

文章编号: 1001-3806(2005)02-0172-04

## 边界条件对后端镀膜啁啾镜特性的影响分析

于云龙<sup>1</sup>, 穆参军<sup>1</sup>, 白晋涛<sup>1</sup>, 侯 洵<sup>1,2</sup>

(1. 西北大学 光子学与光子技术研究所 光电子技术省级重点实验室, 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:** 应用耦合模方程对光波在后端镀膜啁啾反射镜中的传播规律进行分析计算, 在分析的过程中加入了边界条件的影响, 推导出后端镀膜啁啾反射镜在理想情况下的反射率和穿透深度的解析表达式。分析和计算的结果都表明, 考虑了边界条件后, 对光波在后端镀膜啁啾反射镜中传输规律的描述更加完整, 对后端镀膜啁啾反射镜的主要特性的分析计算更为精确。

**关键词:** 后端镀膜啁啾反射镜; 耦合模方程; 边界条件; 穿透深度; 群延迟色散

**中图分类号:** TN243; O484.1 **文献标识码:** A

## Analysis of the boundary conditions' effect on the features of back-side-coated chirped mirror

YU Yun-long<sup>1</sup>, MU Can-jun<sup>1</sup>, BAI Jin-tao<sup>1</sup>, HOU Xun<sup>1,2</sup>

(1. Provincial Key Laboratory of Photoelectronic 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:** The analytical expressions of reflectance and penetration depth of a light beam transmitted in the back-side-coated chirped mirror are obtained through couple-mode equations with boundary conditions. The result shows that it is more integrated and precise in calculating and analyzing the light's transmission rule in the BASIC mirror after taking boundary conditions into consideration.

**Key words:** back-side-coated chirped mirror; couple-mode equations; boundary conditions; penetration depth; group-delay dispersion

### 引 言

超快超短脉冲技术是当今激光技术的一个热点。在超快激光技术的发展过程中, 啁啾反射镜的发明具有里程碑的作用。啁啾反射镜的基本组成是两种具有不同折射率的介质材料, 一种折射率高, 一种折射率低。根据不同的实际情况的要求, 用这两种材料在基底上蒸镀形成一个膜系, 因为这个膜系对不同的频谱成分的穿透深度不同, 从而针对不同成分提供不同的群延迟色散, 以此来补偿腔内的色散<sup>[1]</sup>。

回顾超短脉冲技术发展的过程可以发现, 超短脉冲技术发展的每一次进步, 都伴随着色散补偿方法的改进。早期, 人们采用镀银高反镜和棱镜对作为色散补偿元件首次产生低于 10fs 的光脉冲。然而, 由于棱镜对不能有效地补偿腔内的高阶色散, 使得产生低于

8.5fs 的光脉冲成为一个难点。啁啾镜的发明使高阶色散得到很好的补偿, 因而, 在超短脉冲激光技术中得到广泛应用。当前, 低于 10fs 的光脉冲无一例外的采用啁啾镜作为色散补偿元件<sup>[1~3]</sup>。

啁啾镜必须满足两个基本要求: 首先能够根据设计要求对腔内不同的频率成分提供不同的群延迟色散, 本质上是使各个频率成分之间的穿透深度不同。其次在一个很宽的频带范围内对各个频率成分具有高的反射率, 保证原来的频谱成分经过啁啾镜反射后不会发生频谱丢失。

在实际应用的过程中发现, 啁啾镜结构中, 由于膜系材料和周围环境之间存在阻抗不匹配, 导致色散量在目标函数附近产生震荡。这就影响了啁啾镜在实际中的应用。为了解决这个问题, MATUSCHEK, GALLMANN, SUTTER 等人设计出了后端镀膜的啁啾镜, 此设计有效地解决了膜系与周围环境之间的阻抗匹配问题, 而且镜体结构也简化了许多。关于后端镀膜啁啾镜的阻抗匹配问题他们已经作了深入的探讨<sup>[4]</sup>, 作者欲在此基础上加入边界条件的影响, 对其它的几个特

