

基于掠入射 X 射线反射谱的 Mo/Si 多层膜 扩散系数测量

喻 波 李 春 金 春 水

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 测量了 Mo/Si 多层膜在 250 °C 下经历不同时间退火后的掠入射 X 射线反射谱, 从中提取出特定级次衍射峰在退火过程中的相对移位, 通过布拉格公式拟合, 得到了 Mo/Si 多层膜周期厚度皮米级别的相对变化。采用扩散控制模型来描述 Mo/Si 多层膜界面扩散, 界面厚度的平方随时间线性增加, 由此拟合得到 Mo 和 Si 间的扩散系数为 $0.33 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。采用四层模型, 对掠入射 X 射线反射谱进行全谱拟合, 得到了 Mo, Si 和扩散层 MoSi_2 的密度分别为 9.3, 2.5 和 5.4 g/cm^3 , 据此对 Mo 和 Si 间扩散系数进行修正, 最终得到在 250 °C 下, Mo/Si 多层膜中 Mo 和 Si 间的扩散系数为 $1.88 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$, 从而为研究 Mo/Si 多层膜的热稳定性提供了定量依据。

关键词 薄膜; Mo/Si 多层膜; 扩散系数; 掠入射 X 射线反射谱; 四层模型; 极紫外

中图分类号 O484.5; O434.19 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1107002

Diffusion Coefficient Measurement by Grazing Incidence X-ray Reflection in a Mo/Si Multilayer

Yu Bo Li Chun Jin Chunshui

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract The grazing incidence X-ray reflection spectra of a Mo/Si multilayer annealing at a temperature of 250 °C at different time are measured and the relative shifts in Bragg peak positions are extracted, from which the relative period thickness changes of the Mo/Si multilayer at pm-accuracy are calculated by fitting Bragg formula. A diffusion limited model is applied to account for the growing interfaces between Mo and Si, which states that the thickness of a compound interface grows quadratically over time. From this model the diffusion constant figures out to be $0.33 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$. Then the grazing incidence X-ray reflection spectra are fitted by genetic algorithm using four-layer model, with the densities of Mo, Si and MoSi_2 determined to be 9.3, 2.5 and 5.4 g/cm^3 . Accordingly, the diffusion constant is modified to be $1.88 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$, which gives a quantitative criterion for investigating the thermal stability of the Mo/Si multilayer.

Key words thin films; Mo/Si multilayer; diffusion coefficients; grazing incidence X-ray reflection spectrum; four-layer model; extreme ultraviolet

OCIS codes 310.4165; 230.4170; 040.7480; 340.7480

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)是下一代光刻技术, 预期能够突破 22 nm 光刻节点。EUVL 使用波长为 10~14 nm 的光源照明, 由于几乎所有已知光学材料在这一波段都具有强吸收, 无法采用传统的折射式光学系统, 所以 EUVL 系统的照明系统、掩模和

投影物镜均采用反射式设计, 其反射光学元件需镀有多层膜以提高反射率。EUVL 系统中各个光学元件对多层膜的性能有着不同的要求, 对于照明系统中的聚光镜, 由于其靠近光源, 受到的辐照强度大, 工作温度高, 因而对镀制在聚光镜上的多层膜热稳定性有特定的要求^[1]。从微观上看, 多层膜的热

收稿日期: 2011-06-01; 收到修改稿日期: 2011-07-29

基金项目: 国家科技重大专项资助课题。

作者简介: 喻 波(1986—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事极紫外多层膜方面的研究。E-mail: yubodisan@126.com

稳定性的物理实质是多层膜中各层材料间的相互扩散以及扩散层的相变,因此研究多层膜界面扩散机制乃至定量测量多层膜各层材料间的扩散系数对研究多层膜的热稳定性,并据此选择合适的材料组合以提高多层膜热稳定性有着十分重要的意义。

