

一种基于遗传算法的单弹光调制高速椭圆偏技术

徐承雨^{1,2}, 张瑞^{1,2*}, 薛鹏², 郭浩杰^{1,2}, 王赛飞², 吕健宁^{1,2}, 武振涛², 王志斌²

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 山西省智能微波光电技术创新中心, 山西 太原 030051)

摘要: 针对单弹光椭圆偏测量技术需锁相多个周期信号、无法快速获得样品光学椭圆偏参数和薄膜厚度等问题, 提出一种基于弹光调制器(PEM)偏振调制和单调制周期遗传算法参数提取的高速单弹光调制椭圆偏测量方法, 该方法的时间分辨率可达 μs 量级。为保证算法的精度与稳定性, 利用系统输出单个调制周期干涉信号的极值对系统PEM的相位延迟幅值(δ_{peak})进行校准并且确定样品的光学椭圆偏参数范围。通过该校准方法可以确定待测参数范围, 大幅缩短计算时间, 提升计算精度。对空气以及61.4 nm和100 nm厚度的硅上镀二氧化硅样品进行测量, 实验表明该系统PEM的静态相位延迟(δ_{static})在测量范围内稳定波动, 最大偏差为0.0073 rad, 标准差为0.0033 rad, δ_{peak} 与FPGA输出信号的占空比线性拟合系数 R^2 为0.9995; 样品薄膜测量厚度与其真值的相对误差小于0.1%且偏差在1 nm以内, 椭圆偏测量所需调制信号时间为8.3 μs , 较传统弹光锁相椭圆偏方法快1~2数量级。该方法实现的高速单弹光调制椭圆偏测量技术具有较高的精度和稳定性, 为后续研究高速多弹光调制椭圆偏技术奠定基础。

关键词: 高速椭圆偏测量; 弹光调制; 遗传算法; 图像拟合仿真

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025021

引用格式: 徐承雨, 张瑞, 薛鹏, 等. 一种基于遗传算法的单弹光调制高速椭圆偏技术[J]. 测试技术学报, 2025, 39(2): 155-163.

XU Chengyu, ZHANG Rui, XUE Peng, et al. A high speed ellipsometry technology for single photoelastic modulation based on genetic algorithm[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(2): 155-163.

A High Speed Ellipsometry Technology for Single Photoelastic Modulation Based on Genetic Algorithm

XU Chengyu^{1,2}, ZHANG Rui^{1,2*}, XUE Peng², GUO Haojie^{1,2}, WANG Saifei², LÜ Jianning^{1,2},
WU Zhentao², WANG Zhibin²

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Technology Innovation Center of Shanxi Provincial for Intelligent Microwave Photoelectric,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A high-speed single photoelastic modulation (PEM) ellipsometry measurement method based on polarization modulation of PEM and parameter extraction of single modulation period genetic algorithm is proposed to address the issues of phase locking multiple period signals and inability to quickly obtain sample optical ellipsometric parameters and thin film thickness in single PEM measurement technology. The time

收稿日期: 2024-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62105302)

作者简介: 徐承雨(1999-), 男, 硕士生, 主要从事偏振光学、光谱分析、椭圆偏测量等研究。E-mail: 572135649@qq.com。

* 通信作者: 张瑞(1987-), 男, 教授, 博士, 主要从事光电测试和光调制研究。E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn。