作者简介: 于云龙 (1979-), 男, 硕士, 现从事瞬态光学与超快现象领域的研究。

E-mail: rakio\_yu@hotmail.com

收稿日期: 2004-03-08; 收到修改稿日期: 2004-04-19

性做一简要分析。

### 1 后端镀膜啁啾镜简介

传统啁啾镜的结构可分为 3 个基本组成部分:基底 (substrate), 啁啾膜系 (chirped mirror structure, 即 CM structure), 增透膜 (anti-reflection coating, 即 AR coating)。而后端镀膜的啁啾镜 (back-side-coated chirped mirror 即 BASIC mirror) 的基本结构是: 啁啾膜系, 基底, 增透膜<sup>[1,4]</sup>。其剖面图如图 1 所示。

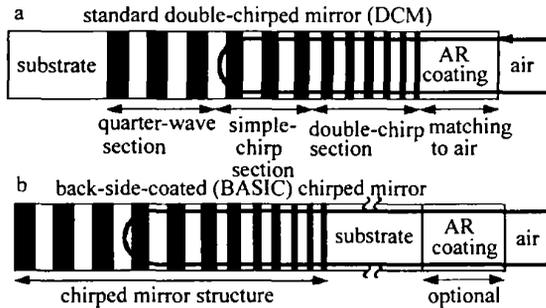


Fig 1 Scheme of standard double-chirped mirror a (DCM) and back-side-coated b (BASIC) mirror

在啁啾镜结构中, 啁啾膜系与外界介质 (主要是空气) 之间有严重的阻抗不匹配。为了消除其影响, 人们采用了双啁啾技术 (double-chirping technique) 和在膜系上镀增透膜, 然而, 由于增透膜与外界介质和啁啾膜系之间难以避免的阻抗失配, 使得此问题只能得到部分解决。

后端镀膜的啁啾镜把啁啾膜系和增透膜蒸镀在基底的异侧, 在几何位置上把这两部分分开, 消除了这两部分之间的相互干扰。选择基底材料的折射率与啁啾膜系中折射率较低的材料折射率接近, 就很好地消除了两部分之间折射率的不连续, 从而实现了阻抗的匹配, 消除了色散振荡。在后端镀膜的啁啾镜中, 增透膜层的作用已降低到仅仅是用来消除额外的镜面反射损失, 而不是作为一种消除色散振荡的不可或缺的一部分<sup>[4,5]</sup>。

## 2 理论分析与计算

### 2.1 耦合模方程

一系列波在周期性变化的介质中的传播行为可以用耦合模方程来描述<sup>[7]</sup>。过程如图 2 所示。

如假定波的形式为  $E_{(z)} = E_0 \exp(i\beta z)$ 。规定沿  $z$  轴正方向 (右方) 为正, 记  $E_{(z)}^+ = E_0 \exp(i\beta z)$  为向右传播的波,  $E_{(z)}^- = E_0 \exp(-i\beta z)$  为向左传播的波, 其中  $E_0$  为振幅,  $\beta = \bar{n}k + i\alpha$  为传输常量,  $\alpha$  是损耗系数,  $z$  是位移坐标。波在介质中的传播可以用下列方程描述:

$$\begin{bmatrix} E_{(z)}^+ \\ E_{(z)}^- \end{bmatrix} = M_{(z, z_0)} \begin{bmatrix} E_{(z_0)}^+ \\ E_{(z_0)}^- \end{bmatrix}, M_{(z, z_0)} \text{ 称为传输矩阵。在折射}$$

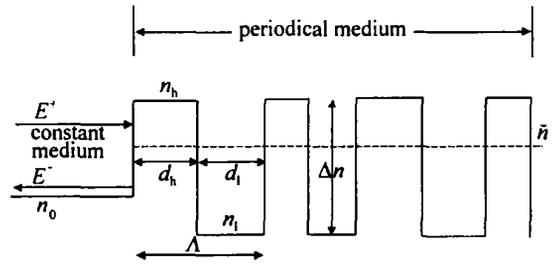


Fig 2 Scheme of a light beam transmits from an unperturbed medium to a periodic medium