在较低温度下(如几百摄氏度),薄膜中的扩散系数通常在 10^{-23} cm^2/s 量级^[2],而传统的扩散系数测量方法如示踪物扩散测量法、核磁共振测量法和阻抗测量法,其测量范围大于 10^{-19} cm^2/s ^[3,4],因而并不适用于较低温度下薄膜扩散系数的测量。DuMond 等^[5]发展了一种测量低扩散速率的方法,该方法通过检测多层膜掠入射 X 射线反射谱第一级布拉格反射峰的强度来提取出扩散系数,其测量精度比传统方法高很多。但他们在采用的扩散模型中没有考虑在多层膜各界面处两种材料反应形成的化合物扩散层,该化合物扩散层随时间而逐渐增厚,而通过界面的有效扩散流也随之减小。考虑到有效扩散流随时间的变化,Gösele 等^[6]提出了通过反应扩散模型来描述多层膜各层界面处的扩散,该模型认为多层膜界面扩散生长分为两个阶段,即反应控制阶段和扩散控制阶段。在第一个阶段扩散流大于反应流,反应对多层膜扩散层生长起决定作用;在第二个阶段扩散流小于反应流,扩散对多层膜扩散层生长起决定作用。

Rosen 等^[7]报道过采用透射电镜测量 Mo/Si 多层膜扩散层的厚度(该方法最大分辨率为 50 pm),并应用反应扩散模型对多层膜扩散层的生长过程进行了研究。本文采用 X 射线衍射仪测量 Mo/Si 多层膜掠入射 X 射线反射谱^[8],通过测量多层膜扩散层生长过程中的布拉格峰位的相对变化,来测量多层膜周期厚度的变化,进而确定多层膜扩散层厚度的变化,然后拟合出扩散系数^[9]。最后采用四层模型,对 Mo/Si 多层膜掠入射 X 射线反射谱进行全谱拟合,得到了 Mo, Si 和扩散层 MoSi_2 的密度^[10],据此对 Mo 和 Si 间的扩散系数进行了修正。

2 多层膜扩散层生长的反应扩散模型

在扩散控制阶段,扩散层厚度的平方与扩散时间成正比,对于两种材料组合构成的多层膜 A/B,假设它们扩散后形成的化合物为 $\text{A}_\beta\text{B}_{1-\beta}$,那么,扩散层的厚度 x 可表示为

$$(\Delta x)^2 = (x - x_0)^2 = \frac{2D(t - t_0)}{\beta(1 - \beta)}, \quad (1)$$

式中 D 为扩散系数, x_0, t_0 分别为扩散控制阶段扩散层的初始厚度和对应的初始时间。设 A, B 和 $\text{A}_\beta\text{B}_{1-\beta}$ 的摩尔质量分别为 m_A, m_B 和 m_{AB} ,三者的密度分别为 ρ_A, ρ_B 和 ρ_{AB} , A, B 层的厚度分别为 d_A, d_B ,多层膜的周期厚度为 d 。为简化问题,近似认为 A 在 B 上和 B 在 A 上的扩散层扩散系数相同,两边的扩散层厚度分别为 x_1, x_2 ,这样单周期内 A 在 B 上和 B 在 A 上的扩散层在退火过程中厚度的增加量近似相等。然后根据 $\text{A}_\beta\text{B}_{1-\beta}$ 中 A 和 B 的化学计量比,即每消耗 β 份的 A 和 $1 - \beta$ 份的 B 生成 1 份的 $\text{A}_\beta\text{B}_{1-\beta}$,则有

$$\begin{cases} (\Delta x)^2 = (x_1 - x_{10})^2 = (x_2 - x_{20})^2 = \frac{2D(t - t_0)}{\beta(1 - \beta)} \\ \frac{\rho_A \Delta d_A}{m_A} \Big/ \frac{\rho_{AB} \Delta x}{m_{AB}} = -\beta \\ \frac{\rho_B \Delta d_B}{m_B} \Big/ \frac{\rho_{AB} \Delta x}{m_{AB}} = -(1 - \beta) \\ \Delta d = 2(\Delta d_A + \Delta d_B + \Delta x) \end{cases}, \quad (2)$$

