

doi:10.3788/gzxb20184704.0431001

基于量子遗传算法的宽带离散化极紫外 多层膜的研制

匡尚奇¹,张超¹,李硕¹,杨海贵²,霍同林³,周洪军³

(1 长春理工大学 理学院,长春 130022)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术重点实验室,长春 130033)

(3 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室,合肥 230029)

摘 要:提出了一种基于量子遗传算法的宽带极紫外多层膜的离散化设计方法,解决了在膜系设计中普遍采用的遗传算法存在求解精度低的问题.同时在基于量子遗传算法的膜系设计方法中对膜系进行了离散化设计,解决了在仅由时间控制膜厚且沉积速率较大的镀膜系统中的膜厚高精度控制的问题.依据量子遗传算法的膜系设计结果采用磁控溅射镀膜系统镀制宽带极紫外多层膜.测试结果表明,宽角度极紫外多层膜的入射角为 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$,反射率达45%以上;宽光谱极紫外多层膜的入射波长为13~15 nm,反射率达20%以上.相关研究工作为宽带极紫外多层膜的研发提供了另一种可供选择的且较优的搜索优化算法,同时该算法结合实验,实现膜厚的离散化设计,使镀制出的多层膜具有较好的光谱性能.

关键词:光学多层膜;膜系设计;量子遗传算法;宽带极紫外多层膜;离散化设计

中图分类号:O434

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0431001-9

Design and Fabrication of Broadband Discrete Extreme-ultraviolet Multilayer Based on Quantum State Genetic Algorithm

KUANG Shang-qi¹, ZHANG Chao¹, LI Shuo¹, YANG Hai-gui²,
HUO Tong-lin³, ZHOU Hong-jun³

(1 School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Advanced Manufacturing Technology for Optical Systems Laboratory, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(3 National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,
Hefei 230029, China)

Abstract: Quantum state genetic algorithm was applied into the discrete design of broadband extreme-ultraviolet multilayer to solve the problem of solving accuracy in genetic algorithm. And the discrete design of layer thickness can be achieved in the process of quantum state genetic algorithm. It solves the problem that the layer can be accurately fabricated when the magnetron sputtering system is controlled by the deposition time. According to the results designed by quantum state genetic algorithm, broadband extreme-ultraviolet multilayers have been fabricated by magnetron sputtering system. The measured results show two kinds of multilayers designed by quantum state genetic algorithm were fabricated, one has a reflectivity of more than 45% in the $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ range of incidence angle, and the other reaches the reflectivity of more than 20% for the wavelength range from 13 nm to 15 nm. The relative work shows the potential value of quantum state genetic algorithm and offers another alternative optimizing algorithm in the field of broadband extreme-ultraviolet multilayer design. And then the algorithm can achieve the

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No. 61405189)和吉林省科技发展计划(Nos. 20150101019JC, 20170312024ZG)资助

第一作者:匡尚奇(1981—),男,副教授,博士,主要研究方向为量子光学与量子算法的研究与应用.Email:physicskuang@sina.com

收稿日期:2017-11-03; **录用日期:**2018-01-10

<http://www.photon.ac.cn>

discrete design of multilayer, which makes fabricated multilayer have better spectral properties.

Key words: Optic multilayer; Design of multilayer coating; Quantum state genetic algorithm; Broadband extreme-ultraviolet multilayer; Discrete design

OCIS Codes: 310.4165; 310.6805; 310.6188

0 引言

光刻技术是现今半导体工业生产中的主要工艺,而基于极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)多层膜设计的反射镜是 EUV 光刻技术的核心反射光学元件^[1-4].由于 EUV 多层膜可实现 EUV 波段内的高反射,它也被广泛应用于 EUV 光谱学^[1]、EUV 天文学^[5]、同步辐射^[6]等诸多领域中,因此有关 EUV 多层膜的研究备受国内外相关人士的关注.目前,Mo/Si 多层膜可实现高达 70%左右的反射率^[7].但这种采用等周期膜系结构的多层膜由于入射角带宽和反射光谱带宽很窄,限制了它在许多领域中的应用^[2],而采用非周期性 EUV 多层膜可增大多层膜的反射带宽^[8].几十年来,在国内外各大科研机构的不努力下,宽带 EUV 多层膜的研发取得了长足的发展,例如 2010 年,荷兰的 YAKSHIN A E 等制备出入射波长为 13.5 nm、入射角为 0°~16°、反射率为 50%左右的 Mo/Si 多层膜,可满足 EUV 光刻照明系统对较宽入射角带宽的需求^[9].

在 EUV 多层膜的制备中,采用的方法有蒸发^[10]、溅射^[11-12]和激光等离子体沉积^[13]等技术.其中,最普遍使用的是蒸发和溅射技术.蒸发镀膜使用设备简单,但所镀多层膜结构密度较差.溅射方法镀制出的膜层比较致密,且溅射镀膜的沉积速率较为稳定^[14].仅以时间控制的磁控溅射镀膜方法是最简单易行的.但当沉积速率较高时,单纯通过时间控制很难实现膜厚的高精度沉积,而一般可精确镀制的膜厚应以沉积速率为公差的一系列离散化膜厚.因此实现膜厚的高精度镀制就必须采用膜厚的离散化设计,这对膜系设计方法提出了较高的要求.同时在宽带 EUV 多层膜的设计中所需优化的参数较多,求解难度也较大,因此选择求解性能较高的搜索算法显得十分重要.目前,在 EUV 多层膜设计中采用的优化搜索算法有模拟退火算法^[15]、单纯形法^[16]、非线性最小二乘法^[9]和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[17]等.模拟退火算法实现过程较为简便,但在进化中容易丢失先验知识,从而导致收敛速度较慢.单纯形法易陷入“早熟”现象,且优化结果依赖于初始值.非线性最小二乘法求解效率高,但对初始值较为敏感,且不易求得全局最优解.而这三种算法均不能实现膜厚的离散化设计,这使得在实际的镀膜过程中无法精准地镀制出设计的膜厚,而只能对设计的膜厚进行近似处理,从而导致镀制出的多层膜的光谱性能较差.其中最为普遍使用的 GA 具有较强的全局搜索能力,但仍存在着求解精度低的缺点^[18-19].

