

文章编号 1004-924X(2017)08-2046-11

## 改进型量子进化算法在宽带 EUV 多层膜设计中的应用

匡尚奇<sup>1\*</sup>, 张 超<sup>1</sup>, 王一名<sup>1</sup>, 周祥燕<sup>1</sup>, 谢 耀<sup>2</sup>

(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, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为提高基于量子进化算法(QEA)在宽带极紫外(EUV)多层膜设计中的求解效率和精度,本文利用宽带多层膜的光学性能评价函数的梯度信息改进 QEA,建立具有明确进化方向的适用于宽带 EUV 多层膜设计的改进型量子进化算法(IQEA)。对比分析了基于 IQEA 和 QEA 的宽带 Mo/Si 多层膜的膜系设计过程和结果,结果表明,基于 IQEA 的多层膜膜系设计理论方法具有更优越的求解效率和精度;同时,IQEA 同样可以小种群规模进行多参数优化。基于 IQEA 的宽带 Mo/Si 多层膜的设计理论实现了包括入射角为  $0^{\circ}\sim 18^{\circ}$ ,反射率达 50% 的宽角度多层膜,以及反射光谱带宽为 13~15 nm,反射率达 25% 的宽光谱多层膜的设计。基于 IQEA 的宽带高反射率 EUV 多层膜的理论膜系设计方法为复杂多层膜的理论设计提供了一种可供选择的高效膜系设计方法。

**关 键 词:**薄膜光学;多层膜设计;改进型量子进化算法;宽带极紫外多层膜

**中图分类号:**O436 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172508.2046

## Application of improved quantum evolutionary algorithm in design of broadband EUV multilayer

KUANG Shang-qi<sup>1\*</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, WANG Yi-ming<sup>1</sup>, ZHOU Xiang-yan<sup>1</sup>, XIE Yao<sup>2</sup>

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

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: physicskuang@sina.com

**Abstract:** In order to further improve the efficiency and accuracy of quantum evolutionary algorithm (QEA) in the design of broadband Extreme Ultraviolet (EUV) multilayers, the gradient information of evaluation function was applied to improve QEA, and then the improved quantum evolutionary algorithm (IQEA) with defined evolution directions was adopted in the design of broadband multilayers. A comparison between the QEA and IQEA in the design of broadband Mo/Si multilayer was given, and the results show that the IQEA has better efficiencies and higher accuracies. Furthermore, the IQEA can be used to design the multilayer with a population which is smaller than the number of

收稿日期:2017-04-11;修订日期:2017-05-04.

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

parameters of Mo/Si multilayer. In this research, two kinds of multilayers were designed based on the IQEA, one has a reflectivity of 50% in the incidence angle range from  $0^\circ$  to  $18^\circ$ , and the other allows a reflectivity of 25% in the wavelength range from 13 nm to 15 nm. The theoretical coating designs of broadband EUV multilayers based on IQEA can be an alternative and optimal method for the design of complex non-periodic multilayers.

**Key words:** film optics; design of multilayer coatings; improved quantum evolutionary algorithm; broadband EUV multilayer

## 1 引言

极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)波段内的强吸收作用使得 EUV 波段的辐射研究十分困难。1972 年, E. Spiller 首次提出采用高低折射率材料交替制备  $\lambda/4$  波堆的多层膜结构, 在理论上可获得较高的非掠入射反射率<sup>[1]</sup>。这个思路给 EUV 波段的辐射研究带来了曙光, 使这一问题得到了解决。几十年来, 在国内外相关学者的不懈努力下, EUV 多层膜在 EUV 光刻<sup>[2]</sup>、EUV 天文观测、EUV 光谱仪以及同步辐射<sup>[3-4]</sup>等诸多领域得到了广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。但是, 普遍制备的周期多层膜的反射光谱带宽以及入射角带宽过窄, 这种特性对 EUV 多层膜在很多领域中的应用极为不利。因此, 宽带 EUV 多层膜的研发备受关注。德国 IOF 研究所研制出正入射条件下, 带宽为 2.33 nm 且反射率近 20% 的 EUV 多层膜<sup>[7-8]</sup>。同济大学的科研小组研制出在正入射条件下, 带宽近 16 nm 且反射率近 10% 的 EUV 多层膜<sup>[9-10]</sup>。荷兰的 FOM-Rijnhuizen 研究所研制出入射波长为 13.5 nm, 入射角为  $0^\circ \sim 18^\circ$ , 反射率为 50% 左右的 EUV 多层膜<sup>[11]</sup>。同时, 日本的 Nikon 公司、中科院上海光机所以及中科院长春光机所等科研机构在 EUV 多层膜的研发方面也开展了大量的工作, 极大地推动了宽带 EUV 多层膜的发展<sup>[2, 5-6, 11]</sup>。

在一定程度上, EUV 多层膜的设计依赖于计算机数值优化算法。目前, EUV 多层膜设计常采用的算法有模拟退火算法<sup>[12]</sup>、单纯形算法<sup>[13-14]</sup>、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)<sup>[15-16]</sup>和量子进化算法(Quantum Evolution Algorithm, QEA)<sup>[17-18]</sup>等。其中, 模拟退火算法是一种全局搜索算法, 求得最优解所消耗的时间较多, 且随着

问题规模的增大, 程序运行时间也会大大增加。单纯形算法是一种局域搜索算法, 所求得的一般是初始膜系附近的局部极值点。GA 存在着种群规模大、求解效率低以及计算过程复杂的缺点。QEA 采用量子位编码, 通过量子旋转门更新最优个体, 具有种群规模小、求解效率高和求解精度高的优势, 并已在数值优化、组合优化、参数估计等诸多领域中得到了应用。作为新兴的膜系设计优化算法, QEA 已应用于 Mo/Si 多层膜的表征和设计中<sup>[17-18]</sup>, 但由于在求解过程中无明确的进化方向, 求解效率仍有待提高。