resolution of this method can reach up to μs level. To ensure the accuracy and stability of the algorithm, the phase delay amplitude (δ_{peak}) of the PEM system is calibrated by the extremum of the interference signal within a modulation period of the system and the optical ellipsometry parameter range of the sample is determined. This calibration method can significantly shorten the calculation time and improve the calculation accuracy. By measuring the air and samples (made of silicon dioxide coated on silicon with thicknesses of 60 nm and 100 nm), the experiment shows that the static phase delay (δ_{static}) of the PEM system fluctuates stably within the measurement range. The maximum deviation of δ_{static} is 0.007 3 rad, and the standard deviation is 0.003 3 rad. The linear fitting coefficient R^2 of the duty cycle between δ_{peak} and FPGA output signals is 0.999 5. The experiments show that the relative error between the measured thickness of the sample film and its true value is less than 0.1% and the deviation is within 1 nm. The required modulation signal time for ellipsometric parameter measurement is 8.3 μs , which is 1~2 orders of magnitude faster than traditional PEM phase-locked ellipsometry methods. The results show that the high-speed single PEM ellipsometry measurement technology achieved by this method has high accuracy and stability, and lays the foundation for subsequent research on high-speed multi-PEM ellipsometry technology.

Key words: high-speed ellipsometry measurement; photoelastic modulation; genetic algorithm; image fitting simulation

0 引言

随着以光刻侵蚀和超精密加工技术为代表的加工技术和工艺的快速发展,微纳米薄膜因其优异的性能在半导体、微电子、生物医学、新材料等领域发挥着重要的作用。这类薄膜通常采用纳米级材料,其物理性能和化学特性会受到薄膜本身的光学常数、尺寸大小和表面结构等影响,各参数的微小变化会对薄膜物理化学性能产生巨大影响^[1-3]。其中,光学常数和薄膜厚度影响最大,因此对于各种薄膜厚度参数的精确测量与溯源性分析是保证器件质量、提高生产效率的重要手段^[4-5]。

扫描电子显微镜和原子力显微镜等扫描探针式显微技术主要采用探针扫描样品表面,具有超高分辨率、能够显示样品表面单原子层深度的局部表面结构和构建样品实空间中表面三维图像等特点,但不满足工业生产中实时在线监测的需求^[6-7]。椭圆偏振法是一种利用偏振光的振幅和相位等偏振特性的测量手段。偏振光在经过不同介质的相互作用界面时会发生反射和透射,光线的偏振特性会改变。椭圆偏振法通过测量光线经过待测薄膜样品前后的P分量和S分量的幅值比和相位差,然后经算法拟合求得待测薄膜样品的折射率和膜厚等参数。这种椭圆偏振测量技术的优点包括速度快、操作简单、非接触,可以实现工业制造上的实时在线监测^[8-10]。

现有的旋转椭圆偏测量技术可以准确测量出样品参数,但由于采用机械旋转补偿器,时间分辨率低(秒级),无法满足实际生产中在线原位检测等对高速测量的需求^[11-12]。基于弹光调制器的多弹光调制系统可以实现高速实时在线测量样品参数,但在实际控制中由于弹光晶体的温漂现象难以实现多个弹光晶体同时稳定工作^[13-15]。单弹光的椭圆偏测量系统在忽略弹光晶体的静态延迟量对晶体相位延迟幅值的影响下,由于频率信号的单一还是无法直接准确求解出样品的光学椭圆偏参数和薄膜厚度^[16-17]。

因此,本文基于弹光调制器(Photoelastic Modulation, PEM)偏振调制和遗传算法参数提取,提出一种在单个调制周期内的高速单弹光调制椭圆偏测量方法,使用单个弹光调制器并使其调制相位幅值位于 $\frac{\pi}{2} < \delta_{\text{peak}} < \frac{3\pi}{2}$ 区间,解决单弹光系统无法快速获得待测样品的光学椭圆偏参数和薄膜厚度问题,并且具有测量速度更快、精度高、稳定性好等特点。

1 椭圆偏测量装置与原理

椭圆偏测量仪是一种通过测量光束经样品反射或透射后入射光束偏振态变化情况,然后根据计算分析等方法求解样品光学参数和薄膜厚度等物理参数的仪器。椭圆偏测量过程主要分为两个部分,一是光学测量部分:根据偏振光学理论,建立合适样品的光学椭圆偏参数等物理参数以及光路入