量子遗传算法(Quantum State Genetic Algorithm, QSGA)是一种基于量子计算与 GA 相结合的概率搜索算法,具有较强的全局搜索能力^[20-21].QSGA 已被广泛应用于 0~1 背包问题^[22]、旅行商问题^[23]等问题的求解中.本文提出一种基于 QSGA 的宽带 EUV 多层膜的离散化设计方法,解决了基于 GA 的膜系设计方法所存在的求解精度低的问题.同时基于 QSGA 的设计方法也可实现膜厚的离散化设计,使其设计出的结果可在实际镀膜过程中精准镀制,使其镀制出的多层膜质量更高,光谱性能更优.该方法解决了基于传统的设计方法只能给出一系列任意膜厚值,而在时间控制膜厚且沉积速率可观的镀膜系统中,因镀膜系统只能精准镀制以沉积速率为公差的一系列膜厚,尤其当沉积速率较大时,只能对其设计出的膜厚进行近似处理,无法精确镀制出设计的膜厚,从而导致实验镀制出的多层膜的光谱性能与理论设计的多层膜的光谱性能相差较大的问题.

1 QSGA 的实现过程

本文采用四层模型对具有 49 个周期的宽带 Mo/Si 多层膜进行离散化设计,由于 Mo 层和 Si 层之间的扩散作用较小,故可近似认为扩散层 MoSi₂ 的厚度不变,相应的膜系结构参数应用的是对等周期 Mo/Si 多层膜表征得到的参数.在计算复折射率时采用数据库中的原子散射因子数据^[24].同时在其实现过程中结合实验设备对沉积时间进行设计,使其设计结果更具实际的应用价值.

步骤一:输入基于 QSGA 的宽带 EUV 多层膜的离散化设计方法的初始参数值:量子种群规模 N 为 100、量子染色体个数 n 为 98、每条量子染色体的基因位数 m 为 20、初始进化代数 $t = 1$ 、迭代最大次数为 4 500、宽角度 Mo/Si 多层膜中 Mo 层沉积时间的搜索范围为 [3 s, 5 s], Si 层沉积时间的搜索范围为 [6 s, 10 s];

宽光谱 Mo/Si 多层膜中 Mo 层沉积时间的搜索范围为[2 s, 6 s], Si 层沉积时间的搜索范围为[3 s, 10 s].

步骤二:对多层膜的沉积时间进行量子编码,生成初始量子种群 $Q(t)$.量子种群表示为

$$Q(t) = [q_1^t \quad q_2^t \quad \cdots \quad q_i^t \quad \cdots \quad q_N^t] \quad (1)$$

其中,每一个量子染色体可表示为

$$q_i^t = \begin{bmatrix} \cos \theta_{1i,1}^t & \cdots & \cos \theta_{1i,m}^t & \cdots & \cos \theta_{ji,1}^t & \cdots & \cos \theta_{ji,m}^t & \cdots & \cos \theta_{ni,1}^t & \cdots & \cos \theta_{ni,m}^t \\ \sin \theta_{1i,1}^t & \cdots & \sin \theta_{1i,m}^t & \cdots & \sin \theta_{ji,1}^t & \cdots & \sin \theta_{ji,m}^t & \cdots & \sin \theta_{ni,1}^t & \cdots & \sin \theta_{ni,m}^t \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $[\cos \theta_{ji,k}^t \quad \sin \theta_{ji,k}^t]^T$ 为量子概率幅,每 m 个基因位为一条染色体,代表一系列离散化膜层的沉积时间.

步骤三:根据量子种群 $Q(t)$ 中各个个体的概率幅构造相应的量子叠加态的观察态 $R(t)$.构造的观察态 $R(t)$ 表示为

$$R(t) = [p_1^t \quad p_2^t \quad \cdots \quad p_i^t \quad \cdots \quad p_N^t] \quad (3)$$

式中

$$p_i^t = [r_{1i,1}^t \quad \cdots \quad r_{1i,m}^t \quad \cdots \quad r_{ji,1}^t \quad \cdots \quad r_{ji,m}^t \quad \cdots \quad r_{ni,1}^t \quad \cdots \quad r_{ni,m}^t] \quad (4)$$

生成 $r_{ji,k}^t$ 的过程为

$$r_{ji,k}^t = \begin{cases} 0 & \text{random} < 0.5 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

式中,random 为[0,1]之间的随机数.

步骤四:判断算法是否满足终止条件:若满足,则算法停止,输出最优多层膜各膜层的沉积时间;若不满足,则进行步骤五.

步骤五:根据适应度函数计算 $R(t)$ 中各个个体的适应度,保存最优沉积时间量子个体.其中宽角度 EUV 多层膜采用的适应度函数为

$$MF_1 = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} [R_0(\varphi) - R(\varphi)]^2 d\varphi \quad (6)$$

式中, φ 为入射角($0^\circ \leq \varphi \leq 16^\circ$),目标反射率 $R_0(\varphi) = 52\%$, $R(\varphi)$ 为采用菲涅耳系数法计算的理论反射率,采用的入射光波长为 13.5 nm.