为了加快 QEA 的求解速度, 本文提出了一种基于 IQEA<sup>[19]</sup>(Improved QEA)的宽带 EUV 多层膜理论膜系设计方法。IQEA 利用评价函数的梯度信息使进化过程充分获得先验信息从而获得自适应的启发式算法, 使其在求解过程中能够达到快速收敛的目的。本文基于 IQEA 完成了对宽带 Mo/Si 多层膜的设计, 并将其求解效率与基于 QEA 的宽带 Mo/Si 多层膜的求解效率进行比较。对比分析表明, 基于 IQEA 的宽带 EUV 多层膜设计方法是一种高效可行的膜系设计方法。相关工作丰富了宽带 EUV 多层膜的膜系设计算法, 并为相应多层膜的制备奠定了基础。

## 2 EUV 多层膜反射原理与基于 IQEA 的宽带 EUV 多层膜设计

EUV 多层膜结构模拟晶体中的原子层结构, 通常采用两种密度不同的高低折射率材料交替沉积。目前, Mo 与 Si 是 EUV 多层膜研发的理想材料, 可以实现较高的反射率<sup>[20]</sup>。但由于 EUV 多层膜各膜层间材料的扩散作用使得实际的反射率往往会比理论计算的反射率小。故考虑膜层间

的扩散作用,本文采用 Mo/Si 多层膜的四层模型<sup>[21-22]</sup>设计膜系,其理论反射率更接近于实际结果。由于 Mo 层和 Si 层之间的扩散作用较弱,故认为扩散层 MoSi<sub>2</sub> 的厚度不变,并设定 Mo 层在 Si 层上的扩散层 MoSi<sub>2</sub> 的厚度为 1.0 nm, Si 层在 Mo 层上的扩散层 MoSi<sub>2</sub> 的厚度为 0.5 nm,本文通过特征矩阵法计算多层膜表面的反射率<sup>[23]</sup>,并在计算时引入数据库<sup>[24]</sup>中的原子散射因子数据来计算材料的复折射率, Si、Mo 和 MoSi<sub>2</sub> 的密度采用相应体密度数值。

为解决基于 QEA<sup>[17-18]</sup>的宽带 EUV 多层膜设计过程中无明确的进化方向所导致的求解效率较低的问题,将 IQEA 应用于宽带 Mo/Si 多层膜的设计中,

$$q_i = \begin{bmatrix} t_{\text{Mo}-1i} & t_{\text{Si}-2i} & t_{\text{Mo}-3i} & t_{\text{Si}-4i} & \cdots & t_{\text{Mo}-97i} & t_{\text{Si}-98i} \\ \cos \theta_{1i} & \cos \theta_{2i} & \cos \theta_{3i} & \cos \theta_{4i} & \cdots & \cos \theta_{97i} & \cos \theta_{98i} \\ \sin \theta_{1i} & \sin \theta_{2i} & \sin \theta_{3i} & \sin \theta_{4i} & \cdots & \sin \theta_{97i} & \sin \theta_{98i} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中:  $t_{\text{Mo}}$  和  $t_{\text{Si}}$  分别为 Mo 层和 Si 层的几何厚度,  $[\cos \theta_{ji}, \sin \theta_{ji}]^T$  为量子概率幅;

(3) 计算宽带多层膜膜系种群的适应度,并保存当前最优的膜系结构。对于宽角度 Mo/Si 多层膜采用的评价函数为:

$$MF_1 = \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} [R_0(\varphi) - R(\varphi)]^2 d\varphi, \quad (3)$$

其中:  $MF_1$  为个体的评价系数,  $\varphi$  为入射角度,最小角度  $\varphi_{\min} = 0^\circ$ , 最大角度  $\varphi_{\max} = 18^\circ$ , 目标反射率  $R_0(\varphi) = 50\%$ ,  $R(\varphi)$  为理论计算的反射率。

宽光谱 Mo/Si 多层膜的评价函数为:

$$MF_2 = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [R_0(\lambda) - R(\lambda)]^2 d\lambda, \quad (4)$$

其中:  $MF_2$  为个体评价系数,  $\lambda$  代表入射光波波长,最小波长  $\lambda_{\min} = 13 \text{ nm}$ , 最大波长  $\lambda_{\max} = 15 \text{ nm}$ , 目标反射率  $R_0(\lambda) = 25\%$ ,  $R(\lambda)$  为计算出的反射率;

(4) 判断是否满足终止条件。若满足,则输出最优宽带多层膜膜系结构;否则继续进行进化;

(5) 对宽带多层膜膜系种群中的每个个体进行单基因变异,生成子代宽带多层膜膜系种群。随机选择个体中某个实数基因为  $t_{ji}$ , 并针对该实数基因位进行高斯变异。若随机数  $\text{rand} < p_m$ , 则  $t'_{ji} = t_{ji} + t_{ji} \times G(0, \sin^2 \theta_{ji})$ ; 否则  $t'_{ji} = t_{ji} + t_{ji} \times G(0, \cos^2 \theta_{ji})$ , (5) 其中  $G(0, \sigma^2)$  为均值为 0、方差为  $\sigma^2$  为正态分布

计中,利用评价函数的梯度信息确定量子旋转门的大小,同时构建加速机制,适时调节进化过程中的全局泛搜与局部精搜,提高求解效率和求解精度。基于 IQEA 的宽带 Mo/Si 多层膜<sup>[19]</sup>的设计过程如下:

(1) 输入基于 IQEA 的 Mo/Si 多层膜设计的初始参数,其中量子种群大小为  $N$ , 量子初始旋转角  $\theta_0 = 0.01\pi$ , 加速系数  $\mu = 6$ , 变异概率为  $p_m$ , 初始个体无效进化次数为 0, 个体的无效进化次数最大值为 Null, 进化代数 of 2 000;

