第 37 卷 第 6 期
2017 年 6 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 37, No. 6
June, 2017

基于量子进化算法的宽角度极紫外多层膜设计

张 超[1], 张杰瑞[1], 王一名[1], 匡尚奇[1], 谢 耀[2]

[1]长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;

[2]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 提出了一种基于实数编码量子进化算法(RQEA)的宽角度极紫外(EUV)多层膜理论膜系的设计方法。采用基于实数编码的遗传算法(RGA)和 RQEA 对宽角度 Mo/Si 多层膜进行了理论设计和分析,发现 RQEA 具有种群规模小、搜索效率高和求解精度高的明显优势,体现出 RQEA 在光学薄膜设计领域的潜在应用价值。同时,设计出入射光波长为 13.5 nm、在入射角 0°~18°范围内反射率可达 50%的宽反射带 Mo/Si 多层膜。

关键词 薄膜; 多层膜设计; 量子进化算法; 宽角度极紫外多层膜

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0631001

Design of Broad-Angle Extreme Ultraviolet Multilayer Coatings Based on Quantum Evolutionary Algorithm

Zhang Chao[1], Zhang Jierui[1], Wang Yiming[1], Kuang Shangqi[1], Xie Yao[2]

[1] *School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin* 130022, *China*;

[2] *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

Abstract A design approach of the theoretical film system with broad-angle extreme ultraviolet (EUV) multilayers coatings based on the real-coded quantum evolutionary algorithm (RQEA) is proposed. Based on the RQEA and the real-coded genetic algorithm (RGA), the theoretical design and analysis for Mo/Si multilayers coatings with broad angles is performed. It is found that the RQEA has obvious advantages of small population, high efficiency, and high accuracy, which makes the RQEA possess potential application value in the field of optical film design. In addition, the broadband Mo/Si multilayer coatings with reflectivity of up to 50% at incidence angle of 0°-18° and at incident wavelength of 13.5 nm are designed.

Key words thin films; design of multilayer coatings; quantum evolutionary algorithm; broad-angle extreme ultraviolet multilayers

OCIS codes 310.4165; 310.6805; 310.6188

1 引 言

在极紫外(EUV)波段存在着大量的原子共振线,几乎所有的物质的折射率均接近于 1,且对光的吸收长度仅为纳米量级。在此波段内由于强吸收作用,不能采用传统的透射式光学系统,而一般采用基于 EUV 多层膜构建的反射式光学系统。为实现高反射率,反射式光学元件表面必须镀制膜厚达纳米量级的多层膜,因此 EUV 多层膜是光学系统中重要的光学元件,在 EUV 天文学、EUV 光谱学、EUV 光刻技术、等离子体诊断和同步辐射等研究领域具有重要应用价值。其中 EUV 多层膜是 EUV 光刻技术的关键和核心反射光学元件,而 EUV 光刻技术是最具潜力的下一代光刻技术之一[1],因此,EUV 多层膜的研发备受国内外广泛的

收稿日期: 2016-12-23; **收到修改稿日期**: 2017-02-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61405189)、吉林省科技发展计划(20150101019JC)

作者简介: 张 超(1997—),男,本科生,主要从事量子进化算法方面的研究。E-mail: 17843153375@163.com

导师简介: 匡尚奇(1981—),男,博士,副教授,主要从事量子光子与量子进化算法方面的研究。

E-mail: physicskuang@sina.com(通信联系人)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

关注。2007 年，Yakshin 等[2]提出 Mo 和 Si 是应用于 EUV 多层膜设计的理想材料，可以实现高反射率，且在 13.5 nm 处其反射率能够实现的最高水平可达 70.15%。以波长为 13.5 nm 的光为波源，荷兰的 FOM-Rijnhuizen 研究所研制出入射角为 0°～18°时反射率可达 50%的 Mo/Si 多层膜[3]。美国 Lawrence Livermore 国家实验室、日本的 Nikon 公司以及国内的中国科学院上海光学精密机械研究所、同济大学及长春光学精密机械与物理研究所等相关单位均进行了 EUV 多层膜方面的研究，极大地促进了 EUV 多层膜领域的发展。传统的 EUV Mo/Si 多层膜大多采用等周期膜系，但其干涉特性导致反射角带宽很窄，一般为 0°～9°。而非等周期膜系结构的 EUV 多层膜能够实现宽角度入射，并且具有较高的反射率[3]。EUV 光刻系统的照明系统需采用反射式设计，其反射光学元件需镀有多层膜以提高反射率，而宽角度 EUV 多层膜可以满足 EUV 光刻照明系统中需用小反射镜获得大角度入射的条件，因此其研发具有重要的学术意义和实际应用价值[4-6]。

EUV 多层膜的膜系设计是 EUV 多层膜研发的首要和关键问题，目前普遍采用的算法有退火算法[7]和非线性最小二乘算法[3]及实数编码遗传算法(RGA)[8-13]。退火算法虽对目标函数要求不高，实现起来比较简单，但其运算速度较低且不易求得全局极优值。非线性最小二乘算法具有运算速度高、收敛速度快的特点，但其对初始优化值的要求很高。RGA 具有全局搜索能力强和适用性强的优点，成为普遍采用的算法，但由于 RGA 是一种概率优化算法，因此为获得较高的优化效率和求解精度，其往往具有种群规模大和计算效率低的缺点。