(2)式中最后一式乘以因子 2 是考虑到每个周期内有两个扩散层。联立(2)式有

$$\begin{aligned} (\Delta d)^2 &= (d - d_0)^2 = \\ &8 \left[1 - \frac{\beta n_A \rho_{AB}}{\rho_A m_{AB}} - \frac{(1 - \beta) m_B \rho_{AB}}{\rho_B m_{AB}} \right]^2 \Big/ [\beta(1 - \beta)] \times \\ &D(t - t_0), \end{aligned} \quad (3)$$

令

$$k = 8 \left[1 - \frac{\beta n_A \rho_{AB}}{\rho_A m_{AB}} - \frac{(1 - \beta) m_B \rho_{AB}}{\rho_B m_{AB}} \right]^2 \Big/ [\beta(1 - \beta)], \quad (4)$$

则(3)式简化为

$$(\Delta d)^2 = (d - d_0)^2 = kD(t - t_0). \quad (5)$$

由(5)式可见,通过测量多层膜周期厚度在扩散层生长过程中的变化就可以拟合出扩散系数 D 。

对于 Mo/Si 多层膜,扩散层一般为 MoSi_2 ^[11],按照 $\text{A}_\beta\text{B}_{1-\beta}$ 定义,在 MoSi_2 中 $\beta = 1/3$, Mo, Si 和 MoSi_2 的密度和摩尔质量如表 1 所示,其中密度近似采用体材料的密度, $\text{Mo}_{1/3} \text{Si}_{2/3}$ 的摩尔质量为 50.67 g/mol。

表 1 Mo, Si 和 MoSi_2 的密度和摩尔质量

Table 1 Densities and the molar masses of Mo, Si and MoSi_2

	Mo	Si	MoSi_2
$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	10.22	2.33	6.31
$m / (\text{g}/\text{mol})$	96	28	152

将表 1 参数代人(4)式,算得 $k = 5.48$ 。

3 多层膜周期厚度变化的测量

首先测量多层膜未退火前的反射谱作为参考谱,接着将多层膜在一定温度下经历某一时间退火后再测量其反射谱。在两个反射谱中各选取两个对应级次的布拉格峰,分别记为 m_1, m_2 , 如图 1 所示。设退火前后对应的入射角分别为 θ_{10}, θ_1 和 θ_{20}, θ_2 , 多层膜退火前后的周期厚度分别为 d_0 和 d 。 d_0 仍由修正后的布拉格公式拟合得到^[12]。在掠入射条件下 ($\sin \theta \approx \theta$), 根据一般的布拉格公式有

$$\begin{aligned} (\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1) &= (\theta_2 - \theta_{20}) - (\theta_1 - \theta_{10}) = \\ (\theta_2 - \theta_1) - (\theta_{20} - \theta_{10}) &= (m_2 - m_1)\lambda \left(\frac{1}{2d_0} - \frac{1}{2d} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

由(6)式可知,通过测量 m_1, m_2 级次衍射峰相对参考谱的移位之差 ($\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1$), 就可以计算出多层膜周期厚度的变化。

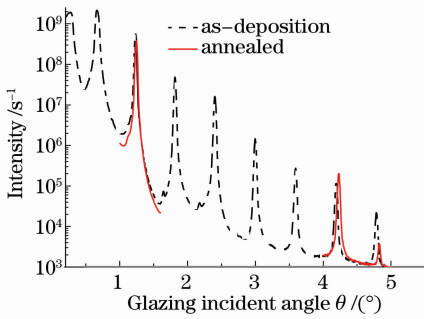


图 1 多层膜掠入射 X 射线参考反射谱和退火后的反射谱

Fig. 1 Grazing incident X-ray reflection reference scan and the peaks which are measured after annealing