宽光谱 EUV 多层膜采用的适应度函数为

$$MF_2 = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [R_0(\lambda) - R(\lambda)]^2 d\lambda \quad (7)$$

式中, λ 为入射光波长($13 \text{ nm} \leq \lambda \leq 15 \text{ nm}$),目标反射率 $R_0(\lambda) = 26\%$, $R(\lambda)$ 为采用菲涅耳系数法计算的理论反射率,采用入射角为 3° .

在计算过程中,对多层膜的膜厚进行离散化设计,Mo 层的厚度为

$$d_{\text{Mo}} = d'_{\text{Mo}} + \text{round}(g) \cdot v_{\text{Mo}} \quad (8)$$

Si 层的厚度为

$$d_{\text{Si}} = d'_{\text{Si}} + \text{round}(g) \cdot v_{\text{Si}} \quad (9)$$

式中 d'_{Mo} 为 Mo 层的成膜膜厚,Mo 的沉积速率为 $v_{\text{Mo}} = 0.19 \text{ nm/s}$, d'_{Si} 为 Si 层的成膜膜厚,Si 的沉积速率为 $v_{\text{Si}} = 0.32 \text{ nm/s}$, $\text{round}(\cdot)$ 表示四舍五入取整, g 为优化的沉积时间.

步骤六:更新量子旋转门,并通过量子旋转门更新量子种群 $Q(t)$.量子旋转角 $\Delta\theta_{ji,k}$ 更新操作为

$$\Delta\theta_{ji,k} = s(\cos \theta_{ji,k}, \sin \theta_{ji,k}) \cdot \omega_{ji,k} \quad (10)$$

式中, $s(\cos \theta_{ji,k}, \sin \theta_{ji,k})$ 用来控制旋转的方向^[25]

$$\omega_{ji,k} = \theta_{\min} + f_{ji,k} \times [\theta_{\max} - \theta_{\min}] \quad (11)$$

其中搜索角度最小值 θ_{\min} ,搜索角度最大值 θ_{\max}

$$f_{ji,k} = \frac{\text{HamD}(\mathbf{A}, \mathbf{B})}{m} \quad (12)$$

式中, $m = 20$ 为个体的染色体基因长度,HamD(\mathbf{A}, \mathbf{B}) 为当前个体观测向量 \mathbf{A} 与当前最优个体观测向量 \mathbf{B} 的相应基因位不同的个数.然后采用量子旋转门对量子种群 $Q(t)$ 中的量子基因位 $\begin{bmatrix} \cos \theta_{ji,k} \\ \sin \theta_{ji,k} \end{bmatrix}$ 进行更新,操作

过程为

$$\begin{bmatrix} \cos \theta'_{ji,k} \\ \sin \theta'_{ji,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\theta_{ji,k} & -\sin \Delta\theta_{ji,k} \\ \sin \Delta\theta_{ji,k} & \cos \Delta\theta_{ji,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{ji,k} \\ \sin \theta_{ji,k} \end{bmatrix} \quad (13)$$

步骤七:观测 $Q(t)$,生成新的观察态 $R(t)$,评估 $R(t)$,保留最优沉积时间个体.其实现过程为

$$r_{ji,k} = \begin{cases} 0 & \cos^2 \theta'_{ji,k} < \text{random} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

步骤八:量子变异操作.通过量子非门更新量子种群 $Q(t)$.从每个个体中随机选出 3 个基因位通过量子非门进行更新,实现过程为

$$\begin{bmatrix} \cos \theta' \\ \sin \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (15)$$

步骤九:采用精英保留策略对量子种群 $Q(t)$ 进行更新,并进行观察操作生成观察态 $R(t)$,进化代数 $t = t + 1$,并转向步骤四.

为了验证基于 QSGA 的宽带 EUV 多层膜的离散化设计的可行性与高效性,将其设计结果与基于 GA^[17] 的多层膜设计的结果进行对比.GA 所采用的相关参数:种群规模为 100,染色体个数为 98,每条染色体上的基因位数为 20,交叉概率为 p_c ,变异概率为 p_m .GA 的其他设计参数均与 QSGA 的设计参数相同.

2 结果与讨论

2.1 宽角度 EUV 多层膜的设计结果与讨论

基于不同参数下的 GA 和 QSGA 的宽角度 Mo/Si 多层膜的设计优化进程对比图如图 1 所示.三种不同参数下的 GA 均出现了“早熟”现象使其陷入局部极值,从而导致了算法的求解精度较低.同时不同参数下的 GA 的求解精度均明显比不同参数下的 QSGA 的求解精度低.以上结果说明了 QSGA 因采用量子比特编码染色体,一个染色体可以表示多个态的叠加,从而增加了种群的多样性,通过量子旋转门进行自适应变异,提高了算法的求解精度.

为了进一步证明基于 QSGA 的宽角度 EUV 多层膜设计方法的优越性,将 QSGA ($\theta_{\min} = 0.1\pi, \theta_{\max} = 0.6\pi$) 与 GA ($p_m = 0.01, p_c = 0.8$) 进化 4500 代后得到的最优解进行反演,得到如图 2 所示的反射光谱.通过对比可得,基于 GA 反演出的反射带宽较窄,而且在入射角较小时,其反射率低于 50%.基于 QSGA 反演出的反射光谱的反射率更高,反射带宽更宽,更接近于理论设计反射率 52%.这也再一次证明了基于 QSGA 在宽角度 Mo/Si 多层膜设计中更具优势.对两种算法设计出的膜系进行了随机误差分析,以宽角度 EUV 多层膜各膜层膜厚的相对变化值为控制参数,例如膜厚按照其理论设计值在 $\pm 0.1\%$ 的范围内进行随机扰动,生