(2) 量子种群初始化。对宽带 Mo/Si 多层膜的厚度进行编码,生成量子染色体种群:

$$Q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad \cdots \quad q_{N-2} \quad q_{N-1} \quad q_N], \quad (1)$$

其中第  $i$  个量子染色体为:

的一个随机数;

(6) 计算子代宽带多层膜膜系种群的适应度,更新最优的宽带多层膜膜系;

(7) 确定量子旋转角方向  $\text{dir}$  及大小  $\Delta\theta$ , 其中  $\Delta\theta = \text{dir} \times \theta_0 \times \nabla$  和  $\nabla = \frac{1}{n} \cdot \exp\left(-\frac{\nabla f(t_{ji}) - \nabla f_{j-\min}}{\nabla f_{j-\max} - \nabla f_{j-\min}}\right)$ , (6)

式中:  $\nabla f(t_{ji})$  表示评价函数在与之对应的当前子代种群中第  $i$  个个体的第  $j$  个实数基因位处的梯度值,  $\nabla f_{j-\min}$  和  $\nabla f_{j-\max}$  分别表示评价函数在与之对应的当前子代种群内所有个体的第  $j$  个实数基因位处梯度的最小值和最大值。旋转角方向  $\text{dir}$  由矩阵  $A$  确定, 其中:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta_{j0} & \cos \theta_{ji} \\ \sin \theta_{j0} & \sin \theta_{ji} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $\begin{bmatrix} \cos \theta_{j0} \\ \sin \theta_{j0} \end{bmatrix}$  为当前最优解的第  $j$  个基因位的量子概率幅,

$\begin{bmatrix} \cos \theta_{ji} \\ \sin \theta_{ji} \end{bmatrix}$  为与其对应的当前子代种群当前第  $i$  个个体的第  $j$  个基因位的量子概率幅。当  $|A| = 0$  或  $|A| > 0$  时,  $\text{dir} = -1$ ;  $|A| < 0$  时,  $\text{dir} = 1$ 。

(8) 判断种群中膜系个体是否为有效进化: 若为有效进化, 转到 10 步; 否则转到 9 步;

(9) 判断无效进化次数是否小于 Null: 若小于 Null, 则转到 (9.1); 否则转到 (9.2);

(9.1) 无效进化次数  $null = null + 1$ , 父代宽带多层膜膜系个体替换当前子代宽带多层膜膜系个体, 转向第(11)步;

(9.2) 将无效进化次数归零, 使用量子旋转门:

$$U(\Delta\theta_{ji}) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_{ji}) & -\sin(\Delta\theta_{ji}) \\ \sin(\Delta\theta_{ji}) & \cos(\Delta\theta_{ji}) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

更新相应的量子概率幅, 并构建加速进化机制:

$$\cos \theta'_{ji} = \cos \theta_{ji} / \mu; \sin \theta'_{ji} = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_{ji}}. \quad (9)$$

更新实数基因位为:

$$t'_{ji} = t_{ji} \times (1 + \text{dir} \times \sin^2 \theta'_{ji}), \quad (10)$$

转向第(11)步;

(10) 使用与步骤(9.1)相同的量子旋转门更新相应的量子概率幅, 更新实数基因位为:

$$t'_{ji} = t_{ji} \times (1 + \text{dir} \times \cos^2 \theta_{ji}). \quad (11)$$

保证  $t'_{ji}$  在定义域内, 转向第(11)步。

在上述变异和更新过程中, 当实数基因位超出定义域时要进行调整: 若  $t'_{ji} > t_{j-\max}$ , 则  $t''_{ji} = 2t_{j-\max} - t'_{ji}$ ; 若  $t'_{ji} < t_{j-\min}$ , 则  $t''_{ji} = 2t_{j-\min} - t'_{ji}$ , 进行反复迭代, 直到实数基因位位于定义域内为止;

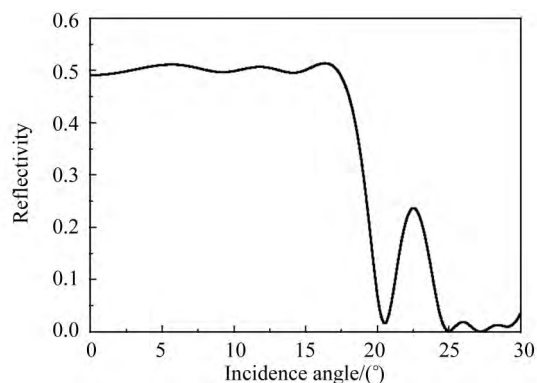
(11) 采用精英保留策略, 更新最优宽带多层膜的膜系结构, 进化代数  $n = n + 1$ , 并转向第(3)步。

将基于 IQEA 的宽带 Mo/Si 多层膜系设计的求解效率以及反演出的反射光谱分别与基于 QEA<sup>[17-18]</sup> 的宽带 Mo/Si 多层膜设计结果进行对比, 加以验证基于 IQEA 的宽带 EUV 多层膜设计方法是一种高效可行的方法。基于 QEA 设计过程中的种群数为  $N$ , 互补双变异过程中“求精”和“求泛”的次数分别为  $m_1$  和  $m_2$ , 离散交叉过程中选择的优秀个体数为  $s$ , 每个优秀个体连续交叉  $m_3$  次。

### 3 基于 IQEA 的宽角度 EUV 多层膜设计结果与分析

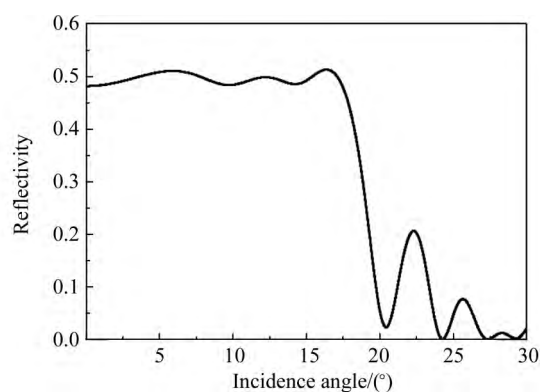
#### 3.1 基于 IQEA 和 QEA 的宽角度 EUV 多层膜设计结果比较分析