基于实数编码的量子进化算法(RQEA)[14-20]是将量子计算与进化算法相结合的一种优化搜索算法。它通过量子位对染色体进行编码，一个染色体可以表达出多个量子态，增加了种群的多样性，并通过量子旋转门更新最优个体，具有种群规模小、搜索效率高、求解精度高的优势。目前，RQEA 在求解 0-1 背包问题[21]、数值优化问题[16]和旅行商问题[22]中已取得了较好的优化结果。同时，RQEA 也已应用于工程设计中，体现了其实际应用价值。本文提出一种基于 RQEA 的宽角度 EUV 多层膜理论膜系的设计方法，采用量子编码以及“求精”和“求泛”结合的搜索策略，以解决传统 RGA 在膜系设计中存在的问题。对基于 RQEA 和 RGA 的多层膜设计的求解效率进行比较，并加以分析，证明了 RQEA 在宽角度高反射率 EUV 多层膜设计中的可行性与优越性，进而分析了各进化参数对求解效率的影响。相关工作为宽角度高反射率 EUV 多层膜的设计开辟了新的途径，其设计的结果也为镀膜工艺提供了新的可供选择的多层膜膜系结构。

2　基本原理

2.1　EUV 多层膜反射理论

EUV 多层膜通常由两种密度不同且折射率不同的材料交替沉积制成，其中高折射率材料相当于原子层间的吸收层，而低反射率材料相当于原子层间的间隔层。目前，EUV 多层膜研发领域广泛采用的是 Mo 和 Si 两种材料交替镀制的 Mo/Si 多层膜[23-25]。在 Mo/Si 多层膜设计方面，多层膜的膜系结构有二层模型(仅考虑 Mo 层和 Si 层)和四层模型(考虑 Mo 层、Si 层以及两层之间的 $MoSi_2$ 扩散层)[7-9,26-27]。二层模型的优点在于设计方法和计算较为简单，且易于获得较为理想的光谱设计结果，但由于未考虑实际 Mo 层和 Si 层之间的扩散，因此理论设计与实验结果往往差别较大[28]，为具体的实验工艺带来较大的不便。所以，为了获得更加符合实际的膜系设计结果，在设计领域更适于采用四层模型，但四层模型的计算过程复杂，且获得理想的光谱设计结果难度较大，对多层膜设计优化算法的搜索优化能力提出了较高的要求。Mo/Si 多层膜的四层模型在一个周期内的膜层结构如图 1 所示。

Mo/Si 多层膜包含 m 个周期，Mo 层和 Si 层的膜层总数为 $2m$，采用菲涅耳系数递推公式[25,29-32]计算多层膜的表面反射率。从第一个膜层开始编号为 1，2，3，…，j，…，$N-1$，N，第 j 层与第 $j+1$ 层界面上的菲涅耳反射系数为 $r_{j+1,j}$。s 偏振光的菲涅耳反射系数为

$$r_{j+1,j}^{s}=\frac{n_{j+1}\cos\theta_{j+1}-n_j\cos\theta_j}{n_{j+1}\cos\theta_{j+1}+n_j\cos\theta_j},\tag{1}$$

而 p 偏振光的菲涅耳反射系数为

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

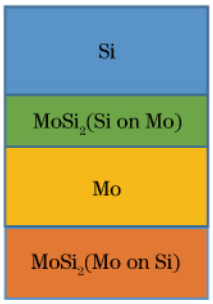

图 1　一个周期内的 Mo/Si 多层膜的四层模型结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of four-layer model of Mo/Si multilayer coatings within one period

$$r_{j+1,j}^{\mathrm{p}}=\frac{n_j\cos\theta_{j+1}-n_{j+1}\cos\theta_j}{n_j\cos\theta_{j+1}+n_{j+1}\cos\theta_j},\tag{2}$$

第 j 层的反射系数 r_j 为

$$r_j=\frac{r_{j,j+1}+\exp(-2\mathrm{i}\beta_j)\cdot r_{j-1}}{1-r_{j,j+1}\cdot\exp(-2\mathrm{i}\beta_j)\cdot r_{j-1}},\tag{3}$$

$$\beta_j=\frac{2\pi}{\lambda}n_jt_j\cos\theta_j,\tag{4}$$

式中 λ 为入射光波长，n_j、θ_j 和 t_j 分别为第 j 层膜的复折射率、入射角和膜层厚度。考虑多层膜的界面粗糙度，采用 Debye-Waller 因子，反射系数可修正为

$$\tilde{r}_{j,j+1}=r_{j,j+1}\cdot\exp(-n_{j+1}n_j\cos\theta_{j+1}\cos\theta_j\cdot 8\pi^2\sigma_j^2/\lambda^2),\tag{5}$$

式中 σ_j 为膜层间的界面粗糙度。一般认为多层膜的基底为半无限大介质，故基底的反射系数 $r_0=0$，通过对反射率系数进行迭代计算，得到最上层膜层（N 层）的反射率 $R=|r_N|^2$，其中 r_N 为最上层膜层的反射系数。