射角、偏振元器件之间的理论光强穆勒矩阵,从而设计符合要求的光路进行试验测量;二是后续数据处理部分:根据搭建好的椭圆偏测量系统得到的光强信号,与理论模型构建的光强信号进行匹配,在符合精度要求下提取样品的椭圆偏参数。

椭圆偏测量系统的光路如图 1 所示。系统以 x

轴 0° 为参考基准,激光发出的光束依次经过由透光轴为 90° 的起偏器,快轴为 45° 、谐振频率为 60 kHz 的 PEM, 以及快轴为 0° 的 $1/4$ 波片所组成的起偏系统,再经待测样品反射后进入检偏系统中,检偏系统由透光轴为 -45° 的检偏器组成,最后在探测器测得出射光强的干涉信号。

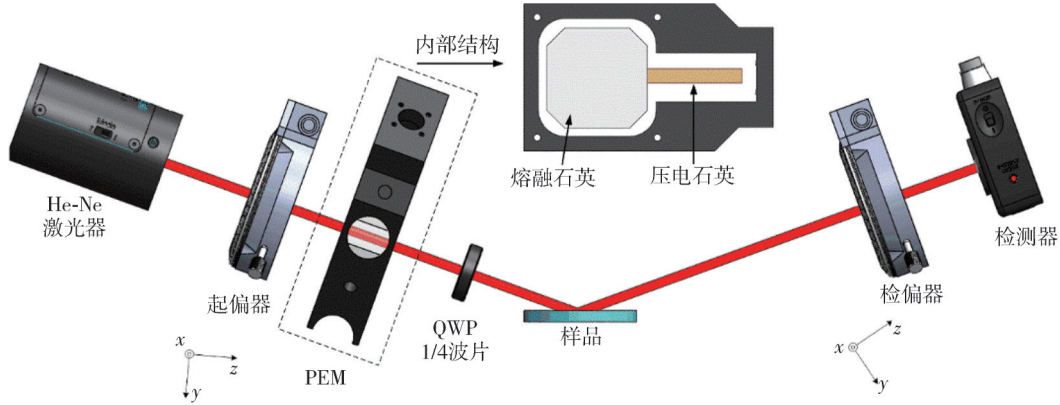


图 1 单弹光调制的系统光路图

Fig. 1 System light path diagram of a single PEM

利用 Stokes 矢量描述光信号的偏振态变化,入射光和出射光的偏振态变化可以表示为

$$\begin{aligned} S_{\text{in}} &= [I \quad Q \quad U \quad V], \\ S_{\text{out}} &= M_{\Lambda} M_x M_w M_{\text{PEM}} M_p M_{\text{in}}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: S_{in} 和 S_{out} 分别为光束在进入起偏系统前和经过检偏系统后的偏振态; M_p 、 M_{PEM} 、 M_w 、 M_x 和 M_{Λ} 分别为起偏器、PEM、 $1/4$ 波片、待测样品和检偏器的穆勒矩阵;各偏振器件的穆勒矩阵表达式为

$$\begin{aligned} M_p &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ M_w &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \\ M_{\Lambda} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ M_{\text{PEM}} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & 0 & -\sin \omega \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \omega & 0 & \cos \omega \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & -\cos(2\psi) & 0 & 0 \\ -\cos(2\psi) & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & D \\ 0 & 0 & -D & C \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $C = \sin(2\psi)\cos(\Delta)$; $D = \sin(2\psi)\sin(\Delta)$; $\omega = \delta_{\text{peak}} \sin(\omega_0 t) + \delta_{\text{static}}$, δ_{peak} 为 PEM 的相位延迟幅值, δ_{static} 为 PEM 的静态相位延迟幅值且只与 PEM 中晶体的性质有关, ω_0 为 PEM 上外驱动力的角频率; ψ ($0 \leq \psi \leq 90^\circ$) 为经过样品反射光的 P 分量和 S 分量的幅值比, Δ ($0 \leq \Delta \leq 180^\circ$) 为 P 分量和 S 分量相位差。且 ψ 和 Δ 满足