图 1 给出了基于 IQEA 和 QEA 设计出的最优宽角度 Mo/Si 多层膜膜系结构反演得到的反



(a) 基于 IQEA 的结果, 参数为  $N=40, Null=3, p_m=0.1$

(a) Result based on parameters of IQEA as follows:  $N=40, Null=3, p_m=0.1$



(b) 基于 QEA 的结果, 参数为  $N=40, m_1=3, m_2=2, m_3=2, s=1$

(b) Result based on parameters of IQEA as follows:  $N=40, m_1=3, m_2=2, m_3=2, s=1$

图 1 基于 IQEA 和 QEA 进化最优解反演出的宽角度 Mo/Si 多层膜的反射光谱图

Fig. 1 Reflection spectra of optimal Mo/Si multilayer with a broadband incidence angle based on IQEA and QEA

射光谱。基于 IQEA 反演出的反射光谱平台更为平滑, 波动性更小, 可实现更高的反射率, 说明了基于 IQEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜设计方法具有一定的优势。图 2 给出了基于两种量子算法的求解效率的对比结果, 对比分析表明, 基于 IQEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜的设计求解效率明显优于 QEA, 具有收敛速度快和求解精度高的优点, 如此表明该算法利用评价函数的梯度信息获得自

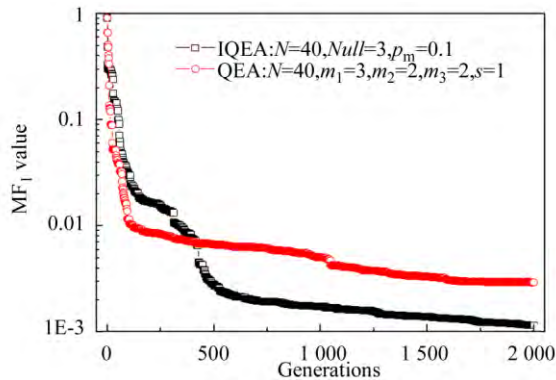
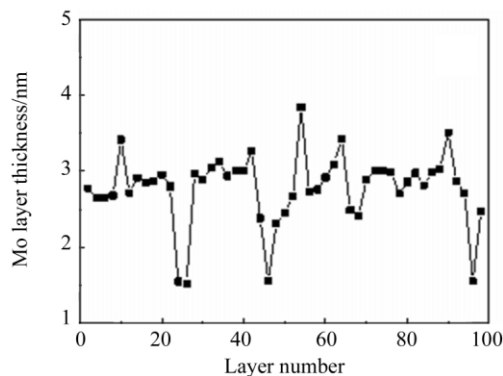


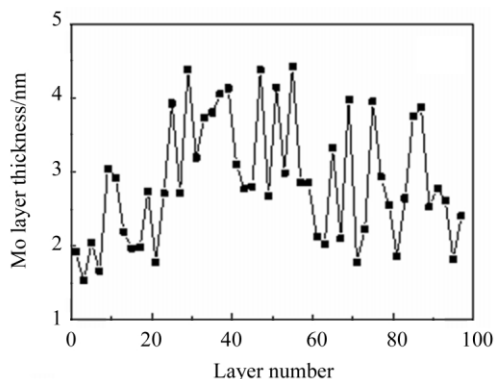
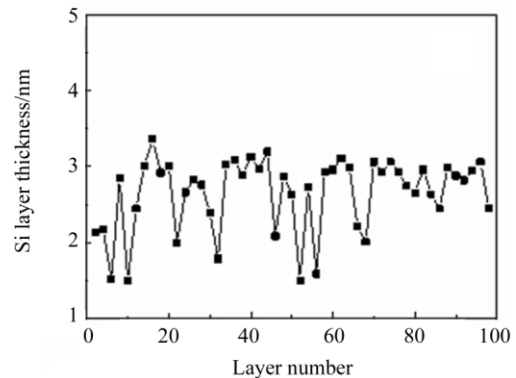
图 2 基于 IQEA 和 QEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜的评价系数  $MF_1$  与进化代数关系图

Fig. 2 Relations between  $MF_1$  value of Mo/Si multilayer with a broadband incidence angle and generations based on IQEA and QEA



(a) 基于 IQEA 的结果, 参数为  $N=40, Null=3, p_m=0.1$

(a) Results based on parameters of IQEA as follows:  $N=40, Null=3, p_m=0.1$



(b) 基于 QEA 的结果, 参数为  $N=40, m_1=3, m_2=2, m_3=2, s=1$

(b) Results based on parameters of QEA as follows:  $N=40, m_1=3, m_2=2, m_3=2, s=1$

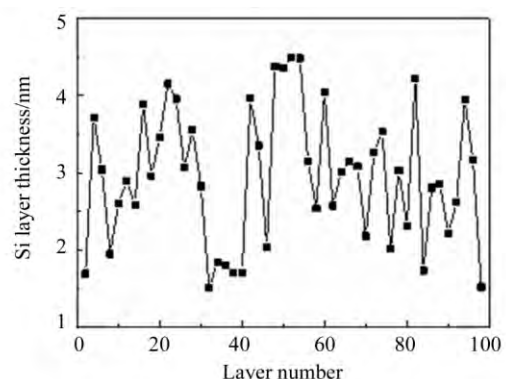


图 3 基于 IQEA 和 QEA 得到的最优宽角度 Mo/Si 多层膜膜系结构

Fig. 3 Optimal Mo/Si multilayer structure with a broadband incidence angle based on IQEA and QEA