为确定 $\Delta\theta_1$ 或 $\Delta\theta_2$, 首先采用三次样条函数来拟合退火前后第 m 级布拉格衍射峰附近的光谱, 然后让退火前后的光谱相互靠近并通过最小二乘法找到两光谱重叠在一起的最佳位置, 最后得到退火前后第 m 级布拉格衍射峰的相对移位。由(6)式中 $(\theta_2 - \theta_1) - (\theta_{20} - \theta_{10})$ 可以看出, 由于测量的是布拉格衍射峰的相对移位, 所以测量结果不受 X 射线衍射仪 θ 角装调误差的影响, 同时由于利用的是布拉格峰附近所有的点, 所以该方法对仪器展宽或多层膜吸收引起的布拉格峰形变化所带来的误差不敏感^[13]。另外, 该相对测量方法由于只需测量多层膜退火过程两个衍射峰附近的光谱, 并且由于充分利用了衍射峰附近所有测量点的信息, 所以 θ 角的步长也没有必要取得太小, 因而测量时间较短, 更适用于退火过程中的在线检测。

4 多层膜材料密度的测量

一般采取两种模型来描述两种材料交替堆栈而成的多层膜物理结构, 即双层模型和四层模型。前者采用统计的方法来描述扩散层对多层膜反射率的影响, 即对各界面的菲涅耳反射系数乘以衰减因子^[14,15], 后者则把扩散层作为单独的一层予以考虑^[11,16,17], 其结构模型如图 2 所示。

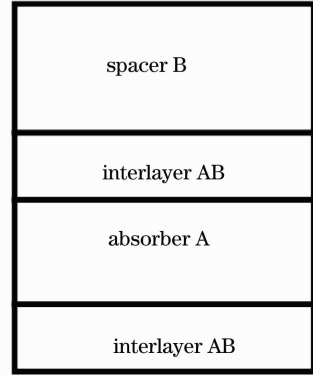


图 2 四层模型

Fig. 2 Four-layer model

对于 Mo/Si 多层膜, 一般认为其扩散层为 MoSi_2 , 根据四层模型, 其单周期内的结构为 $\text{Mo}/\text{MoSi}_2/\text{Si}/\text{MoSi}_2$ 。已知 Mo, Si, MoSi_2 的密度和厚度以及界面粗糙度, 采用递归方法^[18] 可将多层膜 X 射线反射谱计算出来, 将其与实测反射谱比较构建评价函数, 然后采用遗传算法拟合^[19,20], 就可以将 Mo/Si 多层膜各结构参数反演出来。

5 实验结果与分析

5.1 测量样品与测量设备

测量样品为德国 Leybold Optics 公司制造的 NESSY 大型极紫外(EUV)磁控溅射镀膜机在硅基片上沉积的 Mo/Si 多层膜, 膜层结构为 $\text{SUB}[\text{Si}/\text{Mo}]^{60}\text{Si}$ 。测量多层膜掠入射反射谱的 X 射线衍射仪为荷兰 Panalytical 公司生产的 X'Pert PRO MRD 衍射仪, 该衍射仪测角精度为 0.0001° , 工作波长在 $\text{CuK}\alpha$ 线 ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$)。

5.2 Mo/Si 多层膜周期厚度的测量与扩散系数的测量

将 Mo/Si 多层膜的退火温度设定为 250°C , 退火时间从 1 h 逐渐增大到 40 h。首先对第 3 节多层膜周期厚度测量方法的重复测量精度进行了评估。在现有条件下只能对 Mo/Si 多层膜退火过程中的周期厚度进行线下测量, 即多层膜样品在高温炉中退火完后再放到衍射仪样品台上测量, 测量完后再