率恒定无变化的介质中, 传输矩阵只是传输常量  $\beta$  的函数, 其形式如下:  $M_{(z, z_0)} = M(\Delta z) = \begin{bmatrix} \exp(i\beta \Delta z) & 0 \\ 0 & \exp(-i\beta \Delta z) \end{bmatrix}$ ,  $\Delta z = z - z_0$ 。而在折射率周期性扰动变化的介质中, 耦合模方程的形式通常写为:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E^+ \\ E^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\beta & k \exp[i \frac{2\pi}{\Lambda} (z - s)] \\ k \exp[-i \frac{2\pi}{\Lambda} (z - s)] & -i\beta \end{bmatrix} \times$$

$\begin{bmatrix} E^+ \\ E^- \end{bmatrix}$ , 式中,  $k$  是耦合系数,  $\Lambda$  是等效周期,  $s$  是选取在周期性介质中的参考点, 一般选取折射率变化为正值点。在知道了具体问题的参量后, 就可以根据实际的要求求解出耦合模方程的解<sup>[4~6]</sup>。

### 2.2 考虑到边界连续性条件影响的耦合模方程

在波经由两个毗邻介质中的一个入射到另一个时, 入射波和衍射波的振幅不是跃变的, 而是有一定的关联, 即存在延续性。这就是考虑边界连续性条件的理论依据。设基底介质的参量为  $E_0, n_0, \beta_0$ , 啁啾镜结构的参量为  $E_j, \bar{n}_j, \beta_j, k_j, \Lambda_j$ 。在基底中波的耦合模方程为:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\beta_0 & 0 \\ 0 & -i\beta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} \quad (1)$$

啁啾镜结构中, 波的耦合模方程为:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\beta_j & k_j \exp[i \frac{2\pi}{\Lambda_j} (z - s)] \\ k_j \exp[-i \frac{2\pi}{\Lambda_j} (z - s)] & -i\beta_j \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

$j$  是一个正整数, 它代表了啁啾镜结构中对称单元的数量。设  $z = z_1$  是基底层与啁啾镜结构层交界点的坐标, 因为啁啾镜结构要保证具有高的反射率, 所以, 啁啾镜结构第 1 层的折射率要比基底材料的折射率高 (类似于多层高反膜)。这样, 选取此点作为参考点, 则有  $s = 0$ 。取  $j = 1$ , 计算波从基底进入第 1 个对称单元时的表达式。即上式变为:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\beta_1 & k_1 \exp(i\frac{2\pi}{\Lambda_1} z_1) \\ k_1 \exp(-i\frac{2\pi}{\Lambda_1} z_1) & -i\beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (3)$$

并且在  $z = z_1$  处,波的传播满足振幅连续性条件<sup>[6,7]</sup>:

$$E_0^+ + E_0^- = E_1^+ + E_1^- \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2\beta_0} \begin{bmatrix} \beta_0 + \beta_1 - ik_1 \exp(-i2\pi z_1 / \Lambda_1) & \beta_0 - \beta_1 - ik_1 \exp(i2\pi z_1 / \Lambda_1) \\ \beta_0 - \beta_1 + ik_1 \exp(-i2\pi z_1 / \Lambda_1) & \beta_0 + \beta_1 + ik_1 \exp(i2\pi z_1 / \Lambda_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (6)$$

和光波经由啁啾镜结构传播到基底介质时光波振幅之间的联系方程:

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2\beta_0} \begin{bmatrix} \beta_0 + \beta_1 + ik_1 \exp(i\frac{2\pi}{\Lambda_1} z_1) & \beta_0 - \beta_1 + ik_1 \exp(i\frac{2\pi}{\Lambda_1} z_1) \\ \beta_0 - \beta_1 - ik_1 \exp(-i\frac{2\pi}{\Lambda_1} z_1) & \beta_0 + \beta_1 - ik_1 \exp(-i\frac{2\pi}{\Lambda_1} z_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (7)$$