2.2　基于 RQEA 的宽角度 EUV 多层膜的膜系设计

在基于四层模型的宽角度 Mo/Si 多层膜的设计过程中，令 Mo/Si 多层膜共有 49 个周期。由于 Mo 和 Si 之间的扩散层 $MoSi_2$ 膜层很薄，可近似认为扩散层的物理厚度和化学性质不变，同时一般 Mo 层在 Si 层上的 $MoSi_2$ 扩散层厚度较 Si 层在 Mo 层上的厚，因此分别令 Mo 层在 Si 层上的扩散层 $MoSi_2$ 厚度和 Si 层在 Mo 层上的扩散层 $MoSi_2$ 的厚度约为 1.0 nm 和 0.5 nm。同时，Si、Mo 和 $MoSi_2$ 的密度采用相应材料的体密度数值，并利用数据库[33]中的原子散射因子数据计算材料的复折射率。在基于 RQEA[14-20]的宽角度 Mo/Si 多层膜的设计过程中，对 Mo 和 Si 的膜层厚度进行搜索，具体的算法流程如图 2 所示，其中 n 为迭代次数。相应步骤如下。

1）设定基于量子编码 EUV 多层膜设计的初始进化参数。其中量子种群规模为 10，初始旋转角 $\theta_0=0.01\pi$。在互补变异过程中，“求精”和“求泛”次数分别为 m_1 和 m_2（$m_1>m_2$）。在离散交叉过程中，选择的优秀个体个数为 s，每个优秀个体连续交叉次数为 m_3，终止代数为 2000。

2）量子种群初始化。对 Mo/Si 多层膜膜系参数进行量子编码，生成量子染色体的量子种群 $\boldsymbol{Q}$，表示为

$$\boldsymbol{Q}=[q_1\quad q_2\quad q_3\quad q_4\quad q_5\quad q_6\quad q_7\quad q_8\quad q_9\quad q_{10}],\tag{6}$$

其中第 i 个个体的量子染色体 $\boldsymbol{q}_i$ 为

$$\boldsymbol{q}_i=\begin{bmatrix}t_{\mathrm{Mo-1},i} & t_{\mathrm{Si-1},i} & t_{\mathrm{Mo-2},i} & \cdots & t_{\mathrm{Si-48},i} & t_{\mathrm{Mo-49},i} & t_{\mathrm{Si-49},i}\\ \cos\theta_{1,i} & \cos\theta_{2,i} & \cos\theta_{3,i} & \cdots & \cos\theta_{96,i} & \cos\theta_{97,i} & \cos\theta_{98,i}\\ \sin\theta_{1,i} & \sin\theta_{2,i} & \sin\theta_{3,i} & \cdots & \sin\theta_{96,i} & \sin\theta_{97,i} & \sin\theta_{98,i}\end{bmatrix},\tag{7}$$

式中 t_{Si} 和 t_{Mo} 分别表示 Si 层和 Mo 层的膜层厚度，而染色体的量子位相应的概率幅为 $[\cos\theta_{j,i}\ \sin\theta_{j,i}]^{\mathrm{T}}$。

3）计算各量子编码的 Mo/Si 多层膜膜系的适应度，选出最优的多层膜膜系。在此过程中，评价函数为

$$f_{\mathrm{MF}}=\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}}[R_0(\theta)-R(\theta)]^2\mathrm{d}\theta,\tag{8}$$

式中 f_{MF} 为个体的评价系数；θ 为入射角；$R_0(\theta)$ 为设计的目标反射率，宽角度高反射率 Mo/Si 多层膜的目标反射率 $R_0(\theta)=50\%$（$0°\leqslant\theta\leqslant18°$）；$R(\theta)$ 为依据某一个体计算出的 Mo/Si 多层膜的反射率。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