放回高温炉中继续退火,然后再测量。因此,评估重复测量精度的流程如下,同一个多层膜样品放到衍射仪样品台上,样品装调完后测量,然后拿下来重新放到样品台上,再次装调后测量。按照以上流程,测量了多层膜退火 10 h 后的周期厚度,两次测量结果如表 2 所示($d_0 = 7.540$ nm,由修正后的布拉格公式拟合参考反射谱的各级布拉格峰位得到)。从表 2 可知,采用第 7 级衍射峰和第 8 级衍射峰周期厚度测量之差小于 1 pm,此值可以理解为该测量方法的收敛性。将两者的平均值作为每次测量多层膜周期厚度的结果,这样两次重复测量的结果相差 8 pm,显然这里面包含了每次测量中衍射仪光斑照射在多层膜样品不同位置(多层膜的非均匀性,即在不同位置多层膜周期厚度存在微小差异)引起的误差,因此可以预期如果采用在线检测,重复测量精度能够更高。

表 2 Mo/Si 多层膜退火 10 h 后周期厚度重复测量结果
Table 2 Repeated measures of period thickness of the Mo/Si multilayer after annealing for 10 h

Measurement sequence	Period thickness /nm		
	$m_1 = 2, m_2 = 7$	$m_1 = 2, m_2 = 8$	Average
1	7.372	7.373	7.3725
2	7.364	7.365	7.3645

测量得到的 Mo/Si 多层膜周期厚度随退火时间的变化如图 3 所示,按(5)式拟合得到 $kD = 6.44 \times 10^{-5} \text{ nm}^2/\text{h} = 1.79 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$,取 $k = 5.48$,则 $D = 0.33 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。扩散控制开始的时间 $t_0 = 7.8$ h,此时扩散层的初始厚度 $d_0 = 7.384$ nm。拟合结果如图 4 所示。值得注意的是在退火的初始阶段,并没有观察到多层膜周期厚度随退火时间的线性变化,这有可能是因为反应控制阶段在多层膜的沉积过程中已经发生了,而多层膜周期厚度在退火初始阶段

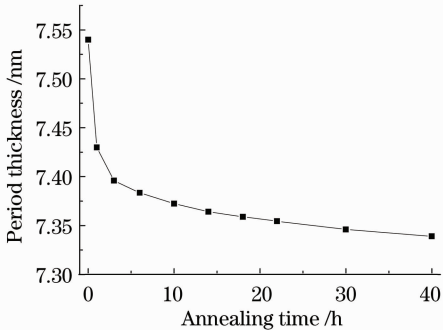


图 3 Mo/Si 多层膜周期厚度随退火时间的变化
Fig. 3 Period thickness variation of Mo/Si multilayer with annealing time

迅速减小可能是由于扩散层发生相变等因素引起的。

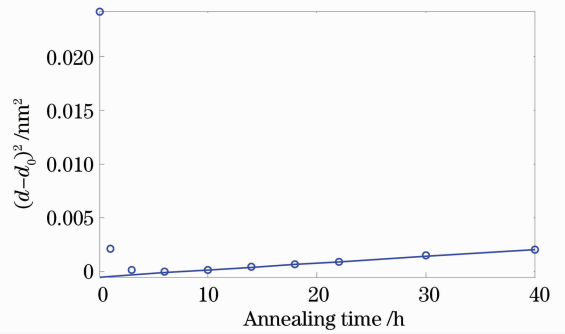


图 4 周期厚度的平方随退火时间的线性拟合结果
Fig. 4 Linear fitting result of squared period thickness versus annealing time