由(1)式可解得光波在基底介质中的耦合模方程:

$$\begin{aligned} \frac{dE_0^+}{dz} &= i\beta_0 E_0^+ & \frac{dE_0^-}{dz} &= -i\beta_0 E_0^- \\ E_0^+ &= \exp(i\beta_0 \Delta z) & E_0^- &= \exp(-i\beta_0 \Delta z) \end{aligned} \quad (8)$$

由(3)式解得光波刚入射到啁啾镜中传播时的耦合模方程:

$$\begin{bmatrix} \exp\left(i\frac{\pi}{\Lambda_1} \Delta z\right) [\Gamma_1 \cosh(\Gamma_1 \Delta z) + i\delta_1 \sinh(\Gamma_1 \Delta z)] & \exp\left[i\frac{\pi}{\Lambda_1} (z + z_1)\right] k_1 \sinh(\Gamma_1 \Delta z) \\ \exp\left[-i\frac{\pi}{\Lambda_1} (z + z_1)\right] k_1 \sinh(\Gamma_1 \Delta z) & \exp\left[-i\frac{\pi}{\Lambda_1} \Delta z\right] [\Gamma_1 \cosh(\Gamma_1 \Delta z) - i\delta_1 \sinh(\Gamma_1 \Delta z)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{\Gamma_1} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $\Delta z = z - z_1$ ,  $k = 2\Delta n / \lambda$  是耦合系数,  $\delta \in \beta - \pi / \Lambda$  是失谐因子,  $\Lambda$  与  $\bar{n}$  的关系如下:  $\Lambda \bar{n} = d_h n_h + d_l n_l$ ,  $\Gamma = \sqrt{k^2 - \delta^2}$  是啁啾镜结构中的传输常量。

基于以上推证,一束光经由基底介质刚刚入射到啁啾镜结构中的物理过程可以用(6)式~(9)式这4个数学表达式来描述。为简单起见,暂且不考虑基底介质的影响。此时,由(6)式,(7)式,(9)式3式就可以正确反映光波刚入射到啁啾镜时的传输问题了<sup>[5,6,8]</sup>。

现在针对啁啾镜的具体的情况求解,其原理图如图3所示。

选取啁啾镜开始的位置为坐标原点,则有  $z_1 = 0$ 。

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{\Gamma_1} \times \begin{bmatrix} \exp\left(i\frac{\pi}{\Lambda_1} z\right) [\Gamma_1 \cosh(\Gamma_1 z) + i\delta_1 \sinh(\Gamma_1 z)] & \exp\left(i\frac{\pi}{\Lambda_1} z\right] k_1 \sinh(\Gamma_1 z) \\ \exp\left[-i\frac{\pi}{\Lambda_1} z\right] k_1 \sinh(\Gamma_1 z) & \exp\left[-i\frac{\pi}{\Lambda_1} z\right] [\Gamma_1 \cosh(\Gamma_1 z) - i\delta_1 \sinh(\Gamma_1 z)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (12)$$

由(2)式解得:

$$\begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix} = \frac{1}{\Gamma_j} \times$$

综合(1)式~(4)式可得:

$$\beta_0 (E_0^+ - E_0^-) = \begin{bmatrix} i\beta_1 + k_1 \exp\left(-i\frac{2\pi}{\Lambda_1} z_1\right) \\ -i\beta_1 + k_1 \exp\left(i\frac{2\pi}{\Lambda_1} z_1\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (5)$$

联立(4)式,(5)式可得光波经由基底介质传播到啁啾镜结构时光波振幅之间的联系方程:

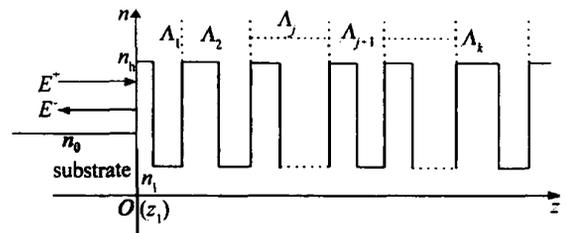


Fig 3 Scheme of a light beam transmits from substrate to Bragg mirror

(6)式,(7)式,(9)式3式的形式分别化简为:

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2\beta_0} \begin{bmatrix} \beta_0 + \beta_1 - ik_1 & \beta_0 - \beta_1 - ik_1 \\ \beta_0 - \beta_1 + ik_1 & \beta_0 + \beta_1 + ik_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = \frac{1}{2\beta_0} \begin{bmatrix} \beta_0 + \beta_1 + ik_1 & \beta_0 - \beta_1 + ik_1 \\ \beta_0 - \beta_1 - ik_1 & \beta_0 + \beta_1 - ik_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \exp\left[ i\frac{\pi}{\Lambda_j}\Delta z \right] [\Gamma_j \cosh(\Gamma_j \Delta z) + i\delta_j \sinh(\Gamma_j \Delta z)] & \exp\left[ i\frac{\pi}{\Lambda_j}(z + z_4) \right] k_j \sinh(\Gamma_j \Delta z) \\ \exp\left[ -i\frac{\pi}{\Lambda_j}(z + z_4) \right] k_j \sinh(\Gamma_j \Delta z) & \exp\left[ -i\frac{\pi}{\Lambda_j}\Delta z \right] [\Gamma_j \cosh(\Gamma_j \Delta z) - i\delta_j \sinh(\Gamma_j \Delta z)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix}_{z_j} \quad (13)$$

光波在整个啁啾镜中的传播规律由 (13) 式的矩阵之积可得:

$$\begin{bmatrix} E^+ \\ E^- \end{bmatrix}_z = \prod_j \frac{1}{\Gamma_j} \times \begin{bmatrix} \exp\left[ i\frac{\pi}{\Lambda_j}\Delta z \right] [\Gamma_j \cosh(\Gamma_j \Delta z) + i\delta_j \sinh(\Gamma_j \Delta z)] & \exp\left[ i\frac{\pi}{\Lambda_j}(z + z_4) \right] k_j \sinh(\Gamma_j \Delta z) \\ \exp\left[ -i\frac{\pi}{\Lambda_j}(z + z_4) \right] k_j \sinh(\Gamma_j \Delta z) & \exp\left[ -i\frac{\pi}{\Lambda_j}\Delta z \right] [\Gamma_j \cosh(\Gamma_j \Delta z) - i\delta_j \sinh(\Gamma_j \Delta z)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix}_{z_j} \quad (14)$$

至此,由 (10) 式 ~ (12) 式及 (14) 式 4 个表达式就可完整的得到光波在整个啁啾镜结构中的传播规律。

### 3 对主要特性的影响分析

分别以  $\text{TiO}_2$  ( $n_h = 2.35$ ) 和  $\text{SiO}_2$  ( $n_l = 1.45$ ) 作为高折射率材料和低折射率材料的后端镀膜的啁啾反射镜 (基底材料的折射率为 1.50) 为例,来说明加入边界连续性条件后,计算分析的结果和实际情况的关系。

#### 3.1 反射性质

$$r = \prod_j \frac{\Gamma_j \cosh(\Gamma_j z) \beta_0 \beta_1 + k_j \beta_1 \sinh(\Gamma_j z) (\beta_0 + 2ik_j) + i\delta_j \sinh(\Gamma_j z) [ik_j \beta_0 - \beta_1^2 - k_j^2]}{\Gamma_j \cosh(\Gamma_j z) \beta_0 \beta_1 + k_j \beta_1 \sinh(\Gamma_j z) (-\beta_0 + 2ik_j) + i\delta_j \sinh(\Gamma_j z) [-ik_j \beta_0 - \beta_1^2 - k_j^2]}, z = \sum_{j=1}^j \Lambda_j \quad (15)$$