适应的启发式算法, 加快了算法的求解效率。在 IQEA 中个体基因编码同样采用了量子编码, 单个染色体可以表示多个叠加态, 加大种群多样性, 使其在种群规模小于优化参数个数的条件下进行搜索与优化, 并获得较好的求解效率和求解精度。以上分析说明, 基于 IQEA 的宽角度 EUV 多层膜的理论膜系设计方法是一种高效可行的方法。

对基于 IQEA 和 QEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜设计的最优解的膜系结构进行对比, 结果如图 3 所示。分析结果表明, 基于两种量子算法设计得到的宽角度 Mo/Si 多层膜膜系结构完全不同, 这为宽角度 Mo/Si 多层膜的研发提供了另一种较优的膜系结构, 也为进一步的实验奠定了基础。

### 3.2 基于不同种群规模下的 IQEA 宽角度 EUV 多层膜设计

图4给出了基于不同种群规模下的 IQEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜的求解效率对比结果。对比分析可得,种群数为 20 和 30 的求解效率明显优于种群数为 10 的求解效率;在 1 000 代之前种群数为 30 的求解效率高于种群数为 20 的求解效率,随着迭代次数的继续增加,两者的求解效率基本持平。当种群规模较小时,算法无法提供充足的搜索信息,致使算法不易达到最优解,求解效率和求解精度较低;当种群数较大时,算法可以提供充足的搜索信息,更易达到最优解,求解效率和求解精度较高。不过当搜索信息较充足时,再增加种群数对求解效率的影响不大,同时过大的种群数还会导致计算时间过长。图5给出了不同种群规模下基于 IQEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜设计最优解反演出的反射光谱。基于不同种群规模下最优解反演出的反射光谱图均可实现对入射角为  $0^{\circ} \sim 18^{\circ}$ , 反射率达 50% 左右的宽角度 Mo/Si 多层膜设计,再一次证明了应用 IQEA 设计宽角度 EUV 多层膜膜系是可行的。同时基于种群为 20 和 30 的算法反演出的反射光谱平台更为平滑,波

动性更小,可实现更高的反射率,说明种群规模较大时,算法的求解精度更高。因此,在基于 IQEA 的宽角度 EUV 多层膜设计过程中选取适当的种群数可以使算法更快地接近最优解,提高算法的求解效率和求解精度,又可以降低优化求解的时间。

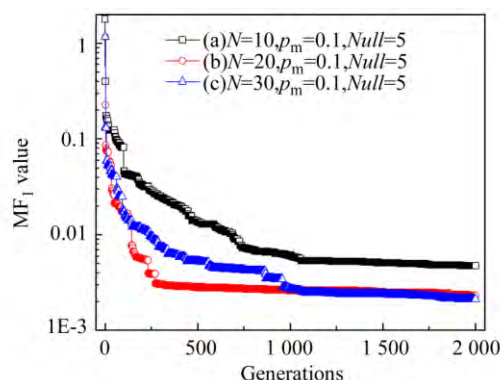


图4 不同种群下基于 IQEA 的宽角度 Mo/Si 多层膜膜系的评价系数  $MF_1$  与进化代数关系图

Fig. 4 Relations between  $MF_1$  value of Mo/Si multilayer with a broadband incidence angle and generations based on different populations of IQEA

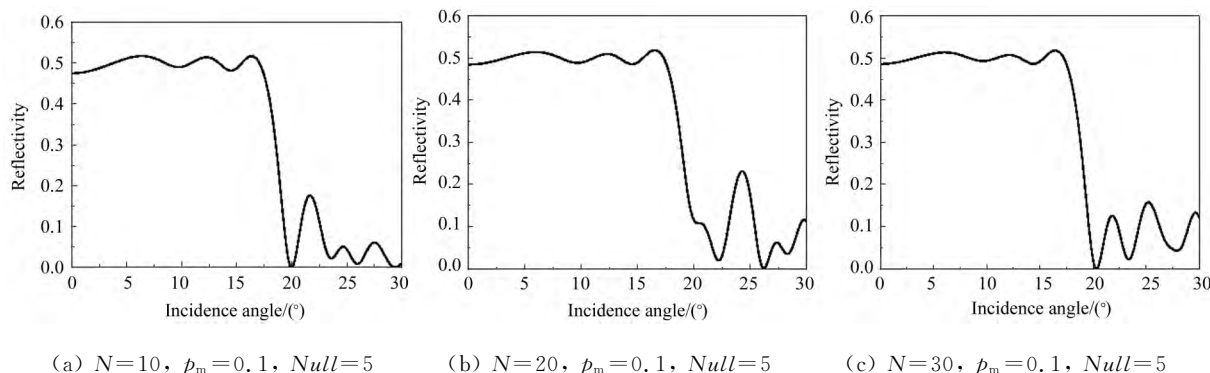


图5 不同种群数下基于 IQEA 的进化最优宽角度 Mo/Si 多层膜膜系反演的反射光谱

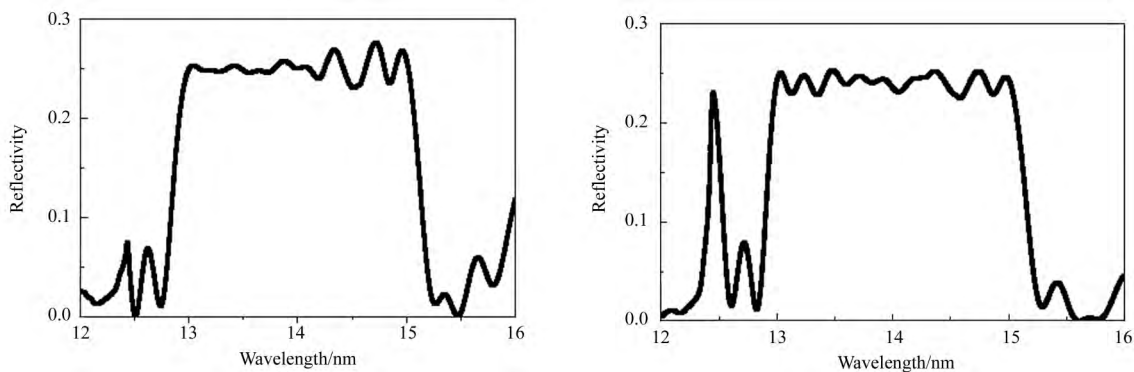
Fig. 5 Reflection spectra of optimal Mo/Si multilayer with a broadband incidence angle based on different populations of IQEA