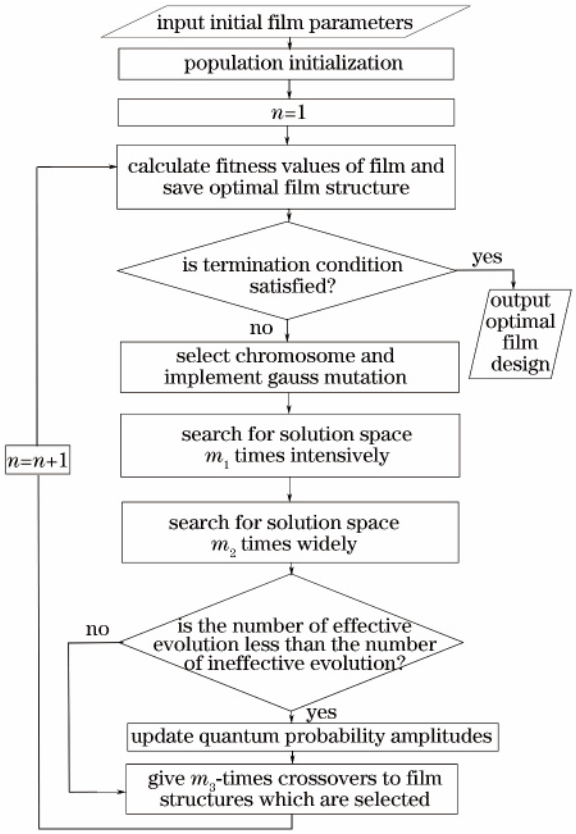

图 2　RQEA 流程图

Fig. 2　Flow chart of RQEA

4）判断是否达到设计要求，达到则输出最优个体膜系。否则，继续进化。

5）通过互补变异和离散交叉，更新代表多层膜膜系的量子个体基因[16]。

6）进化代数加 1，并转向步骤 3）。

为验证基于 RQEA 的宽角度 EUV 多层膜设计方法的可行性，将基于 RQEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜膜系设计的效率和精度与基于 Deb 等[10]给出的基于遗传算法的多层膜设计的进行对比分析。在基于 RGA 的宽角度 EUV 多层膜设计中，多层膜的理论模拟同样基于四层模型，对 49 个多层膜周期对应的 98 个膜层厚度参数进行优化，膜层厚度的搜索区间为 1.5～4.5 nm。同时二者求解的目标是完全相同的，即入射的光波波长固定为 13.5 nm，入射角 θ 为 0°～18°，目标反射率 $R_0(\theta)=50\%$。但两种算法的差异在于 RGA 的种群规模为 100，交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 分别为 0.1 和 0.9。

3　理论分析与讨论

3.1　基于 RQEA 和 RGA 的宽角度 Mo/Si 多层膜的理论设计

为分析 RQEA 中进化参数值对多层膜求解效率的影响，设置了多组进化参数值进行优化求解，基于不同进化参数的进化结果如图 3 所示，基于不同参数下最优解计算出的反射光谱如图 4 所示。将图 3，4 进行对比分析表明，在“求精”次数 m_1 较大、“求泛”次数 m_2 较小且选择的优秀个体个数 s 较大的情况下，多层膜求解的效率较高且寻优的精度较高，并且随着进化代数的增加，该特性也将表现得越明显。这说明在 RQEA 中加大对优秀个体的进化压力能促进进化效率的提高，同时计算出的反射光谱的反射平台也更加平滑。

图 5 和图 6 给出了多组进化参数下，基于 RGA 的宽角度多层膜设计的进化结果及基于最优解计算出的反射光谱，对比分析表明，RGA 中的交叉算子 η_c 和变异算子 η_m 的具体数值同样对算法的进化效率和求解精度以及反演出的反射光谱具有重要的影响，并且随着进化代数的逐步增加，进化参数的影响也越明显。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

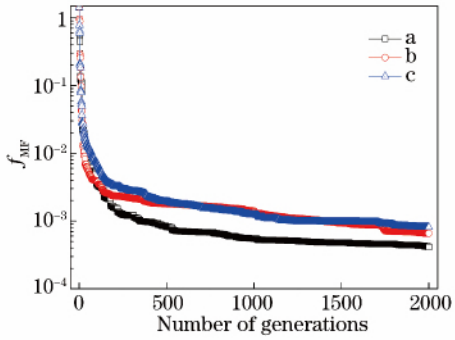

图 3　量子种群数为 10 时，在不同参数下基于 RQEA 的宽角度 EUV Mo/Si 多层膜设计程序的评价系数 f_{MF} 与进化代数的关系。 a：$m_1=8$，$m_2=2$，$m_3=4$，$s=4$；b：$m_1=10$，$m_2=4$，$m_3=4$，$s=4$；c：$m_1=4$，$m_2=2$，$m_3=4$，$s=2$

Fig. 3　Relationship between evaluation coefficient f_{MF} and number of generations in design of broad-angle EUV Mo/Si multilayer coatings based on RQEA under different parameters when number of quantum population is 10. a：$m_1=8$，$m_2=2$，$m_3=4$，$s=4$；b：$m_1=10$，$m_2=4$，$m_3=4$，$s=4$；c：$m_1=4$，$m_2=2$，$m_3=4$，$s=2$

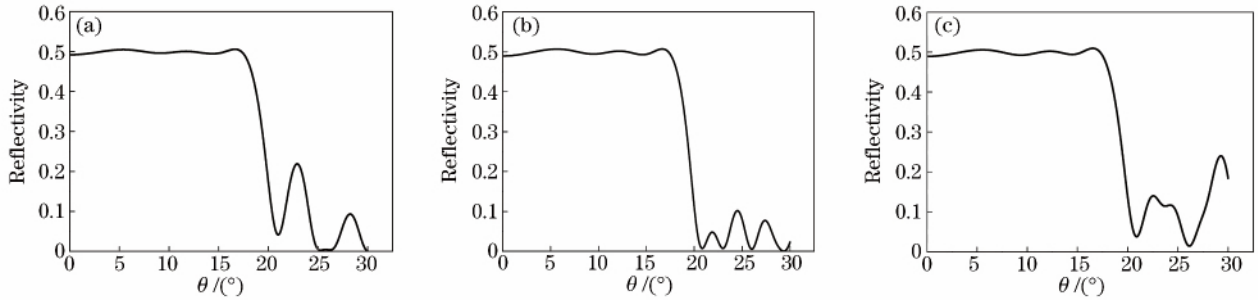

图 4　量子种群数为 10 时，不同参数下基于 RQEA 最优设计的宽角度 Mo/Si 多层膜反射谱。

(a) $m_1=8$，$m_2=2$，$m_3=4$，$s=4$；(b) $m_1=10$，$m_2=4$，$m_3=4$，$s=4$；(c) $m_1=4$，$m_2=2$，$m_3=4$，$s=2$