由上式可看出,计入边界条件影响后,反射率的表达式不再仅仅是  $k, \Gamma, \delta$  的函数,而且还包含有基底传输因子  $\beta_0$ , 第一啁啾镜单元传输因子  $\beta_1$  的影响<sup>[9-11]</sup>。这正反映了客观情况,因为应用不同材料制成的后端镀膜啁啾反射镜的反射率是有所不同的。进一步可以看出,当  $\cosh(\Gamma z)$  的值和  $\sinh(\Gamma z)$  愈接近时,也就是自变量  $\Gamma z$  的值越大时反射特性越好。换言之,就是说啁啾镜的层数愈多,反射特性越好。这和薄膜光学在理想情况 (不计损耗) 下的计算结果是一致的。

#### 3.2 穿透深度

穿透深度定义式为:  $\frac{d\Phi}{dk} = \frac{d\arg(r)}{dk} = 2\bar{n}_e T$ , 其中  $\bar{n}_e$  是啁啾镜介质的等效折射率,  $T$  就是所谓的穿透深度。

定义:  $r = \frac{E_r}{E_i} = \frac{E_1^-}{E_1^+} = |r| \exp[i\Phi], \Phi = \arg(r)$ 。不考虑边界条件时,反射率由 (14) 式就可计算出。计算后的近似表达式是:  $r = \prod_j \exp\left[ -i\frac{2\pi}{\Lambda_j} \right] \times -k_j \sinh(\Gamma_j z)$ ,  $z = \sum_{j=1}^j \Lambda_j$ 。加入边界条件后的反射率由 (10) 式 ~ (12) 式及 (14) 式 4 式计算,采用计算机编程计算化简后得到的近似表达式是:

在不考虑介质损耗的理想情况下,考虑一个无限长的啁啾镜,即在  $\beta_0 = n_0 k_0, \beta_1 = \bar{n}_1 k_1$  和  $\Gamma z \rightarrow \infty$  时,代入 (15) 式,采用计算机数值计算<sup>[10,11]</sup>,经变形化简后,可近似解得:  $T = \left[ \frac{1}{\beta_1} - \frac{\beta_1}{\beta_0} \right] \frac{n_0 \lambda}{4n_e \Delta n}$ 。由表达式可以看出,该式不仅体现了基底材料的折射率  $\beta_0$  和啁啾反射镜等效折射率  $\bar{n}_e$  之间的相互影响关系,而且也反映出基底传输因子  $\beta_0$  和第一啁啾单元传输因子  $\beta_1$  的相互作用。图 4 为中心波长  $\lambda = 790\text{nm}$ 、在不考虑介质损耗时,对后端镀膜啁啾镜考虑边界条件后的反射率和穿透深度的曲线图。由图可看出,加入边界条件后的计算结果更精确一些。

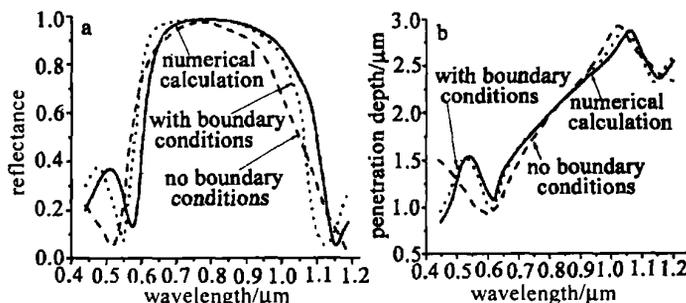


Fig 4 Scheme of the calculated result(reflectance and penetration depth)

导体激光器作为发射光源,用雪崩二极管或 PN 管作为探测元件,使得光学系统小型化成为可能。光纤的使用令测量探头的可动部分缩到最小。计算机的发展使时域内信号处理的可靠性提高,并向频域处理方向发展。随着电路器件水平的不断进步,FFT 运算速度的提高,使频域内的信号处理方法用于准实时测量,或趋向实时测量。近年来,还发展了一些新的信号处理技术,有的使激光扭振测量仪信号处理系统也趋于小型化,有的则使信号处理的自动化能力提高,使人工干预减小到最小。

### 3 结束语

国外激光多普勒测振技术已由试验研究进入实用化,而国内的介绍和研究相对较少。作者希望通过介绍激光多普勒测振技术的发展和最近进展,促进我国激光多普勒振动测量仪器的开发和研制。

#### 参 考 文 献

[1] 杜斯特 F,梅林 A,怀特 J H. 激光多普勒测速的技术原理和

实践 [M]. 北京:科学出版社,1992. 1~7.