5.3 Mo/Si 多层膜材料密度的测量与扩散系数的修正

按照第 4 节阐述的方法,将 Mo/Si 多层膜退火 10 h 后(已进入扩散控制阶段)测量的反射谱进行全谱拟合,拟合得到 Mo, Si 和 MoSi_2 的密度分别为 9.3, 2.5 和 5.4 g/cm^3 , Mo, MoSi_2 (Si 在 Mo 上), Si, MoSi_2 (Mo 在 Si 上)的厚度分别为 2.42, 0.44, 3.57 和 0.94 nm;界面粗糙度为 0.23 nm。反射谱拟合结果如图 5 所示。将拟合得到的密度代入(4)式计算得 $k = 0.9506$,从而将 250 °C 的扩散系数 D 修正为 $1.88 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$,这与 R. S. Rosen 等^[7]报道的结果($4.1 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$)在数量级上是一致的。将拟合得到的 Mo, Si 和 MoSi_2 的密度代入(2)式中第二式和第三式,可得厚度改变比值 $\Delta d_{\text{Mo}} : \Delta d_{\text{Si}} : \Delta d_{\text{MoSi}_2} = -0.37 : -0.79 : 1$,即每消耗 0.37 nm 的 Mo 和 0.79 nm 的 Si 生成 1 nm 的扩散层 MoSi_2 。

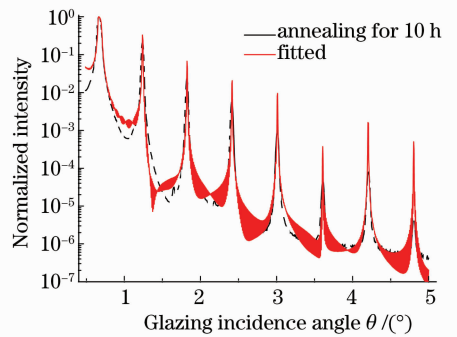


图 5 采用四层模型拟合多层膜退火 10 h 后的 X 射线反射谱

Fig. 5 Fitting result of the X-ray reflection spectra of the multilayer after annealing for 10 h using four-layer model

再由四层模型拟合结果可知, Mo/Si 多层膜退火 10 h 后 Mo 层和 Si 层厚度比 $d_{\text{Mo}}:d_{\text{Si}}=2.42:3.57=0.5356:0.79$, 显然在扩散控制过程中 Si 层将首先被消耗掉, 从而使扩散控制过程到达终点, 此时多层膜中只剩下 Mo 层和 MoSi₂ 层。然后根据 Mo 层、Si 层和 MoSi₂ 层消耗和生成的比例, 可计算得此时 Mo 层和 MoSi₂ 层的厚度分别为

$$d_{\text{Mo}} = d_{\text{Mo}}(10 \text{ h}) - \Delta d_{\text{Mo}} = d_{\text{Mo}}(10 \text{ h}) - \Delta d_{\text{Si}} \times 0.37/0.79 = 2.42 - 3.57 \times 0.37/0.79 = 0.75 \text{ nm},$$

$$d_{\text{MoSi}_2} = d_{\text{MoSi}_2}(10 \text{ h}) + \Delta d_{\text{Si}} \times 1/0.79 =$$

$$(0.44 + 0.94) + 3.57 \times 1/0.79 = 5.90 \text{ nm},$$

周期厚度变化为

$$\Delta d = d_{\text{Mo}} + d_{\text{MoSi}_2} - d_0 = (0.75 + 5.90) - 7.38 = -0.73 \text{ nm},$$

再由(6)式可知, 扩散控制过程到达终点所需的时间为

$$t = (\Delta d)^2 / kD + t_0 = 0.73 \times 0.73 / 6.44 \times 10^{-5} + 7.8 = 8283 \text{ h}.$$

可见在 250 °C 下, Mo/Si 多层膜的扩散控制过程是非常缓慢的。

6 结 论

通过检测 Mo/Si 多层膜的掠入射 X 射线衍射峰的相对移位, 实现检测多层膜退火过程中皮米级别的周期厚度变化, 并且该方法测量时间短, 更适用于在线检测。多层膜经历退火一段时间后, 周期厚度的平方随退火时间呈线性变化, 即多层膜扩散层生长进入扩散控制阶段, 拟合得到的扩散系数为 $0.33 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。采用四层模型对多层膜 X 射线反射谱进行全谱拟合得到 Mo, Si, MoSi₂ 的密度分别为 9.3, 2.5 和 5.4 g/cm³, 由此修正扩散系数为 $1.88 \times 10^{-22} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。最后计算了扩散控制过程结束的时间, 结果表明在 250 °C 下 Mo/Si 多层膜的扩散控制过程是一个极其漫长的过程。