Fig. 4　Reflection spectra of optimally designed broad-angle EUV Mo/Si multilayer coatings based on RQEA under different parameters when number of quantum population is 10. (a) $m_1=8$，$m_2=2$，$m_3=4$，$s=4$；(b) $m_1=10$，$m_2=4$，$m_3=4$，$s=4$；(c) $m_1=4$，$m_2=2$，$m_3=4$，$s=2$

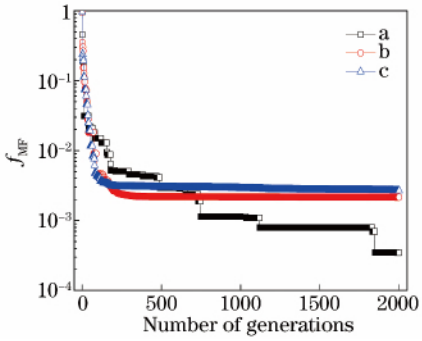

图 5　种群数为 100 时，不同参数下基于 RGA 的宽角度 Mo/Si 多层膜最优膜系的评价系数 f_{MF} 与进化代数的关系。 a：$\eta_c=1$，$\eta_m=1$；b：$\eta_c=2$，$\eta_m=5$；c：$\eta_c=2$，$\eta_m=10$

Fig. 5　Relationship between evaluation coefficient f_{MF} and number of generations in design of broad-angle Mo/Si multilayer coatings based on RGA under different parameters when number of population is 100. a：$\eta_c=1$，$\eta_m=1$；b：$\eta_c=2$，$\eta_m=5$；c：$\eta_c=2$，$\eta_m=10$

3.2　基于 RQEA 和 RGA 的宽角度 Mo/Si 多层膜设计结果的比较分析

在对基于 RQEA 和基于 RGA 的宽角度多层膜设计研究的基础上，对基于两种算法的最优进化过程进行对比分析，结果如图 7 所示。分析表明，基于 RQEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜的设计寻优质量明显优于基于 RGA 的，并且具有收敛速度快和求解精度高的优点。值得注意的是，基于 RQEA 的程序设计中采用的种群数 10 远小于 RGA 采用的种群数 100，同时也远小于膜系设计中所要优化的参数总数（Mo 和 Si 膜层厚度

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

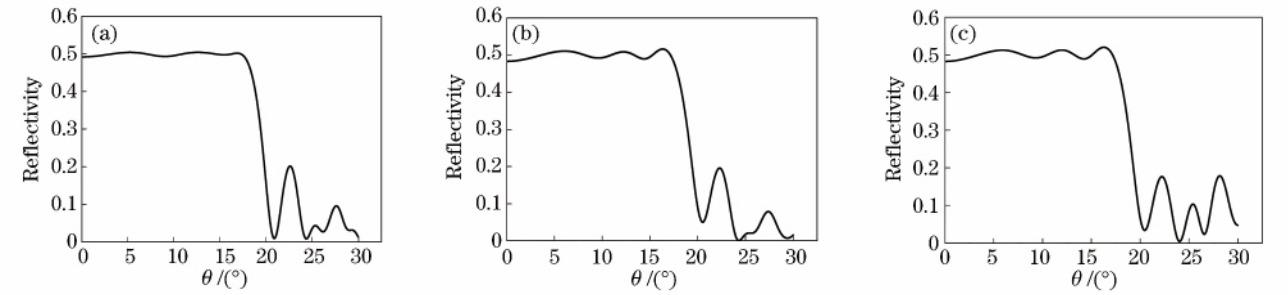

图 6　种群数为 100 时，不同参数下基于 RGA 最优设计的宽角度 Mo/Si 多层膜反射光谱。

(a) $\eta_c=1,\eta_m=1$；(b) $\eta_c=2,\eta_m=5$；(c) $\eta_c=2,\eta_m=10$

Fig. 6　Reflection spectra of optimally designed of broad-angle Mo/Si multilayer coating based on RGA under different parameters when number of population is 100. (a) $\eta_c=1$, $\eta_m=1$; (b) $\eta_c=2$, $\eta_m=5$; (c) $\eta_c=2$, $\eta_m=10$

的参数共 98 个)，这充分体现了 RQEA 具有可以在小种群条件下进行多参数优化求解的优势，而这是传统 RGA 无法与之相比的，而种群规模小也就意味着计算复杂度的降低及计算过程的简化。这是由于 RQEA 中个体基因编码采用了量子编码，量子编码由实数编码和量子概率幅构成，其中量子概率幅通过量子旋转门实现更新，进而控制实数部分的进化方向与变异的大小，这一过程体现了量子态的叠加特性，因而具有一定的并行计算能力。因此，基于 RQEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜设计可以在在小种群规模的条件下，进行多参数的搜索与优化，并获得较为理想的优化效率和求解精度。

