分之一波长,而只要它们的综合效果形成高反膜系。

改变膜层的共振波长,在整个反射镜保证高反射率的同时,又能够为不同的波长提供足够的色散量,其实质是反射镜和色散元件的统一。固定的群延迟色散要求必须保证群延迟时间(穿透深度)和波长的近似线性变化,群延迟色散量的大小受到群延迟时间长短的限制,最大的群延迟来自于反射带宽范围内两边界极限波长的光在啁啾镜内传输的时间差异,最大的群延迟色散等于最大的群延迟时间与镜子带宽的比值,群延迟色散的正负则是通过设计啁啾镜膜层自衬底向空气表面厚度的变化趋势所决定。向表面逐渐变薄的膜层使得长波长光行程长,

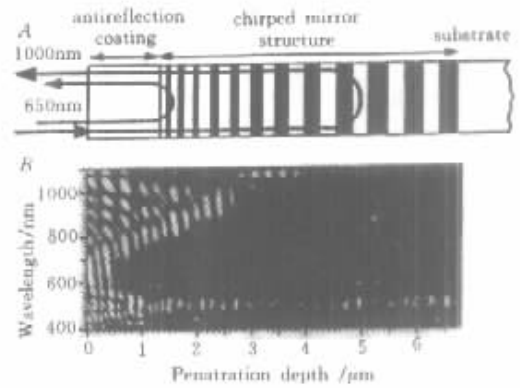


图1 啁啾镜结构原理图

Fig.1 Schematic structure of chirped mirror

短波长光行程短,群延迟的变化形成负的群延迟色散,反之则形成正的群延迟色散。与传统的棱镜对相比,啁啾镜可以通过自由设计指标对腔内的三阶色散进行较好的补偿,这主要取决于群延迟曲线斜率的变化趋势,而棱镜对中三阶色散的产生则由所选用材料的参数和运转波长所决定。对于钛宝石激光器而言,一旦材料选定,高阶色散带来的影响便不可避免。

啁啾镜自身最主要的缺点是所能提供的色散量比较小,以至于必须经过多次反射才能得到补偿。这样做不但会引入较大的损耗,而且会使激光系统的结构也变得更加复杂,这对于使用较长增益介质的高功率激光系统显然是不适用的。增加膜层厚度可以增加群延迟的大小,进而增加色散量的大小,但是过厚的膜层会导致制造工艺复杂,成本也会显著提高,同时膜层间应力的影响还易使膜层出现卷翘变形甚至脱落。啁啾镜的另外一个缺陷是一旦镜子制成,色散量便固定下来不可调整,所以有时需要与棱镜对共同使用以增强调整灵活性,提供稳定连续可变的色散补偿。

啁啾反射镜的特性严格依赖于实际可以达到的对于不同波长分量的穿透深度的控制精度。对于线性啁啾反射镜,穿透深度的控制精度受不充分的界面反射所影响(类F-P效应),这些反射导致很多具有相当强度的部分反射、透射光。它们的谐振相干对镜子的色散曲线有很大的影响,形成振荡型曲线。这个问题可以用一系列中心波长逐渐变化的窄带滤波器来解决<sup>[7]</sup>。每个滤波器都由多于两层的膜构成高反射层,这样一个多带滤波器可以用正弦调制函数的周期来构成,最终使所有的抛射带合并,从而形成一个连续宽带的反射镜。层厚度的变化可以用一

个一般表达式来描述

$$t(x) = t_0(x) + A(x) \sin\left(2\pi \frac{x}{\Lambda(x)}\right) \quad (1)$$

其中  $x$  为从衬底到该层的距离,而在一个周期内的层数  $\Lambda(x)$  必须是一个固定的数,即

$$\Lambda(x) = \alpha t_0(x) \quad (2)$$

参数  $\alpha$  决定一个周期内的层数,一般定为 5,即最小允许值,这些参数取决于要求的反射带宽以及相对于频率的群延迟

$$t_0(x) = \frac{1}{4} \left( \frac{\lambda_{\min} - \lambda_{\max}}{d} x + \lambda_{\max} \right) \quad (3)$$