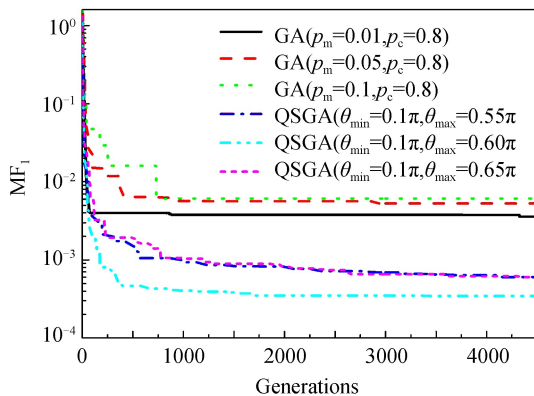


图 1 基于 GA 和 QSGA 的宽角度 Mo/Si 多层膜的离散化膜系设计的优化进程对比

Fig.1 Convergence process of GA and QSGA on wide angle Mo/Si multilayer discrete design

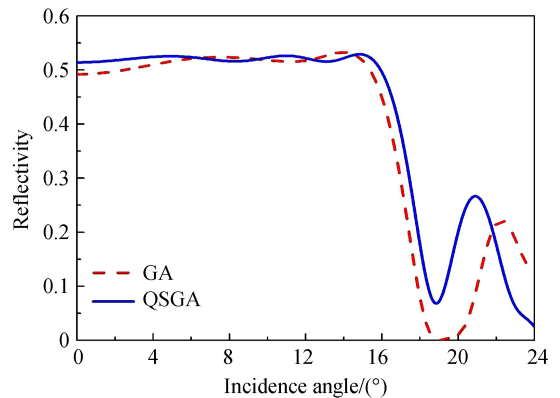


图 2 基于 GA 和 QSGA 的宽角度 Mo/Si 多层膜的离散化膜系设计的反射光谱

Fig.2 Reflection spectra of wide angle Mo/Si multilayer structure designed by GA and QSGA

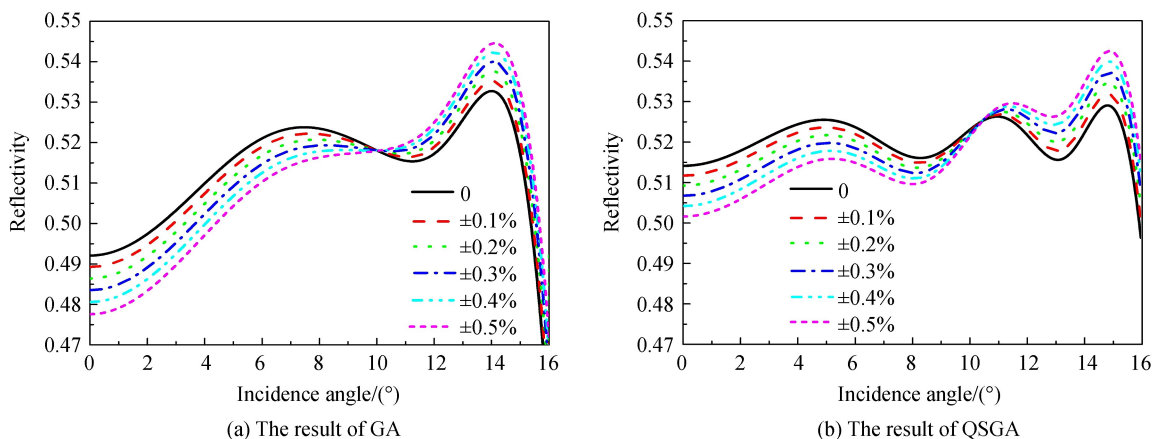


图3 基于GA和QSGA设计的宽角度EUV多层膜的膜层厚度的随机误差分析

Fig.3 Random error analysis of layer thickness of wide angle EUV multilayer structure designed by GA and QSGA

成1000组膜系其各层膜厚在其数值 $\pm 0.1\%$ 变化范围内的随机数,计算其相应的反射光谱,并选取其中与原反射光谱偏差最大的结果.图3给出了基于两种算法设计的宽角度EUV多层膜膜系各膜层厚度随机扰动时对反射光谱的影响.从图3中可以看出,基于QSGA和GA设计的宽角度EUV多层膜膜系各膜层厚度的相对变化不超过 $\pm 0.4\%$ 时,膜系的反射谱变化均不超过 $\pm 2\%$.两种算法设计的膜系在考虑相同膜厚随机误差的情况下,基于QSGA设计的膜系在最恶劣情况下(膜厚随机扰动范围为 $\pm 0.5\%$)的反射光谱仍明显优于基于GA的算法膜系的最理想的结果.

基于以上结果,采用磁控溅射镀膜系统对基于QSGA的宽角度Mo/Si多层膜设计进化4500代后计算出的最优膜系进行镀膜.并对多层膜的EUV反射光谱和掠入射X射线反射曲线(Grazing Incident X-ray Reflectivity, GIXR)进行了检测.并针对宽角度多层膜的EUV反射光谱检测结果,采用进化算法^[26]对各膜层的厚度进行了拟合.图4给出了通过拟合的膜系反演的GIXR曲线和EUV反射光谱分别与其实验检测结果的对比图.从图中可得反演得到的GIXR曲线和EUV反射光谱均与其实验结果符合得较好.从而说明了两个实验检测结果是完全自洽的,也证明了拟合的膜系结构是真实可靠的.从图4中也可以看出基于QSGA的设计结果在实验上镀膜制出了入射角带宽为 15° 、反射率达45%以上的高反射率宽角度EUV多层膜.但镀膜制出的多层膜的光谱性能与理论设计出的多层膜的光谱性能稍有差别,反射角带宽稍窄.这是受磁控溅射镀膜系统的工艺气压、电源的电压和功率等参数的波动所致,而且磁控溅射镀膜系统的沉积速率也存在一定的系统误差,导致每一层膜的厚度与理论设计的膜系厚度有一定的偏差,而镀膜制出的宽角度Mo/Si多层膜共98层,最终由于各膜层厚度误差的累积导致了多层膜的光谱性能相比于理论的膜系的光谱性能稍差,其拟合的膜厚与设计膜厚的偏差的对比图如图5所示.从图中可得拟合的膜系的厚度与设计厚度的误差在 ± 0.06 nm之内,这说明了膜厚进行离散化设计的方法设计出的结果可以在实验镀膜当中取得较好的结