## 4 基于 IQEA 的宽光谱 EUV 多层膜设计结果与分析

### 4.1 基于 IQEA 和 QEA 的宽光谱 EUV 多层膜设计结果比较分析

图6给出了基于 IQEA 和 QEA 设计出的最优宽光谱 Mo/Si 多层膜膜系结构反演得到的反

射光谱。两种量子算法都可以设计出反射带宽为  $13 \sim 15 \text{ nm}$ , 反射率达 25% 左右的 Mo/Si 多层膜膜系。相比于 QEA, 基于 IQEA 的最优宽光谱 Mo/Si 多层膜膜系结构反演出的反射光谱平台更为平滑, 波动性更小, 能实现更高的反射率, 由此说明基于 IQEA 的宽光谱 EUV 多层膜设计方法是可行的且具有求解精度高的优势。图7给出了基于两种量子算法的求解效率的对比结果。对比



(a) 基于 IQEA 的结果, 参数为  $N=40, Null=5, p_m=0.1$  (b) 基于 QEA 的结果, 参数为  $N=40, m_1=3, m_2=2, m_3=2, s=1$

(a) Result based on parameters of IQEA as follows:

$N=40, Null=5, p_m=0.1$

(b) Result based on parameters of QEA as follows:

$N=40, m_1=3, m_2=2, m_3=2, s=1$

图 6 基于 IQEA 和 QEA 进化最优解反演出的宽光谱 Mo/Si 多层膜的反射光谱图

Fig. 6 Reflection spectra of optimal Mo/Si multilayer with a broadband wavelength based on IQEA and QEA

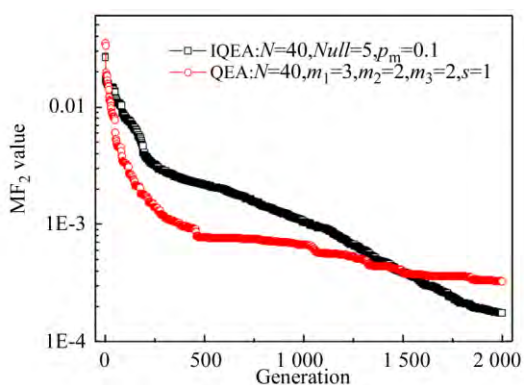


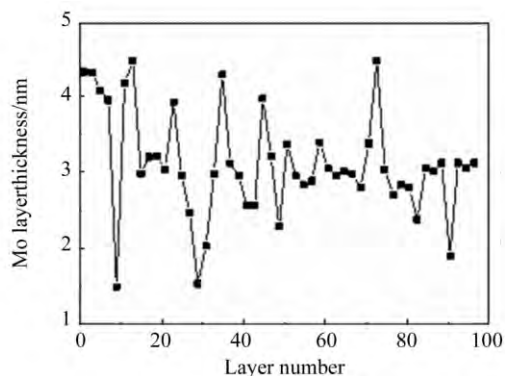
图 7 基于 IQEA 和 QEA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜的评价系数  $MF_2$  与进化代数的关系图

Fig. 7 Relations between  $MF_2$  value of Mo/Si multilayer with a broadband wavelength and generations based on design procedures of IQEA and QEA

分析表明, 随着迭代次数的增加, 基于 IQEA 的

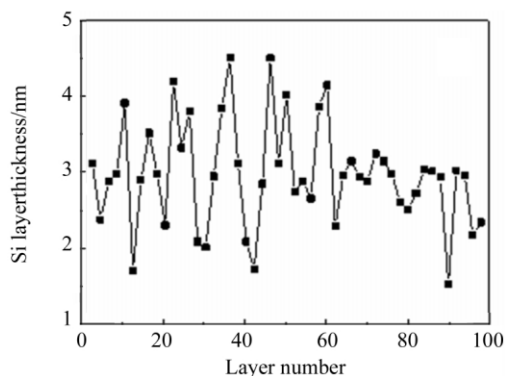
宽光谱 Mo/Si 多层膜的设计方法利用评价函数的梯度信息作为导向, 逐步逼近最优解, 在 1 500 代之后, 其收敛速度明显高于基于 QEA 的收敛速度。同时基于 IQEA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜设计方法采用的种群数为 40 远小于优化设计参数, 说明了同样采用量子编码, 基于 IQEA 的单个染色体可以表示多个叠加态, 加大了种群的多样性, 可以使其在小种群规模的条件下进行多参数的搜索与优化, 以更少的计算时间达到较优的搜索效果。基于以上分析可知, 基于 IQEA 的宽光谱 EUV 多层膜的理论膜系设计方法同样是一种高效可行的方法。

图 8 为基于 IQEA 和 QEA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜设计的最优膜系结构。基于两种量子算法设计得到的宽光谱 Mo/Si 多层膜膜系结构完全不同, 这为宽光谱 Mo/Si 多层膜的研发过程中提供了另一种较优的膜系结构。