$$\frac{r_p}{r_s} = \tan \psi e^{i\Delta}, \quad (3)$$

式中: r_p 和 r_s 分别为 P 分量和 S 分量的反射系数。考虑到环境的杂光影响和探测器对光强信号的增幅, FPGA 最终接收到的光强信号为

$$\begin{aligned} I_{\text{out}} &= A[1 + \cos(\omega)\cos(2\psi) + \\ &\quad \sin(\omega)\sin(2\psi)\cos(\Delta)] + B, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: A 为对光信号的增幅系数; B 为对光信号的杂光系数。按照传统方法对输出光强进行傅里叶展开和贝塞尔级数展开求解样品参数,存在频谱泄露或故意忽略其他谐波所携带的信息现象,而且由于单 PEM 测量频率信号的形式单一,通过傅里叶展开方法不能准确求解出样品的椭圆偏参数,

于是引入遗传算法,通过拟合输出光强的干涉信号来提取求解样品的椭偏参数。

2 遗传算法介绍

实际测量的光强信号(I_{out})与理论模型求解出的光强信号(I)应相等,但由于弹光晶体长时间工作后的温漂现象和测量系统误差等问题的存在,使得实际实验中测得的输出光强信号(I_{out})与理论光强(I)之间存在一定的系统偏差,对样品的椭偏参数求解等价于使实际光强信号与理论值的总偏差即总残差最小。因此,对样品的椭偏参数的求解问题可以视为一个求解最小值的问题。所以,采用最小二乘法进行拟合,其中待拟合参数包括样品的振幅比(ψ)和相位差(Δ)两个椭偏参数、弹光晶体的延迟幅值(δ_{peak})和静态延迟量(δ_{static})以及环境影响系数 A 和 B ,则理论计算出的光强(I)可以表示为

$$\begin{cases} \omega = \delta_{peak} \sin(\omega_0 t) + \delta_{static}, \\ I_{out} = A[1 + \cos(\omega) \cos(2\psi) + \\ \sin(\omega) \sin(2\psi) \cos(\Delta)] + B. \end{cases} \quad (5)$$

因此,遗传算法的目标函数为理论计算出来的光强值(I)与实际测量光强值(I_{out})的残差平方和,

$$\chi^2 = \phi(\mu_j) = \min \left[\sum_{i=1}^{mm} (I_i - I_{out_i})^2 \right] = \min f, \quad (6)$$

式中: mm 为拟合一组信号的所有光强信号点个数; j 为待求解参数的个数。根据最小二乘法,利用优化算法对目标函数进行求解,最终得到满足光强最小残差平方和时对应的参数组;然后提取参数组中样品椭偏参数的振幅比(ψ)和相位差(Δ),根据样品模型和菲涅尔方程求解得到样品的薄膜厚度(d)。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是进化计算技术的一种,广泛应用于解决优化和搜索问题,其灵感来源于自然界的进化过程。遗传算法具有较好的鲁棒性、自适应性和并行搜索能力,能够自动求解提取和指导优化解空间,不需要确定的规则。该算法通过模拟自然界中的自然选择、遗传、交叉和突变等生物学机制进行优化问题解决方案,流程图如图2所示。

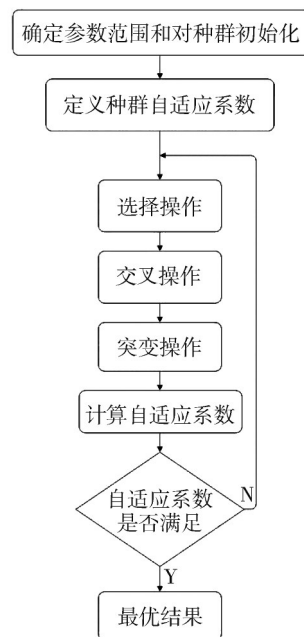


图2 遗传算法流程图

Fig. 2 Flow chart of genetic algorithm

2.1 种群初始化

假设初始解个体数为 NP ,那么待拟合参数对应的可能解的数量为 M ,则初始解集 X 为

$$x_i^k = [x_{i,1}^k, x_{i,2}^k, x_{i,3}^k, \dots, x_{i,M}^k], i = 1, 2, \dots, NP, \quad (7)$$