- [2] 叶昕,张海翔,蒋诚志 *et al* 激光多普勒测量技术及其应用 [J]. 航空计测技术,1998,18(3): 3~5.
- [3] 郁飞,王天容,许勃. 激光扭振仪调整、应用与误差 [J]. 激光技术,2002,26(1): 63~65.
- [4] 曾周末,孙家,闫明. 扭振的激光测量与自适应标定 [J]. 内燃机学报,1998,16(1): 123~126.
- [5] 葛维晶,王伟生. 激光多普勒技术用于内燃机等旋转轴系扭振测量的研究 [J]. 小型内燃机,1994,23(2): 53~57.
- [6] 傅忠广,杨昆,宋之平 *et al* 汽轮发电机组轴系扭振的激光测试技术 [J]. 现代电力,2001,18(1): 1~6.
- [7] MIES J, LUCA M, HKKWELL N A *et al* Torsional and bending vibration measurement on rotor using laser technology [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(3): 441~467.
- [8] HALL WELL N A. The laser torsional vibrometer: a step forward in rotating machinery diagnostics [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 190(3): 399~418.
- [9] BEELL J R, ROTHBERG S J. Laser vibrometers and contacting transducers, target rotation and six degree-of-freedom vibration: what do we measure [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 237(2): 245~261.
- [10] HALL WELL N A, HOCKNELL A, ROTHBERG J. On the measurement of angular vibration displacement: a laser tiltmeter [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 208(3): 497~500.

(上接第 175 页)

### 4 结 论

应用耦合模方程分析解决了啁啾镜问题,此方法思路清晰、计算简便。加入边界连续性条件的影响后,分析计算的结果更加精确。推演过程和计算结果表明,应用耦合模方程时,考虑边界连续性条件的影响对解决啁啾镜的问题是合理和必要的。

#### 参 考 文 献

- [1] SZIPCS R, KÖCHÁZFKIS A. Theory and design of chirped dielectric laser mirrors [J]. Appl Phys, 1997, B65: 115~135.
- [2] SZIPCS R, KÖCHÁZFKIS A. Negative dispersion mirrors for dispersion control in femtosecond lasers: chirped dielectric mirrors and mult-cavity Gires-Toumois interferometers [J]. Appl Phys, 2000, B70(s1): 51~57.
- [3] SUN H, WANG Ch Y. Third-order dispersion produced by a  $\lambda/4$  dielectric cavity mirror in a femtosecond pulse laser [J]. Opt Commun,

1996, 123: 148~154.

- [4] MATUSCHEK N, GALLMANN L, SUTTER D H *et al* Back-side-coated chirped mirrors with ultra-smooth broadband dispersion characteristics [J]. Appl Phys, 2000, B71: 509~522.
- [5] MACLEOD H A. Thin-film optical filters [M]. Adam Hilger. Institute of Physics Publishing, 1985. 63~75.
- [6] TAM R T. Integrated optics [M]. 2nd ed, Berlin: Springer-Verlag, 1975. 110~125.
- [7] BROVELL IL R, KELLER U. Simple analytical expressions for the reflectivity and penetration depth of Bragg mirror between arbitrary media [J]. Opt Commun, 1995, 116: 343~350.
- [8] YAKOVLEV V, TEMPEA G. Optimization of chirped mirrors [J]. Appl Opt, 2002, 41(30): 6514~6520.
- [9] ERMOLIEV Y, WETS R J B. Numerical techniques for stochastic optimization [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 42~65.
- [10] 张颖,刘艳秋. 软计算方法 [M]. 北京:科学出版社,2002. 107~109, 126~134.
- [11] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京:国防工业出版社,1999. 123~130.