(a) 基于 IQEA 的结果, 参数为  $N=40, Null=5, p_m=0.1$

(a) Result based on IQEA,  $N=40, Null=5, p_m=0.1$



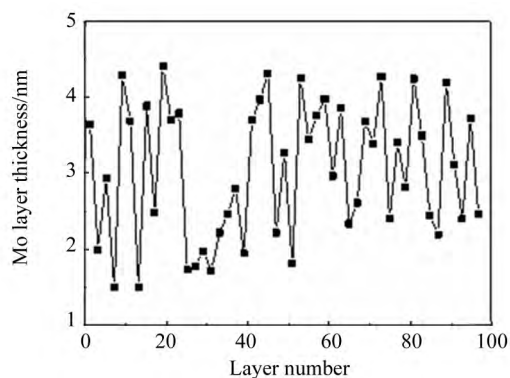
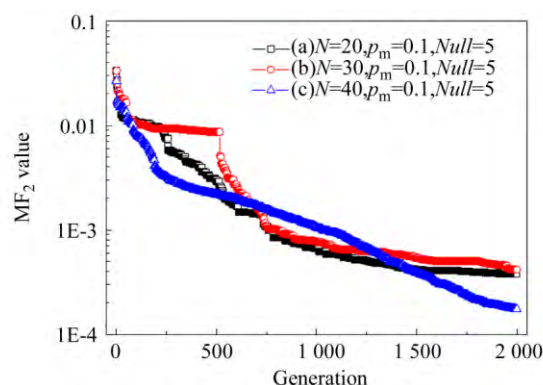
(b) 基于 QEA 的结果, 参数为  $N=40, m_1=3, m_2=2, m_3=2, s=1$ (b) Result based on QEA,  $N=40, m_1=3, m_2=2, m_3=2, s=1$ 

图 8 基于 IQEA 和 QEA 得到的最优宽光谱 Mo/Si 多层膜膜系结构对比图

Fig. 8 Optimal Mo/Si multilayer structure with a broadband wavelength based on IQEA and QEA

#### 4.2 不同种群规模下基于 IQEA 的宽光谱 EUV 多层膜设计

图 9 给出了不同种群规模下基于 IQEA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜的求解效率对比结果。对比分析表明,在种群进化后期,种群数为 40 的算法求解效率明显优于种群数为 20 和 30 的算法的求解效率,随着进化代数的增加,这一特点愈加明显。种群数为 20 和种群数为 30 时算法的求解效率和求解精度差别不大。但总的来说,当种群数较小时,算法无法提供充足的搜索信息,算法不易达到最优解,求解效率和求解精度较低;当种群数较大时,算法可提供充足的搜索信息,更易达到最优解,求解效率和求解精度较高。但当搜索信息较充足时,再增加种群数对求解效率和求解精度影响不大,过大的种群数还会导致计算时间过长。图 10 给出了不同种群规模下基于 IQEA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜设计的最优膜系反演出的反射光谱。由图 10 可知,反射带宽为 13~15 nm,反射率达 25% 左右,再一次证明应用 IQEA 设计宽光谱 EUV 多层膜膜系是可行的。同时基于种群为 40 反演出的反射光谱平台更为光滑,波动性更小,可实现更高的反射率,说明种群规模较大时算法的求解精度更高。因此,宽光谱 EUV 多层膜设计过程中选取适当的种群数可以使 IQEA 算法

图 9 不同种群下基于 IQEA 的宽光谱 Mo/Si 多层膜膜系的评价系数  $MF_2$  与进化代数的关系Fig. 9 Relations between  $MF_2$  value of Mo/Si multilayer with broadband wavelength and generations based on different populations of IQEA

更快地接近最优解。

基于传统 GA 设计的多层膜膜系已在实验方面得到一定的结果<sup>[25]</sup>,而基于 IQEA 的多层膜设计与 GA 设计的膜系仅在膜层的几何厚度上略有不同。因此,基于 IQEA 设计的多层膜膜系只需在实验中调整一定的工艺参数即可(若采用时间控制,可调整相应膜层的镀制时间;若采用石英晶振控制,则可调整各层膜厚),进而基于 IQEA 设计的多层膜膜系在实验上是可行的,相应多层膜的镀制和检测工作正在开展。

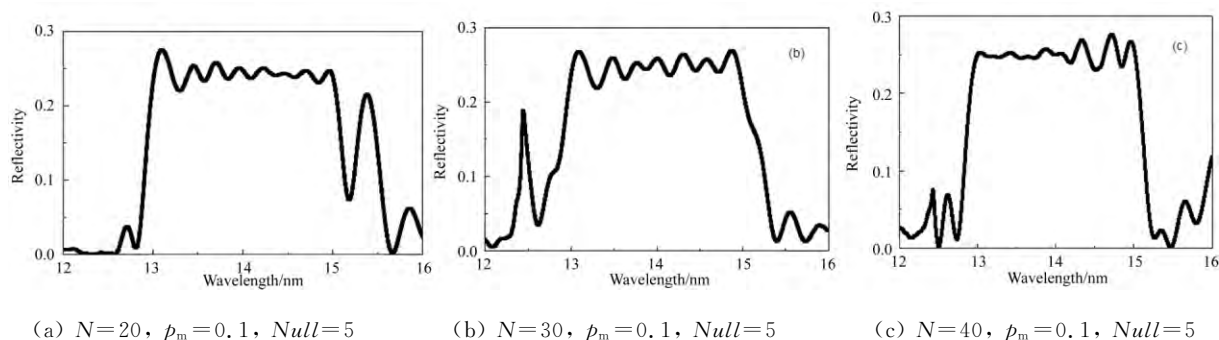


图 10 不同种群数下基于 IQEA 的进化最优 Mo/Si 多层膜系反演出的反射光谱

Fig. 10 Reflection spectra of optimal Mo/Si multilayer with a broadband wavelength based on different populations of IQEA

## 5 结 论

本文阐述了一种基于评价函数的梯度信息获得自适应启发式算法的 IQEA 宽带 EUV 多层膜理论膜系设计方法。将该算法的膜系设计结果与基

于 QEA 的膜系设计结果进行对比,结果表明,该算法具有种群规模小、收敛速度快、求解精度高的优点。同时,讨论了种群规模对求解效率的影响,并完成了对入射角为  $0^\circ \sim 18^\circ$ ,反射率达 50% 的宽角度 Mo/Si 多层膜,以及反射率带宽为 13~15 nm、反射率达 25% 的宽光谱 Mo/Si 多层膜的设计。