式中: x_i^k 表示第 i 个个体的第 k 次迭代,当 k 等于零时,可认定为待拟合参数的初代个体是在每个个体的解空间中随机生成的一组解,即

$$x_i^0 = B_{min} + rand_i(0, 1)(B_{max} - B_{min}). \quad (8)$$

在遗传算法的解空间中存在约束条件,公式中 B_{min} 和 B_{max} 分别为每个待求解参数在解空间的下限和上限。

2.2 选择算子

从群体中选择合适的个体,淘汰不合适个体的操作叫选择操作,其目的是把合适的个体(或解)直接遗传到子代或通过配对交叉的方式产生新的个体再遗传到子代。文中选用选择概率 $P(i)$ 的选择操作,即从种群中挑选个体,用个体选择概率 $P(i)$ 来代替个体适应度值的概率选择。此种选择操作不需要对种群按照一定规律进行排序,个体 x_i 被选择的概率服从二项分布

$$P(i, k) = \binom{n}{k} P(i)^k (1 - P(i))^{n-k}, \quad (9)$$

式中: n 为种群数量; k 为从种群中选出的自带个体的数目,实现概率服从二项分布的选择器的运行复杂度为 $O(n + \log(n))$ 。

2.3 交叉算子

交叉操作是遗传算法中的一个关键操作,它通过组合两个父代个体的染色体片段生成新的后代。这种模拟生物进化的过程能够保留父代个体的优良特征,并通过交叉产生多样性,有助于在搜索空间中更快地找到最优解。文中采用多点交叉操作中的算术交叉操作,用于从两个父代(P_1^k 和 P_2^k)中产生两个子代(C_1^{k+1} 和 C_2^{k+1})。随机混合量的选择:代码通过rand函数Q生成一个随机数a,这个随机数范围在(0,1)之间,其将决定如何混合两个父代来生成子代。当随机数a小于交叉算子 P_c ,满足交叉条件,则生成新的子代:子代 C_1^{k+1} 和 C_2^{k+1} 是父代 P_1^k 和 P_2^k 的加权平均,其中 C_1^{k+1} 的权重由a和(1-a)决定, C_2^{k+1} 的权重和 C_1^{k+1} 正好相反,即

$$\begin{cases} a = rand, \\ C_1^{k+1} = P_1^k a + P_2^k (1-a), \\ C_2^{k+1} = P_1^k (1-a) + P_2^k a. \end{cases} \quad (10)$$

2.4 突变算子

在遗传算法中,突变操作是指在遗传个体基因型中引入随机变动的过程,其作用是维持种群的多样性,防止算法陷入局部最优解。突变算子 P_{mu} 是用于判定父代个体是否发生突变操作的阈值,介于0~1之间。文中采用均匀突变操作,是指分别用符合某一范围内均匀分布的随机数,以一个很小的概率来替换父代个体编码串上原有的基因值。操作过程:1)依次指定个体编码串中的每个基因点为突变点;2)对于每一个突变点,按照突变算子概率 P_{mu} ,从对应基因的取值范围内任意取一个数字来替换原有基因值,表示为:设父代个体为 $X=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_m]$,若 x_i 为突变点,其取值范围为 $[U_{min}^i, U_{max}^i]$,对个体X在该点进行均匀突变操作后,得到一个新的子代个体 $X'=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_i', \dots, x_m]$,其中突变点的新基因值为

$$x_i' = U_{min}^i + r(U_{max}^i - U_{min}^i), \quad (11)$$

式中: r 为0~1范围内符合均匀概率分布的一个随机数。

3 实验及数据分析

3.1 数据采集与预处理

在时域空间为了方便研究PEM相位延迟幅度和待测样品光学椭圆偏参数分别对干涉信号的影响,

可以将式(3)简写为

$$I_{out} = 1 + \cos(\omega) \cos(2\psi) + \sin(\omega) \sin(2\psi) \cos(\Delta). \quad (12)$$