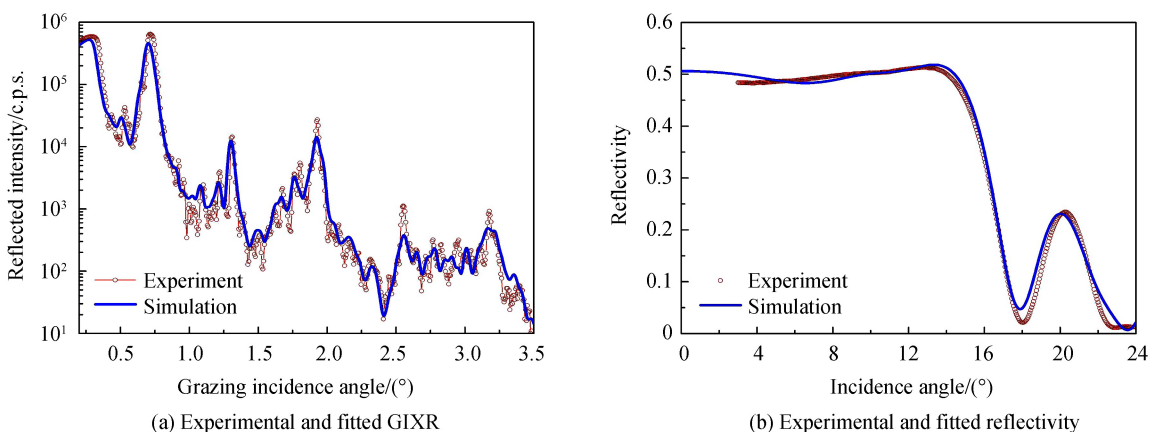


图4 宽角度Mo/Si多层膜的实验检测结果与拟合结果对比

Fig.4 Comparison between experimental and fitted results of wide angle Mo/Si multilayer

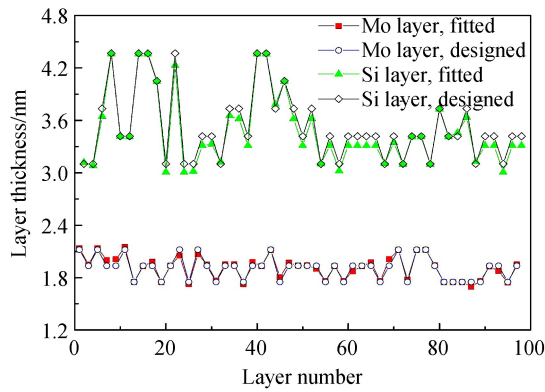


图5 理论设计的宽角度 Mo/Si 多层膜膜厚与拟合出的膜厚对比

Fig.5 Comparison between the designed and fitted thicknesses of wide angle Mo/Si multilayer

果,其设计出的结果均可在实际的镀制过程中实现,使其镀制出的多层膜精度较高。

2.2 宽光谱 EUV 多层膜的设计结果与讨论

为了证明基于 QSGA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜设计方法的优越性,对比了基于不同参数下的 GA 和 QSGA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜的离散化设计方法的求解效率,如图 6 所示.对比分析可得:不同参数下的 GA 的求解精度远低于 QSGA 的求解精度.三种不同参数下的 GA 均在 500 代以内便出现“停滞”现象,造成其求解精度最低.以上研究表明,基于 QSGA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜设计方法具有求解精度高的优势,充分说明了 QSGA 采用量子比特进行编码,因此使一个染色体表示多个叠加态,从而加大了解空间的多样性,提高了算法的并行性,提高了算法的求解精度,同时通过量子旋转门更新种群,使得进化过程更具方向性,提高了算法的求解精度。

为了进一步证明基于 QSGA 设计出的多层膜光谱性能更优越,绘制了基于 GA ($p_m=0.01, p_c=0.8$) 和 QSGA ($\theta_{\min}=0.1\pi, \theta_{\max}=0.6\pi$) 的宽光谱 Mo/Si 多层膜的设计方法进化 4 500 代后最优解反演出的反射光谱的对比图,如图 7 所示.基于 GA 反演出的反射光谱带宽较窄,波动性较大,与理论设计反射率 26% 偏差较大.基于 QSGA 反演出的反射光谱较为理想,可实现入射光波长为 13~15 nm,反射率达 26% 左右的宽光谱 Mo/Si 多层膜的设计.进一步分析了制备的随机误差,用来评估基于两种算法设计的膜系.宽光谱 EUV 多层膜各膜层膜厚的相对变化值,例如膜厚按照其理论设计值在 $\pm 0.5\%$ 的范围内进行随机扰动,随机生成 1 000 组每层膜厚扰动在 $\pm 0.5\%$ 内变化的数列,计算其相应的反射光谱,选取其中与设计目标偏差最大的结果.图 8 给出了基于两种算法设计的宽光谱 EUV 多层膜膜系各膜层厚度产生随机变化时对其反射光谱的影响.从图 8 中可以看出,基于 QSGA 设计的膜系的随机膜厚误差增加 $\pm 0.5\%$,反射率的变化不超过 ± 0.015 .在各膜层厚度变化范围相同时,相比基于 GA 反演的反射光谱的变化,基于 QSGA 反演的反射光谱的变化