$d$  为膜层总厚度,  $d \geq d_1 = |\tau(\nu_{\max}) - \tau(\nu_{\min})| \frac{c}{2}$ , 而且  $|\tau(\nu_{\max}) - \tau(\nu_{\min})| = 2\pi |D| (\nu_{\max} - \nu_{\min})$ ,  $D$  为群延迟色散量,但是这样设计镜子的一个严重问题是如何让最短的波长获得足够的负色散。这是因为最短的波长穿透深度最小,容易导致一个固定的延迟。这个问题可以用调制深度随距离逐渐加大的方法来处理

$$A(x) = \frac{A_2 - A_1}{d} x + A_1 \quad (4)$$

以上(1)~(4)式就是用于啁啾反射镜设计的基本公式。

值得注意的是这样设计的啁啾反射镜仍然近似于线性啁啾膜层,它的延迟是线性的,仅仅是消除了振荡,同时总的延迟与总的膜层厚度有关,它的群延迟色散一般只有几十  $\text{fs}^2$ ,所以若想得到更多的延迟,就必须增加总的膜层厚度。

### 3 啁啾镜优化设计的数值结果

设计啁啾镜的主要思想为利用以上介绍的方法,采用多个窄带滤波器的叠加实现宽带高反射率,即在啁啾镜的膜层上叠加一个准周期性的调制消除振荡,通过计算机优化得到最佳的膜层结构。

在优化设计中,我们发现啁啾镜的反射带宽、色散带宽和群延迟色散量是影响啁啾镜特性的最重要因素。根据钛宝石的色散曲线特性,为了补偿高阶色散,群延迟色散曲线设计成在一定范围内与波长成正比。群延迟色散曲线的平滑是实现较为固定群延迟色散的保障,更宽的色散带宽可使色散补偿的范围加大,增大啁啾镜的适用范围。这些因素之间的相互平衡和优化最终决定了啁啾镜的设计质量。而镀膜工艺和实际加工精度的控制则是能否实现设计要求的關鍵因素。

#### 3.1 色散量的选择

图 2(a)反映了设计的啁啾镜色散量大小对优化结果的影响。保持镜子的反射带宽和色散带宽不变(反射带宽:750~950 nm,色散带宽设计:700~900 nm),膜层数为 54 层,只改变镜子色散量的大小。可以看出色散曲线的振荡程度发生了变化。在群延迟色散量为  $-110 \text{ fs}^2$  左右时,可以得到较为平滑的色散曲线,其相应的三阶色散也较为稳定。而当色散量为  $-95 \text{ fs}^2$  时,色散曲线出现振荡,这是色散量与色散带宽匹配失衡造成的结果。说明在一定的色散带宽范围内,最大的群延迟色散等于最大的群延迟时间与镜子色散带宽的比值,所以色散量的选择也就相应地固定在一个较小的范围内。

#### 3.2 色散带宽的影响

啁啾镜的色散带宽对优化设计结果的影响见图 2(b)。保持镜子的反射带宽和色散量不变(反射带宽:700~900 nm,群延迟色散量为  $-115 \text{ fs}^2$ ),膜层数为 54 层,仅仅改变镜子色散带宽的范围,从图中可以看出色散带宽范围的变化直接影响到色散曲线的振荡程度。镜子色散带宽为 160 nm 时,色散曲线会产生较为严重的振荡;当色散带宽降为 120 nm 以下时,色散曲线明显地变得平滑了许多。所以在提供较高色散量的情况下,啁啾镜自身无法在较宽的色散范围内提供色散补偿,一定的色散带宽与一定的色散量是相互依赖的,二者是相互制约的。

#### 3.3 膜层数的影响

图 2(c)是膜层数对优化设计的影响。反射带宽、色散带宽和色散量均不变(反射带宽:700~900 nm,色散带宽:735~865 nm,群延迟色散量为  $-115 \text{ fs}^2$ ),改变镜子镀膜的层数。可以看出膜层数的多少会影响到色散曲线的振荡程度。随着膜层数的增加,群延迟时间增长,在固定的色散带宽内就可以产生更大的群延迟色散。所以在满足一定群延迟色散量的情况下,色散带宽的限制会相应减弱,从而使曲线的振荡明显减小。

#### 3.4 膜层厚度误差的影响

保持镜子的反射带宽和色散带宽不变(反射带宽:700~900 nm,色散带宽:750~850 nm),镜子色散量大小为  $-60 \text{ fs}^2$ ,膜层数为 54 层。只随机改变每层膜的厚度,变化范围分别为 0.5% 和 1%。结果见图 2(d)。从图中可以看到每层膜相对厚度变化会直接影响到色散曲线的振荡程度。当膜层厚度变化范围为 0.5% 时,色散曲线还保持基本平滑,但是曲线变化趋势渐缓(斜率减小),所以三阶色散量变小;