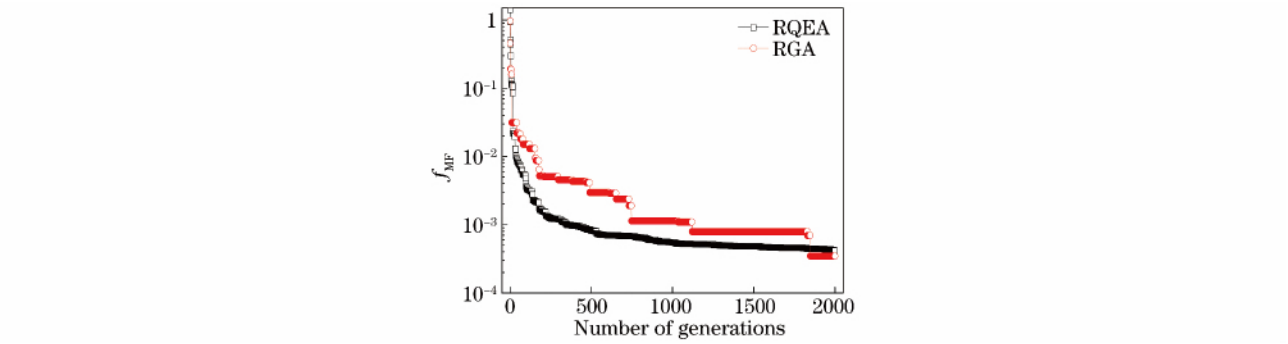

图 7　基于 $m_1=8,m_2=2,m_3=4,s=4$ 的 RQEA 与

基于 $\eta_c=1,\eta_m=1$ 的 RGA 的宽角度 Mo/Si 多层膜设计程序评价系数 f_{MF} 与进化代数的关系对比

Fig. 7　Comparison between relationship of evaluation coefficient f_{MF} with number of generations in design of broad-angle Mo/Si multilayer coatings based on RQEA ($m_1=8$, $m_2=2$, $m_3=4$, $s=4$) and RGA ($\eta_c=1$, $\eta_m=1$)

3.3　基于 RQEA 和 RGA 进化最优解反演的宽角度 EUV 反射谱与膜系设计结果

对比基于不同参数下的 RQEA 和 RGA 进化最优解计算出的反射光谱，结果如图 8 所示。分析可得，二者设计出的膜系结构都较为理想，可实现在入射角为 0°～18°时 50%左右的反射率，满足 EUV 光学系统对宽角度多层膜的需求。同时，基于 RQEA 计算出的反射光谱的反射平台更加平滑，体现了 RQEA 应用于宽角度 EUV 多层膜的膜系设计中的可行性与优越性。

对基于 RQEA 和 RGA 的宽角度 EUV 多层膜设计最优解的膜系进行分析，结果如图 9 所示，其中图 9(a1)、(b1)所示为基于 RQEA 优化出的 Si 层和 Mo 层厚度；图 9(a2)、(b2)所示为基于 RGA 优化出的 Si 层和 Mo 层厚度。对比分析表明，基于两种算法设计得到的最优宽角度 EUV 多层膜膜系结构完全不同，因此基于 RQEA 的多层膜膜系设计方法为宽角度 Mo/Si 多层膜的镀膜研制提供了另外一种可能。基于 RQEA 与 RGA 得到的多层膜膜系仅在各膜层的膜厚上略有不同，考虑到基于 RGA 设计得到的多层膜已在实验方面得到较为理想的结果[34]，故基于 RQEA 设计的多层膜膜系同样具有实验的可行性。在具体的多层膜镀制实验中，可以通过调整基于 RGA 的多层膜膜系的工艺参数来实现基于 RQEA 的多层膜膜系的研制。若采用晶振控制膜厚，只需调整各层的控制厚度即可；若采用时间控制膜厚，只需调整相应各层的控制时间即可。总之，基于 RQEA 设计的多层膜膜系在实验上具有可行性。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

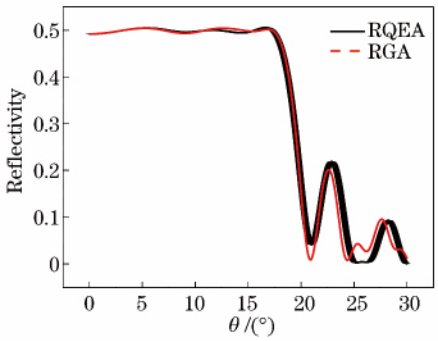

图 8　基于 RQEA($m_1=8, m_2=2, m_3=4, s=4$)与 RGA($\eta_c=1, \eta_m=1$)最优解计算出的 Mo/Si 多层膜的反射光谱

Fig. 8　Reflection spectra of Mo/Si multilayer coatings optimally calculated based on RQEA ($m_1=8$, $m_2=2$, $m_3=4$, $s=4$) and RGA ($\eta_c=1$, $\eta_m=1$)