本文测量 Mo/Si 多层膜扩散系数的方法也完全适用于测量其他材料组合的 EUV 多层膜在特定温度的扩散系数, 应用该方法, 可以对具体的热环境下的特定膜系做定量的评估, 并且可以确定该膜系在特定的时间内能否满足热稳定性要求。

参 考 文 献

- 1 T. Feigl, S. Yulin, N. Benoit *et al.*. High-temperature LPP collector mirrors[C]. *SPIE*, 2006, **6151**(4A): 1~9
- 2 W. H. Wang, H. Y. Bai, M. Zhang *et al.*. Interdiffusion in

- nanometer-scale multilayers investigated by in situ low-angle X-ray diffraction [J]. *Phys. Rev. B.*, 1999, **59**(16): 10811~10822
- 3 P. Heitjans, S. Indris. Diffusion and ionic conduction in nanocrystalline ceramics [J]. *J. Phys. Condens. Matter.*, 2003, **15**(30): R1257~R1289
- 4 S. C. Jeong, I. Katayama, H. Katayama *et al.*. Simulation study on the measurements of diffusion coefficients in solid materials by short-lived radiotracer beams [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**(7A): 4576~4583
- 5 J. DuMond, J. P. Youtz. An X-ray method of determining rates of diffusion in the solid state [J]. *J. Appl. Phys.*, 1940, **11**(5): 357~365
- 6 U. Gösele, K. N. Tu. Growth kinetics of planar binary diffusion couples: "thin-film case" versus "bulk cases" [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(4): 3252~3260
- 7 R. S. Rosen, D. G. Stearns, D. S. P. Vernon *et al.*. Silicide layer growth-rates in Mo/Si multilayers [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(34): 6975~6980
- 8 Wang Yonggang, Meng Yanli, Chen Bo *et al.*. Measurement of super-smooth surface by grazing X-ray scattering method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(1): 60~68
王永刚, 孟艳丽, 陈波等. 掠入射 X 射线散射法测量超光滑表面[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(1): 60~68
- 9 S. Bruijina, R. W. E. van de Kruijsa, A. E. Yakshin *et al.*. In-situ study of the diffusion-reaction mechanism in Mo/Si multilayered films [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, **257**(4): 2707~2711
- 10 A. E. Yakshin, E. Louis, P. C. Gorts *et al.*. Determination of the layered structure in Mo/Si multilayers by grazing incidence X-ray reflectometry [J]. *Phys. B.*, 2000, **283**(1): 143~148
- 11 S. Bajt, D. G. Stearns, P. A. Kearney *et al.*. Investigation of the amorphous-to-crystalline transition in Mo/Si multilayers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **90**(2): 1017~1025
- 12 Zhang Lichao. Calibration of deposition rates of multilayer coatings by sputtering depositions [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(12): 2530~2536
张立超. 溅射法制备多层膜沉积速率的标定[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(12): 2530~2536
- 13 H. J. Voorma. Mo/Si Multilayer Optics for Micro-Lithography [D]. Delft; Delft University of Technology, 1997. 15~21
- 14 D. L. Windt. IMD-software for modeling the optical properties of multilayer films [J]. *Computers in Physics*, 1998, **12**(4): 360~368
- 15 L. Nevot, P. Croce. Characterization for surfaces by grazing X-ray reflection-application to the study of polishing of some silicate glasses [J]. *Rev. Phys. Appl.*, 1980, **15**(3): 761~770
- 16 S. P. Vernon, P. A. Kearney, W. M. Tong *et al.*. Masks for extreme ultraviolet lithography [C]. *SPIE*, 1998, **3546**: 184~193
- 17 M. H. Modi, G. S. Lodha, M. Nayak *et al.*. Determination of layer structure in Mo/Si multilayers using soft X-ray reflectivity [J]. *Phys. B.*, 2003, **325**: 272~280
- 18 L. G. Parratt. Surface studies of solids by total reflection of X-rays [J]. *Phys. Rev.*, 1954, **95**(2): 359~369
- 19 Wang Liping, Zhang Lichao, Jin Chunshui *et al.*. Design of aspheric mirror for panoramic imaging system using multi-population genetic algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 1020~1025
王丽萍, 张立超, 金春水等. 采用多种群遗传算法的全景成像系