而当膜层厚度变化范围为 1% 时,色散曲线则出现了明显的振荡起伏。因此为了保证色散曲线的平滑,膜层厚度的变化必须小于 1%。所以在实际加

工过程中,膜层精度的控制对啁啾镜的特性会产生很大的影响,这也是具体加工过程中亟待解决的一个问题。

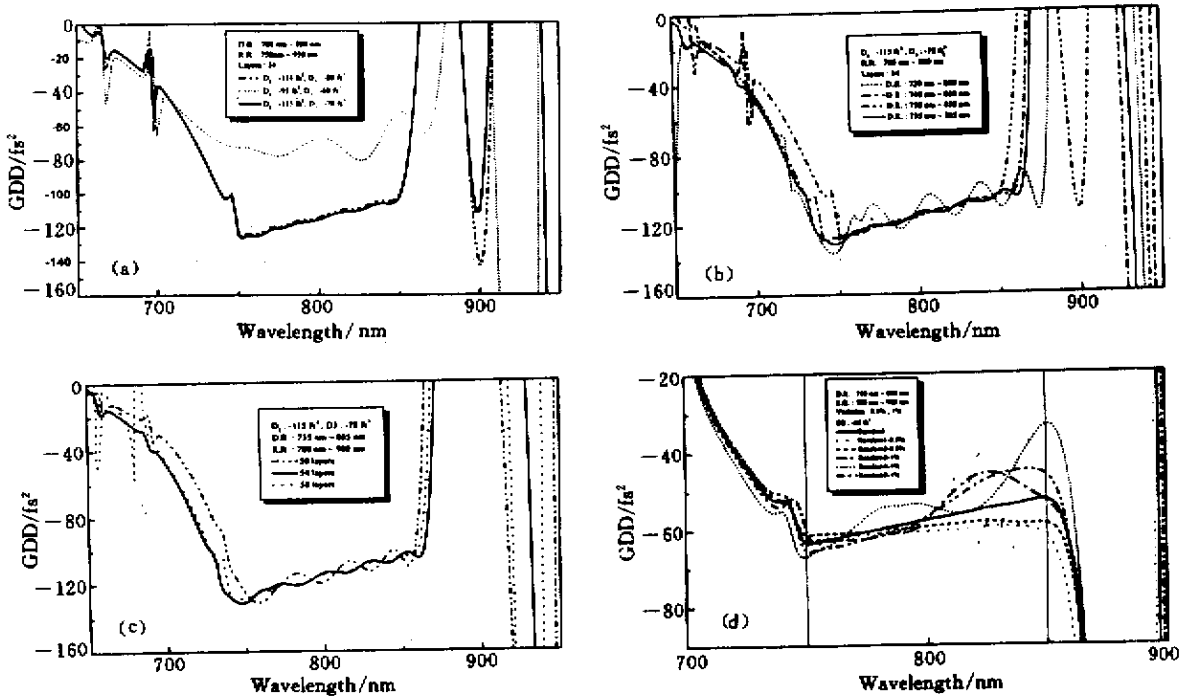


图 2 群延迟色散目标量的变化 (a)、色散带宽的变化 (b)、膜层数的变化 (c) 及膜层厚度误差的变化 (d) 对啁啾镜群延迟色散的影响

Fig. 2 GDD dependence on the designed GDD (a), designed band width for given GDD (b), designed layer numbers for given GDD (c) and error in layer thickness for given GDD (d)

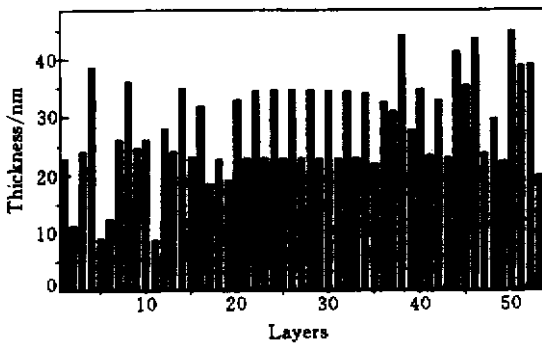


图 3 啁啾镜膜层厚度变化结构示意图

Fig. 3 Schematic of the thickness variation with layers in chirped mirror

根据优化设计的结果,在实际的啁啾镜加工过程中采用了以下的主要参数:镀膜总层数为 54 层,镀膜材料高折射率层  $TiO_2$ , 折射率为 2.0938,低折射率层  $SiO_2$ , 折射率为 1.4692,衬底硅折射率为 1.52;