根据式(5),利用Matlab对干涉信号I仿真可知,在 $\delta_{peak} > \frac{P_{mu}}{2}$ 时, I_{out} 会出现4个极值,如图3所示。

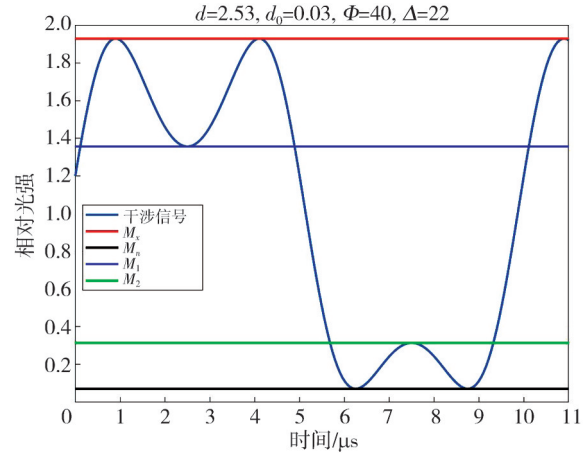


图3 干涉信号的仿真图

Fig. 3 Simulation chart of interference signal

4个极值分别为 M_x, M_n, M_1 和 M_2 ,令 $M_x > M_1 > M_2 > M_n$ 。

通过干涉信号的导函数找到输出光强的几个极值,干涉信号的导函数为

$$I_{out} = A\omega_0 \delta_{peak} \cos(\omega_0 t) [\sin(2\psi) \cos(\Delta) \cos(\omega) - \cos(2\psi) \sin(\omega)]. \quad (13)$$

令式(13)等于零,可以得到极值点条件为

$$\tan \omega = \tan(2\psi) \cos(\Delta), \text{ 或者 } \cos(\omega_0 t) = 0. \quad (14)$$

在 $\frac{\pi}{2} \leq \delta_{peak} \leq \frac{3\pi}{2}$ 时,将式(14)代入式(4),易得 $A_1 > A_3 > A_4 > A_2$,则有

$$\begin{cases} A[1 + \cos(2\psi) \sqrt{1 + \tan(2\psi) \cos(\Delta)^2}] + B = M_x, \\ A[1 - \cos(2\psi) \sqrt{1 + \tan(2\psi) \cos(\Delta)^2}] + B = M_n, \\ A[1 + \sin(2\psi) \cos(\Delta) \sin(\delta_{static} + \delta_{peak}) + \cos(2\psi) \cos(\delta_{static} + \delta_{peak})] + B = M_1, \\ A[1 + \sin(2\psi) \cos(\Delta) \sin(\delta_{static} - \delta_{peak}) + \cos(2\psi) \cos(\delta_{static} - \delta_{peak})] + B = M_2. \end{cases} \quad (15)$$

令 $\tan \theta = \tan(2\psi) \cos(\Delta)$,则有

$$\begin{cases} \sin \theta = \frac{\tan(2\psi) \cos(\Delta)}{\sqrt{1 + (\tan(2\psi) \cos(\Delta))^2}}, \\ \cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan(2\psi) \cos(\Delta))^2}}. \end{cases} \quad (16)$$

然后对式(16)求解变化可以得到

$$\begin{cases} \cos[\delta_{\text{peak}} - (\theta - \delta_{\text{static}})] = \frac{2M_1 - M_x - M_n}{M_x - M_n}, \\ \cos[\delta_{\text{peak}} + (\theta - \delta_{\text{static}})] = \frac{2M_2 - M_x - M_n}{M_x - M_n}. \end{cases} \quad (17)$$