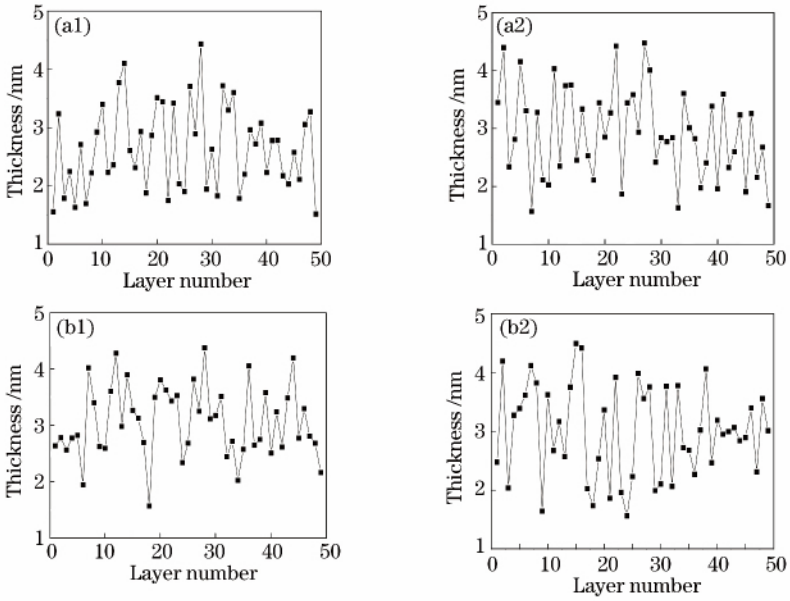

图 9　基于 RQEA 与 RGA 优化出的宽角度高反射率 Mo/Si 多层膜膜系结构。

(a1)基于 RQEA 的 Si 厚度;(b1)基于 RQEA 的 Mo 厚度;(a2)基于 RGA 的 Si 厚度;(b2)基于 RGA 的 Mo 厚度

Fig. 9　Optimal Mo/Si multilayer coating structures with broad angle and high reflectivity based on RQEA and RGA. (a1) Si thickness based on RQEA; (b1) Mo thickness based on RQEA; (a2) Si thickness based on RGA; (b2) Mo thickness based on RGA

4　结　　论

RQEA **是一种采用量子编码和量子计算的进化策略,具有一定的并行能力和较强的全局搜索能力。理论上将** RQEA **应用于宽角度高反射率** Mo/Si **多层膜的设计过程中,并将进化结果与基于** RGA **的优化结果进行了对比分析。分析结果表明,较** RGA **而言,**RQEA **具有明显的高搜索效率和高求解精度,并且具有种群规模小、计算相对简单的优势。同时,理论设计结果给出了入射角为** 0°～18°、**反射率达** 50%**左右的** Mo/Si **多层膜膜系优化设计结果,满足** EUV **光学系统对宽角度多层膜的需求。这些结果进一步丰富了宽角度高反射率** EUV **多层膜膜系设计的优化算法。**

参　考　文　献

[1] Wang Jun, Wang Liping, Jin Chunshui, *et al*. Extreme ultraviolet lithography objective design based on grouping and graphical user interface[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1211001.

王　君, 王丽萍, 金春水, 等. 极紫外光刻物镜分组可视化界面设计优化[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1211001.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2] Yakshin A E, Nedelcu I, Zoethout E, *et al*. Enhanced reflectance of interface engineered Mo/Si multilayers produced by thermal particle deposition[C]. Conference on Emerging Lithographic Technologies XI, 2007: I5170.

[3] 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): 6957-6971.

[4] Qin Juanjuan, Dong Weiwei, Zhou Shu, *et al*. Recent advances in multilayer coatings for extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2014, 31(1): 1-11.
秦娟娟，董伟伟，周　曙，等. 应用于极紫外光刻系统多层膜的研究进展[J]. 量子电子学报, 2014, 31(1): 1-11.

[5] Liang Xinli, Li Yanqiu, Mei Qiuli. Optical design of high-efficiency ripple plate illuminator for EUV lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0322005.
梁欣丽，李艳秋，梅秋丽. 高光能利用率极紫外光刻波纹板照明系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0322005.

[6] Yu Bo, Li Chun, Jin Chunshui, *et al*. Design and fabrication of broadband Mo/Si multilayer films for extreme ultra violet lithography illumination system[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0407001.
喻　波，李　春，金春水，等. 极紫外光刻照明系统宽带 Mo/Si **多层膜设计与制备[J]. 中国激光**, 2016, 43(4): 0407001.

[7] Spiga D, Mirone A, Pareschi G, *et al*. Characterization of multilayer stack parameters from X-ray reflectivity data using the PPM program: Measurements and comparison with TEM results[C]. SPIE, 2015, 6266: 626616.

[8] Dane A D, Veldhuis A, Buydens L M C, *et al*. Application of genetic algorithms for characterization of thin layered materials by glancing incidence X-ray reflectometry[J]. Physica B: Condensed Matter, 1998, 253(3): 254-268.

[9] Rio M S D, Pareschi G. Global optimization and reflectivity data fitting for X-ray multilayer mirrors by means of genetic algorithms[C]. SPIE, 2001, 4145: 88-96.

[10] Deb K, Agrawal R B. Simulated binary crossover for continuous search space[J]. Complex Systems, 2000, 9(3): 115-148.