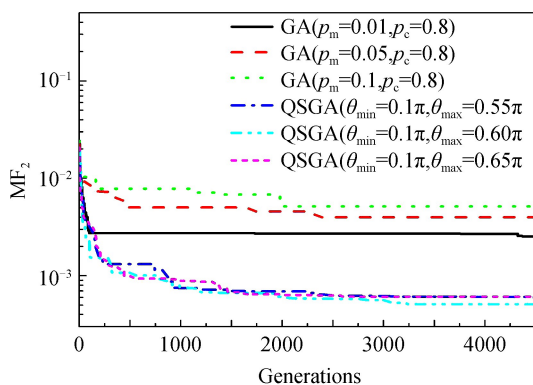


图6 基于 GA 和 QSGA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜的离散化膜系设计的优化进程对比

Fig.6 Convergence process of GA and QSGA on wide spectrum Mo/Si multilayer discrete design

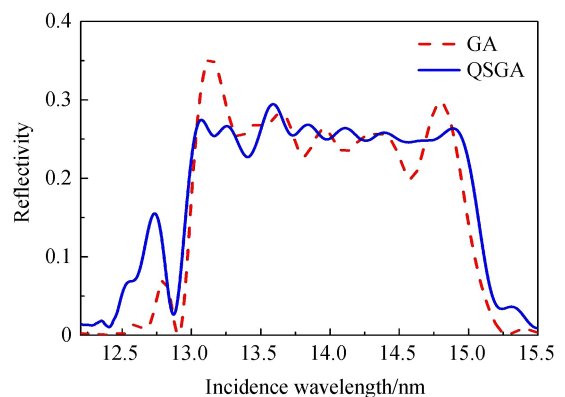


图7 基于 GA 和 QSGA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜的离散化膜系设计的反射光谱

Fig.7 Reflection spectra of wide spectrum Mo/Si multilayer structure designed by GA and QSGA

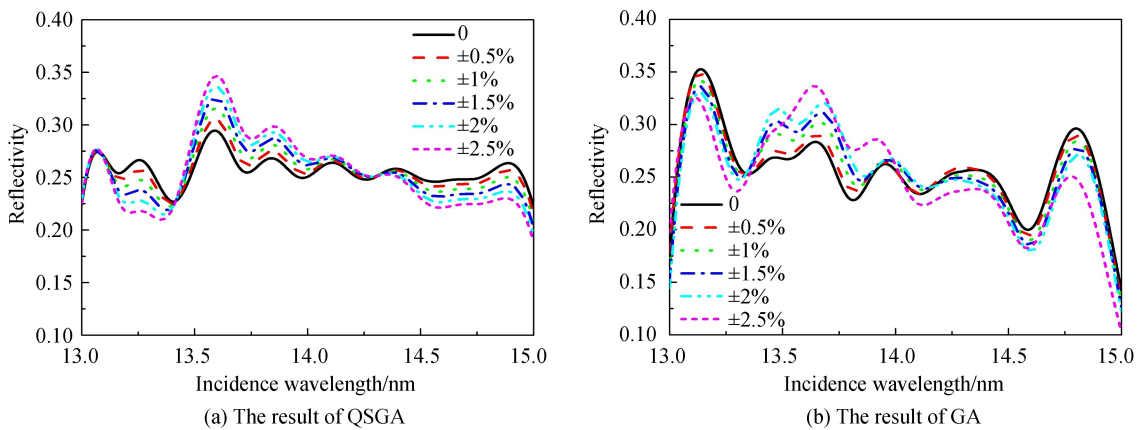


图 8 基于 GA 和 QSGA 设计的宽光谱 EUV 多层膜的膜层厚度的随机误差分析

Fig.8 Random error analysis of layer thickness of wide spectrum EUV multilayer structure designed by GA and QSGA

更小,这说明 QSGA 设计出的膜系的稳定性更好.同时基于 QSGA 设计的膜系在最恶劣情况下(膜厚随机扰动范围为 $\pm 2.5\%$)的反射光谱仍明显优于基于 GA 的算法膜系的最理想的结果.

依据 QSGA 的进化 4 500 代后设计结果,采用磁控溅射镀膜系统镀制出了宽光谱 Mo/Si 多层膜.并对宽光谱 Mo/Si 多层膜的 EUV 反射光谱和 GIXR 进行检测,针对宽光谱多层膜的 EUV 反射光谱检测结果,通过进化算法来拟合各膜层的厚度.图 9 给出了基于拟合的膜系反演的 GIXR 曲线和 EUV 反射光谱分别与其