令

$$\begin{cases} M = \frac{2M_1 - M_x - M_n}{M_x - M_n}, \\ N = \frac{2M_2 - M_x - M_n}{M_x - M_n}. \end{cases} \quad (18)$$

联立式(17)和式(18), 根据 $\frac{\pi}{2} \leq \delta_{\text{peak}} \leq \pi$ 可以得到

$$\delta_{\text{peak}} = \frac{\arccos\left(MN + \sqrt{(1-M^2)(1-N^2)}\right)}{2}. \quad (19)$$

根据图像极值大小不仅可以初步确定样品和光学系统各参数之间的关系和数值大小, 还可以

$$\begin{cases} B = M_n, \\ A = \frac{M_x - M_n}{2}, \\ \cos(2\delta_{\text{static}}) = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{M_1 - A - B}{A}\right)^2\right)\left(1 - \left(\frac{M_2 - A - B}{A}\right)^2\right)} - \frac{(M_1 - A - B)(M_2 - A - B)}{A^2}. \end{cases} \quad (22)$$

结合式(20)和式(22)初步计算出此时系统中样品的光学椭偏参数, 将此参数代入遗传算法进

将这些关系和数值代入图像拟合的遗传算法中, 作为拟合参数的上下限的参考范围选择指标, 缩小参数的范围从而提高算法的精度和减少大量算法拟合所耗时间。

3.2 系统PEM校准与空采

让系统进行空采(等效测量空气)时, 由于空气的椭偏参数 ϕ 和 Δ 分别为 45° 和 0° , 所以FPGA最终接收到的光强信号可以表示为

$$I_{\text{out-kq}} = A(1 + \sin \omega) + B. \quad (20)$$

此时干涉信号的极值处大小为

$$\begin{cases} M_x = 2A + B, \\ M_n = B, \\ M_1 = A[1 + \sin(\delta_{\text{static}} + \delta_{\text{peak}})] + B, \\ M_2 = A[1 + \sin(\delta_{\text{static}} - \delta_{\text{peak}})] + B. \end{cases} \quad (21)$$