总反射率超过 99.5%,对于色散优化的中心波长为 800 nm,反射带宽 650 ~ 950 nm;可提供的单次优化二阶色散量为  $-40 fs^2$ ,色散带宽 700 ~ 900 nm,图 3 即为实际的啁啾镜膜层变化结构示意图。图中第一层为与空气接触层,依次类推,最后一层为自衬底向上第一层。从图中可以看出膜层厚度是随机变化的。

### 4 结 论

综上所述,我们分析讨论了啁啾镜设计过程中影响啁啾镜光学特性的几个重要因素。色散量和色散带宽是影响啁啾镜光学特性的一对最重要因素,它们相互制约,相互平衡,为啁啾镜的光学色散补偿提供根本的保障。膜层数的变化直接影响着实际可提供的色散量的大小,越多的膜层会产生越大的群延迟时间,随着各种色光时间上的离散便得到了相应的群延迟色散,所以色散量的大小与膜层数直接

相关,呈正比关系。但是过多的膜层数又会增加镀膜难度,使啁啾镜膜层在应力下卷翘变形。膜层厚度的变化也会直接影响色散曲线形成振荡,因此对镀膜加工精度的要求很高。啁啾镜的优化设计是多种因素的共同作用,在提高加工精度的同时,改进优化方法,增强实际的可操作性,降低加工难度,将会使啁啾镜的优化设计加工更加完善易行。

参 考 文 献

1 R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon. Negative dispersion using pairs of prisms[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(5): 150 ~ 152  
 2 M. Yamashita, M. Ishikawa, K. Torizuka *et al.*. Femtosecond-pulse laser chirp compensated by cavity-mirror

dispersion[J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(8) 504 ~ 506  
 3 R. Szipöcs, K. Ferencz, Ch. Spielmann *et al.*. Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3) 201 ~ 203  
 4 A. Stingl, M. Lenzner, Ch. Spielmann *et al.*. Sub-10-fs mirror-dispersion-controlled Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6) 602 ~ 604  
 5 F. X. Kärtner, N. Matuschek, T. Schibli *et al.*. Design and fabrication of double-chirped mirrors[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11) 831 ~ 833  
 6 D. H. Sutter, G. Steinmeyer, L. Gallmann *et al.*. Semiconductor saturable-absorber mirror-assisted Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser producing pulses in the two-cycle regime[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(9) 631 ~ 633  
 7 Gabriel Tempea, Ferenc Krausz, Christian Spielmann *et al.*. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, **4**(1):193 ~



来 函 照 登

更正 2001 年 10 月贵刊发表的《一种新型有机染料 HEASPS 的激光上转换性质和光限幅性质》周广勇等, Vol. A28, No. 10, 901 ~ 904)中,由于作者不慎,将该样品的部分光谱数据与另一个样品的光谱数据搞混,今在此更正。

文中部分数据作相应更改:

1) 中、英文摘要和结论部分将 626 nm 改为 624 nm;

2) 3.1 HEASPS 的线性光学性质 第一段中,单光子吸收峰 476 nm 改为 487 nm,吸收峰覆盖范围 350 ~ 600 nm 改为 400 ~ 600 nm, 700 ~ 1200 nm 改为 800 ~ 1200 nm。

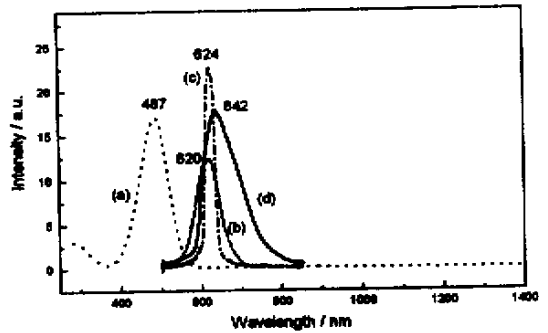


图4 HEASPS/DMF 溶液的线性吸收谱(a),单光子荧光谱(b),上转换激光光谱(c)和双光子荧光谱(d)。测试(a)(b)谱线时溶液的浓度为  $1 \times 10^{-5}$  mol/L,测试(c)(d)谱线时溶液浓度为  $5 \times 10^{-2}$  mol/L

Fig. 4 Linear absorption spectra (a), single-photon induced fluorescence spectra(b), two-photon induced lasing spectra (c) and two-photon induced fluorescence spectra (d) of HEASPS in DMF. The concentration for (a),(b) is  $1 \times 10^{-5}$  mol/L, for (c),(d) is  $5 \times 10^{-2}$  mol/L

作者:周广勇  
 2002 年 1 月 28 日