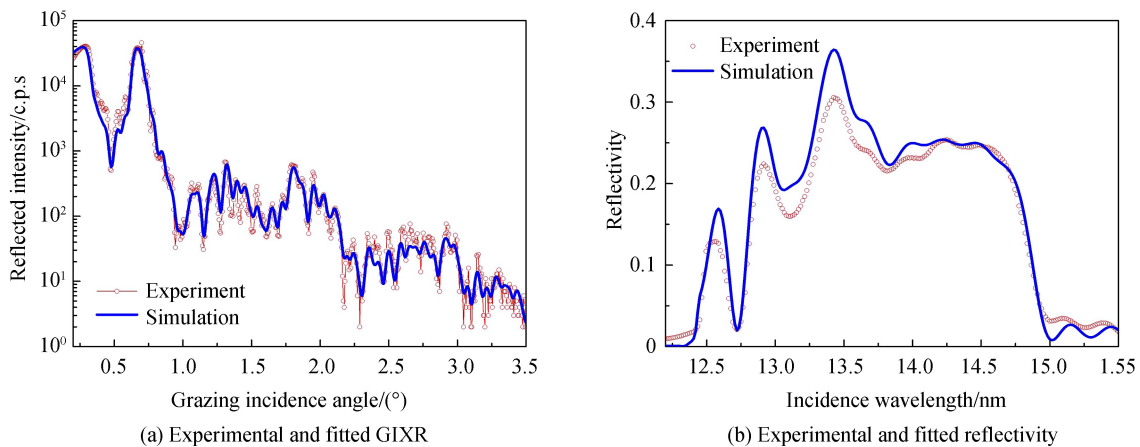


图 9 宽光谱 Mo/Si 多层膜的实验检测结果与拟合结果对比

Fig.9 Comparison between experimental and fitted results of wide spectrum Mo/Si multilayer

检测结果的对比图.通过对比分析可得,反演出的 GIXR 曲线与实验检测结果较为符合,同时拟合得到的 EUV 反射光谱与实验检测结果也符合得较好.说明两个实验检测结果是完全自洽的,也体现了通过进化算法拟合出的膜厚较为可信,可代表膜系的真实结构.基于 QSGA 的设计结果镀制出的宽光谱 Mo/Si 多层膜可实现入射光波长为 13~15 nm,反射率在 20%以上的高反射率.但相比于理论设计的反射光谱,其反射光谱带发生了些许偏移.造成此现象的原因同样是由于磁控溅射镀膜系统的工艺气压、电源的电压和功率等参数的不够稳定所致,和磁控溅射镀膜系统的沉积速率存在一定的系统误差,从而导致各膜层的厚度与设计结果存在一定的偏

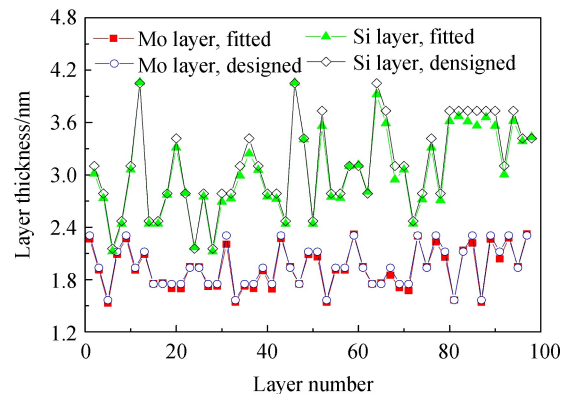


图 10 理论设计的宽光谱 Mo/Si 多层膜膜系结构与拟合出的膜系结构对比

Fig.10 Comparison between the designed and fitted thicknesses of wide spectrum Mo/Si multilayer

差,最终导致了镀制出的多层膜的反射带相比于理论的反射带向短波方向发生了偏移,其拟合的膜厚与理论膜厚的偏差的对比图,如图 10 所示.从图 10 中可得,拟合的膜系的厚度与设计膜系的厚度有些许偏差,误差在 ± 0.1 nm 之内.基于 QSGA 的离散化设计方法结合实验设备进行设计,使其设计出的膜厚均为实验设备可镀制的厚度,使其镀制的膜厚精度较高.

3 结论

QSGA 是一种采用量子编码和量子计算的进化策略,具有较强的全局搜索能力.本文将 QSGA 应用于宽带 EUV 多层膜的离散化膜系设计中.研究表明,相比于基于 GA 的宽带 EUV 多层膜离散化设计方法,QSGA 求解精度更高.同时,基于 QSGA 对多层膜膜厚进行离散化设计,使其设计结果应用在实验中具有良好的效果,镀制出的多层膜膜厚精度更高.依据 QSGA 的设计结果,采用磁控溅射镀膜系统镀制出了入射角为 $0^\circ\sim 15^\circ$ 、反射率达 45% 以上的宽角度 EUV 多层膜和入射光波长为 13~15 nm、反射率达 20% 以上的宽光谱 EUV 多层膜.相关工作的展开为宽带 EUV 多层膜的设计提供了另外一种较为优选的设计方法,丰富了宽带 EUV 多层膜膜系设计的优化算法,且离散化设计方法也使得其设计结果能够较好地应用于实际多层膜的镀制过程中.