[11] Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic algorithms: Theory, applications and software implementation[M]. Xi′an: Xi′an Jiaotong University Press, 2002.
王小平，曹利明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安：西安交通大学出版社, 2002.

[12] Zhou Ming, Sun Shudong. Principle and application of genetic algorithm[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001.
周　明，孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京：国防工业出版社, 2001.

[13] Zhang Geyang, Li Na, Jin Weidong, *et al*. A novel quantum genetic algorithm and its application[J]. Electronica Sinica, 2004, 32(3): 476-479.
张葛洋，李　娜，金炜东，等. 一种新量子遗传算法及其应用[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 476-479.

[14] Wu Nan, Song Fangmin. Quantum computation and quantum computers[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2007, 1(1): 1-16.
吴　楠，宋方敏. 量子计算与量子计算机[J]. 计算机科学与探索, 2007, 1(1): 1-16.

[15] Gao Hui, Xu Guanghui, Zhang Rui, *et al*. Real-coded quantum evolutionary algorithm[J]. Control and Decision, 2008, 23(1): 87-90.
高　辉，徐光辉，张　锐. 实数编码量子进化算法[J]. 控制与决策, 2008, 23(1): 87-90.

[16] Gao Hui, Zhang Rui. Improved real-coded quantum evolutionary algorithms and its application on parameter estimation [J]. Control and Decision, 2011, 26(3): 418-422.
高　辉，张　锐. 改进实数编码量子进化算法及其在参数评估中的应用[J]. 控制与决策, 2011, 26(3): 418-422.

[17] Hey T. Quantum computing: An introduction[J]. Computing and Control Engineering Journal, 1998, 10(3): 105-112.

[18] Zhang G. Quantum-inspired evolutionary algorithms: A survey and empirical study[J]. Journal of Heuristics, 2011, 17(3): 303-351.

[19] Wang Ling. Advances in quantum-inspired evolutionary algorithms[J]. Control and Decision, 2008, 23(12): 1321-1326.
王　凌. 量子进化算法研究进展[J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1321-1326.

[20] Wang Xia, Wang Xiaodong, Lü Kui. Optimal design of membrane system based on real coded adaptive genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(1): 51-55.
王　霞，汪晓东，吕　岿. 基于实数编码自适应遗传算法的膜系优化设计[J]. 量子电子学报, 2004, 21(1): 51-55.

[21] Han K H, Kim J H. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization[J]. IEEE

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 580-593.

[22] Narayanan A, Moore M. Quantum-inspired genetic algorithms[C]. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1996: 61-66.

[23] Li Min, Dong Ningning, Liu Zhen, *et al*. Reflectivity measurements of normal-incidence Mo/Si multilayer mirrors at 13.9 and 19.6 nm[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1666-1672.
李　敏, 董宁宁, 刘　震, 等. 13.9 **和** 19.6 nm **正入射** Mo/Si **多层膜反射镜的反射率测量**[J]. **光学 精密工程**, 2008, 16(9): 1666-1672.

[24] Modi M H, Lodha G S, Nayak M, *et al*. Determination of layer structure in Mo/Si multilayers using soft X-ray reflectivity[J]. Physica B: Condensed Matter, 2003, 325(1-4): 272-280.

[25] 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.

[26] Yulin S, Feigl T, Kuhlmann T, *et al*. Interlayer transition zones in Mo/Si superlattices[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(3): 1216.

[27] Yakshin A E, Louis E, Görts P C, *et al*. Determination of the layered structure in Mo/Si multilayers by grazing incidence X-ray reflectometry[J]. Physica B: Condensed Matter, 2000, 283(1-3): 143-148.

[28] Kozhevnikov I V, Yakshin A E, Bijkerk F. Wideband multilayer mirrors with minimal layer thicknesses variation[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 9276-9283.

[29] Mei Xuefeng, Kuang Shangqi, Xie Yao, *et al*. Application of the quantum evolutionary algorithm in researches of EUV multilayer[J]. Journal of Changchun University of Science & Technology, 2016, 39(4): 1-7.
梅雪峰, 匡尚奇, 谢　耀. **量子进化算法在极紫外多层膜表征和设计中的应用**[J]. **长春理工大学学报**, 2016, 39(4): 1-7.

[30] Mei Xuefeng. Application of the quantum evolutionary algorithm in researches of EUV multilayer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
梅雪峰. **量子进化算法在极紫外多层膜表征和设计中的应用**[D]. **长春: 长春理工大学**, 2016.

[31] Zhang Lichao. Progress in EUV multilayer coating technologies[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(6): 554-566.
张立超. **极紫外多层膜研究进展**[J]. **中国光学与应用光学**, 2010, 3(6): 554-566.

[32] Tan Moyan. Polarized optical elements of extreme ultraviolet and soft X-ray multilayer[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
谭默言. **极紫外与软** X **射线多层膜偏振光学元件研究**[D]. **上海: 同济大学**, 2010.

[33] 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(2): 181-342.

[34] Kuhlmann T, Yulin S, Feigl T, *et al*. Design and fabrication of broadband EUV multilayer mirrors[C]. SPIE, 2002, 4688: 509-515.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net