统非球面设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1020~1025

16(9): 1582~1588

20 Jin Weihua, Zhang Lichao, Jin Chunshui *et al.*. Determination of optical constants for aluminum thin film based on combined optimal algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008,

金伟华, 张立超, 金春水等. 基于混合优化算法测定铝薄膜光学常数[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1582~1588

栏目编辑: 李文喆

高功率全光纤超连续谱激光技术进展

基于非线性光子晶体光纤(PCF)的超连续谱技术由于在频谱学、超短脉冲激光技术、频率计量及光学相干层析(OCT)等领域中的应用价值在国际上引起了广泛的研究兴趣。最近,中国科学院西安光学精密机械研究所基于高功率全光纤皮秒脉冲放大器系统和高非线性光子晶体光纤,实验上获得了平均功率 89.5 W 的高光束质量全光纤超连续谱(SC)激光输出,光谱覆盖范围为 500 nm 至 1700 nm 以上,平均谱功率密度大于 26 mW/nm,10 dB 带宽大于1100 nm。实验中皮秒(ps)主放大器采用双包层大模场掺镱光纤和多级放大技术,用于产生超连续

谱的非 PCF 零色散点波长为1040 nm,其非线性系数为 11 /W·km,纤芯直径为 4.8 μm。全光纤皮秒放大器系统通过模式匹配器与非线性 PCF 连接,其中模式匹配器插损为0.15 dB,实验中采用 Vytran 公司的特种光纤熔接机实现了模式匹配器输出单模尾纤和 PCF 的低损耗熔接。实验最终测得超连续谱产生转换效率达 63%,利用系列窄带滤波片(中心波长分别为531.6,650,780,849 和 980 nm)对超连续谱激光不同波段的光束质量分别进行测量, M^2 因子均小于 1.2,表明超连续谱为严格单模运转。

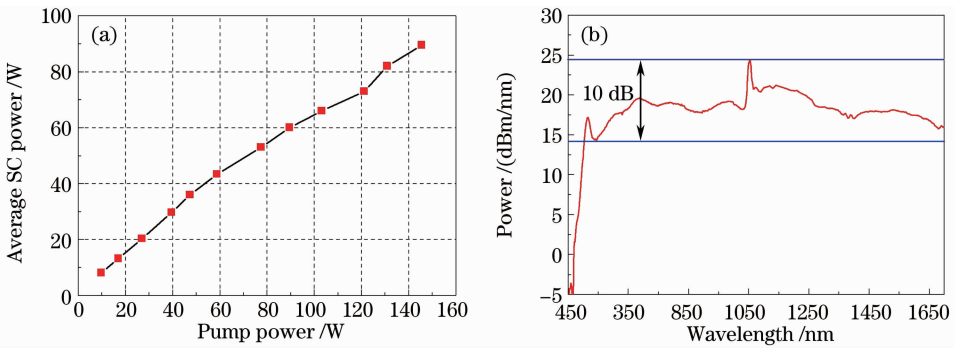


图 1 (a)超连续谱平均输出功率随抽运皮秒激光平均功率的变化曲线;(b)最高输出功率下超连续谱

Fig.1 (a) Variation of average output SC power versus the launched input ps pump power;

(b) spectral profile at the highest output SC power

赵 卫 胡晓鸿 王屹山 李 成 张 伟 杨 直 王虎山

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

* E-mail: yshwang@opt. ac. cn

收稿日期: 2011-09-26; 收到修改稿日期: 2011-10-11