参考文献

- [1] KOZHEVNIKOV I V, YAKSHIN A E, BIJKERK F. Wideband multilayer mirrors with minimal layer thicknesses variation[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 9276-83.
- [2] WONISCH A, WESTERWALBESLOH T, HACHMANN W, *et al.* Aperiodic nanometer multilayer systems as optical key components for attosecond electron spectroscopy[J]. *Thin Solid Films*, 2004, **s464-465**(1): 473-477.
- [3] CHEN Hong, LAN Hui, CHEN Zi-qi, *et al.* Experimental study on laser produced tin droplet plasma extreme ultraviolet light source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(7): 75202-075202.
陈鸿, 兰慧, 陈子琪, 等. 脉冲激光辐照液滴锡靶等离子体极紫外辐射的实验研究[J]. *物理学报*, 2015, **64**(7): 75202-075202.
- [4] HUANG Q, MEDVEDEV V, ROBBERT V D K, *et al.* Spectral tailoring of nanoscale EUV and soft x-ray multilayer optics[J]. *Applied Physics Reviews*, 2017, **4**(1): 011104.
- [5] SZENTGYORGYI A, CHRISTENSEN F E, ROLL J, *et al.* Design of grazing-incidence multilayer supermirrors for hard-x-ray reflectors[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(34): 7935-44.
- [6] KOZHEVNIKOV I V, BUKREEVA I N, ZIEGLER E. Design of X-ray supermirrors[J]. *Nuclear Inst and Methods in Physics Research A*, 2001, **460**(2): 424-443.
- [7] ZHAO Yong-peng, XU Qiang, XIAO De-long, *et al.* Time behavior and optimum conditions for the Xe gas extreme ultraviolet source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(24): 1706-1721.
赵永蓬, 徐强, 肖德龙, 等. Xe 介质极紫外光源时间特性及最佳条件研究[J]. *物理学报*, 2013, **62**(24): 215-221.
- [8] AQUILA A L, SALMASSI F, DOLLAR F, *et al.* Developments in realistic design for aperiodic Mo/Si multilayer mirrors[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(21): 10073-10078.
- [9] YAKSHIN A E, KOZHEVNIKOV I V, ZOETHOUT E, *et al.* Properties of broadband depth-graded multilayer mirrors for EUV optical systems[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(7): 6957-71.
- [10] CHEN Zhao-quan, LIU Ming-hai, LIU Yu-ping, *et al.* Fabrication of transparent conductive AZO (ZnO:Al) film by plasma enhanced chemical vapor deposition[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(6): 4260-4266.
陈兆权, 刘明海, 刘玉萍, 等. PECVD 制备 AZO(ZnO:Al)透明导电薄膜[J]. *物理学报*, 2009, **58**(6): 4260-4266.
- [11] CHEN Ming, ZHOU Xi-ying, MAO Xiu-juan, *et al.* Influence of external magnetic field on properties of aluminum-doped zinc oxide films prepared by RF magnetron sputtering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(9): 98103-098103.
陈明, 周细应, 毛秀娟, 等. 外加磁场对射频磁控溅射制备铝掺杂氧化锌薄膜影响的研究[J]. *物理学报*, 2014, **63**(9): 98103-098103.
- [12] CHEN Chao, JI Yong, GAO Xiao-yong, *et al.* Study on the deposition of aluminum-doped zinc oxide films using direct-current pulse magnetron reactive sputtering technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(3): 036104.
陈超, 冀勇, 郜小勇, 等. 直流脉冲磁控反应溅射技术制备掺铝氧化锌薄膜的研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(3): 036104.
- [13] HAN Jun, ZHANG Peng, GONG Hai-bo. Influence of the growth conditions on the transparent conductive properties of Zn O:Al thin films grown by pulsed laser deposition[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(21): 216102.
韩军, 张鹏, 巩海波, 等. 生长条件对脉冲激光沉积制备 ZnO:Al 薄膜光电性能的影响[J]. *物理学报*, 2013, **62**(21): 216102.
- [14] LIANG Shuang, HUANG Zeng-xia, DU Xiao-long. Modulation of electrical and optical properties of gallium-doped ZnO

- films by radio frequency magnetron sputtering[J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(6): 478-484.
- [15] CHENG Xin-bin, WANG Zhan-shan, ZHANG Zhong, *et al.* Design of X-ray super-mirrors using simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 787-791.
程鑫彬,王占山,张众,等. 基于模拟退火算法的宽角度 X 射线超反射镜设计研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(5):787-791.
- [16] WANG Hong-chang, WANG Zhan-shan. The optimizing and designing method of multilayer film[J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, **26**(5): 50-53.
王洪昌,王占山. 多层膜优化设计方法[J]. 应用光学, 2005, **26**(5): 50-53.
- [17] HAUPT R L, HAUPT S E. The binary genetic algorithm[M]. *Practical Genetic Algorithms*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2004.
- [18] ZHANG Chao, ZHANG Jie-ruì, WANG Yi-ming, *et al.* Design of broad-angle extreme ultraviolet multilayer coatings based on quantum evolutionary algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(6): 0631001.
张超,张杰瑞,王一名,等. 基于量子进化算法的宽角度极紫外多层膜设计[J]. 光学学报, 2017, **37**(6): 0631001.
- [19] KUANG Shang-qi, ZHANG Chao, WANG Yi-ming, *et al.* Application of improved quantum evolutionary algorithm in design of broadband EUV multilayer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(8): 2046-2056.
匡尚奇,张超,王一名,等. 改进型量子进化算法在宽带 EUV 多层膜设计中的应用[J]. 光学精密工程, 2017, **25**(8): 2046-2056.
- [20] LI P, LI S. Quantum-inspired evolutionary algorithm for continuous space optimization based on Bloch coordinates of qubits[J]. *Neurocomputing*, 2008, **72**(1-3): 581-591.
- [21] ZHOU Xiang-yan, ZHANG Chao, KUANG Shang-qi, *et al.* Analysis of the structure of optical thin film based on quantum-inspired genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(12): 1203002.
周祥燕,张超,匡尚奇,等. 基于量子衍生遗传算法的光学薄膜结构分析[J]. 中国激光, 2017, **44**(12): 1203002.
- [22] HAN K H, KIM J H. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, **6**(6): 580-593.
- [23] DAI H, YANG Y, LI C, *et al.* Quantum interference crossover-based clonal selection algorithm and its application to traveling salesman problem[J]. *IEEE Transactions on Information And Systems*, 2009, **92**(1): 78-85.
- [24] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. X-ray interactions : photoabsorption , scattering , transmission , and reflection at E=50-30, 000 eV , Z=1-92[J] . *Atomic Data and Nuclear Data Tables* , 1993 , **54** (4): 181 - 342.
- [25] HAN K H, KIM J H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem[J]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers* , 2000, 2: 1354-1360.
- [26] WANG X, WANG X D, KUI L U. Optical thin film optimization design using adaptive real-coded genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, **21**(1): 51-55.