## 参考文献:

- [1] SPILLER E. Low-loss reflection coatings using absorbing materials [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 20(9): 365-367.
- [2] 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.  
YU B, LI CH, JIN CH SH, *et al.*. Design and fabrication of broadband Mo/Si multilayer films for extreme ultra violet lithography illumination system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0407001. (in Chinese)
- [3] 李文昊, 姜岩秀, 吴娜, 等. 极紫外波段变栅距光栅刻槽密度变化及光谱分辨能力分析[J]. *发光学报*, 2015, 36(9): 1094-1099.  
LI W H, JIANG Y X, WU N, *et al.*. Analysis for groove density and spectral resolution of varied-line-space gratings in EUV spectrum[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(9): 1094-1099. (in Chinese)
- [4] 姜岩秀, 巴音贺希格, 赵旭龙, 等. 自由电子激光器用极紫外波段平面变栅距光栅[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2117-2124.
- [5] 张立超. 极紫外多层膜光栅技术研究进展[J]. *光机电信息*, 2011, 28(8): 5-11.  
ZHANG L CH. Multilayer grating technologies for EUV[J]. *OME Information*, 2011, 28(8): 5-11. (in Chinese)
- [6] 朱京涛, 宋竹青, 丁涛, 等. 极紫外 Mg/SiC、Mg/Co 多层膜的稳定性[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1380-1386.  
ZHU J T, SONG ZH Q, DING T, *et al.*. Stability of Mg/SiC, Mg/Co EUV multilayers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1380-1386. (in Chinese)
- [7] FEIGL T, YULIN S, BENOIT N, *et al.*. EUV multilayer optics[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(4-9): 703-706.
- [8] YULIN S A, KUHLMANN T, FEIGL T, *et al.*. Spectral reflectance tuning of EUV mirrors for metrology application[J]. *SPIE*, 2003, 5037: 286-

- 293.
- [9] MICHETTE A G, WANG Z S. Optimisation of depth-graded multilayer coatings for broadband reflectivity in the soft X-ray and EUV regions[J]. *Optics Communications*, 2000, 177(1-6): 47-55.
- [10] TAN M Y, LI H C, HUANG Q S, *et al.*. Mo/Si aperiodic multilayer broadband reflective mirror for 12.5-28.5-nm wavelength range[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(2): 023102.
- [11] 朱京涛, 岳帅鹏, 涂昱淳, 等. 氮气反应溅射制备软 X 射线 Co/Ti 多层膜[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 10-14.
- ZHU J T, YUE SH P, TU Y CH, *et al.*. Preparation of Co/Ti multilayer in soft X-ray region by nitrogen reactive sputtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 10-14. (in Chinese)
- [12] 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.
- CHENG X B, WANG ZH SH, ZHANG ZH, *et al.*. Wide-angle X-ray supermirror design using simulated annealing algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 787-791. (in Chinese)
- [13] 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.
- WANG H CH, WANG ZH SH. The optimizing and designing method of multilayer film[J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(5): 50-53. (in Chinese)
- [14] 张众, 王占山, 秦树基, 等. 宽角度 X 射线超反射镜的设计[J]. 光子学报, 2003, 32(2): 253-256.
- ZHANG ZH, WANG ZH SH, QIN SH J, *et al.*. The design of X-ray supermirror with broad angle range[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(2): 253-256. (in Chinese)
- [15] DANE A D, VELDHUIS A, DE BOER D K G, *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(3-4): 254-268.
- [16] DEB K, AGRAWAL R B. Simulated binary crossover for continuous search space [J]. *Complex Systems*, 2000, 9(2): 115-148.
- [17] 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:自然科学版, 2016, 39(4): 1-7.
- MEI X F, KUANG SH Q, XIE Y. Application of the quantum evolutionary algorithm in researches of EUV multilayer[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2016, 39(4): 1-7. (in Chinese)
- [18] 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.
- MEI X F. *Application of the Quantum Evolutionary Algorithm in Researches of EUV Multilayer* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [19] 周亮. 实数编码量子进化算法及在投资组合中的应用[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- ZHOU L. *Real Coded Quantum Evolutionary Algorithm and its Application in Investment Portfolio* [D]. Shanghai: Donghua University, 2012. (in Chinese)
- [20] 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.
- LI M, DONG N N, LIU ZH, *et al.*. Reflectivity measurements of normal-incidence Mo/Si multilayer mirrors at 13.9 and 19.6 nm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1666-1672. (in Chinese)
- [21] 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[J]. *SPIE*, 2015, 6266: 626616.
- [22] 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.
- ZHANG CH, ZHANG J R, WANG Y M, *et al.*. Design of broadband EUV coatings based on quantum evolutionary algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0631001. (in Chinese)
- [23] 吴素勇. 光学薄膜鲁棒设计、参数表征和反向工程等若干关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大

- 学, 2011.
- WU S Y. *Research on Some Key Technologies of Robust Design, Parameters Characterization and Reverse Engineering of Thin Film Optical Coatings*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [24] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at  $E = 50\text{--}30,000$  eV,  $Z = 1\text{--}92$ [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, 54(4): 181-342.
- [25] KUHLMANN T, YULIN S, FEIGL T, *et al.*. Design and fabrication of broadband EUV multilayer mirrors[J]. *SPIE*, 2002, 4688:509-515.

#### 作者简介:



匡尚奇(1981—),男,吉林长春人,博士,副教授,2009年于吉林大学获得博士学位,主要从事量子光子与量子算法方面的研究。E-mail: physicskuang@sina.com



张超(1997—),男,吉林四平人,现为长春理工大学理学院本科生,主要从事量子进化算法方面的研究。E-mail: 17843153375@163.com