根据3.1节内容, 此时可以求得增幅系数 A 和杂光系数 B , 即

行优化处理, 结果如图4所示。

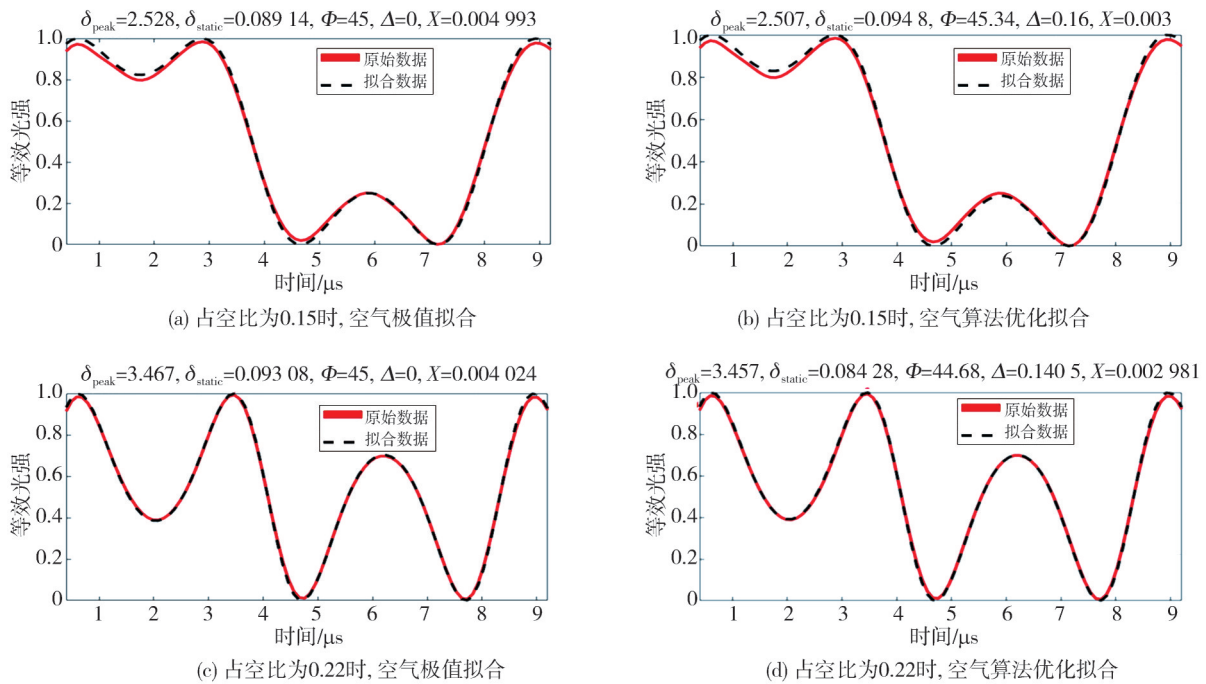


图4 理论和算法优化的仿真图与原始干涉信号图比较

Fig. 4 Comparison diagram of theoretical and algorithmic optimization simulation with the original interference signal diagram

图 4 为测量空气时,通过极值法(图(a)、图(c))和遗传算法优化(图(b)、图(d))两种方法得到的参数拟合图像与测量原始图像之间的比较,其中, X 为拟合曲线和原始数据曲线的残差平方和。可以发现,在相同条件下,极值法和遗传算法优化得到的两组 PEM 相位延迟幅值之间偏差优于 0.8%。因此,可以认为在测量空气样品时,利用波形的极值可以初步准确得到晶体的震动情况。

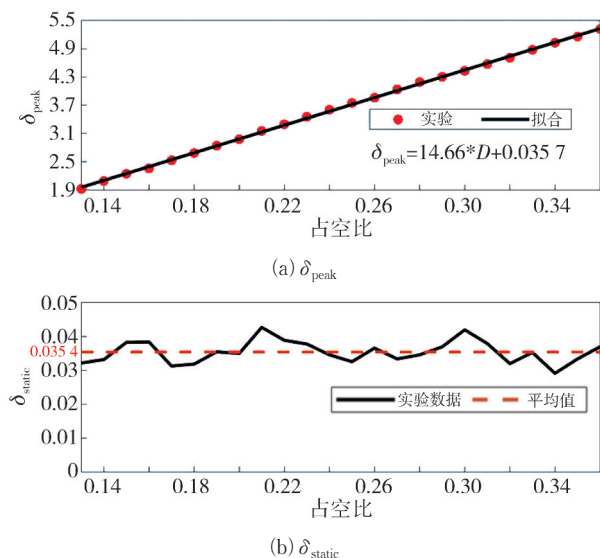


图 5 PEM 在 0.13~0.36 占空比内的校准结果
Fig. 5 The calibration results of the PEMs within the duty cycle of 0.13~0.36

为得到 PEM 在实时测量样品厚度时全工作范围的调制状态,将 FPGA 输出方波的占空比从 0.13~0.36 以 0.01 步进调节,从而间接调节弹光晶体两端的驱动电压大小,实现对晶体在工作范围内延迟幅值变化测量,结果如图 5 所示。可以发现 PEM 的相位延迟幅值(δ_{peak})与占空比(D)存在线性关系,其 R^2 为 0.9995;在占空比为零时 δ_{peak} 不为零,是由于 PEM 晶体从静止到共振需要一段稳定时间,所以当占空比为零时弹光晶体会保持较小的振动,可以使 PEM 更快地达到共振稳定状态。 δ_{static} 在测量范围内稳定在 0.0354 rad 左右波动,最大偏差小于 0.0073 rad,标准差在 0.0033 rad 左右,可认为 δ_{static} 不随占空比即驱动电压的变化而变化,这证实了 δ_{static} 只与 PEM 中晶体的性质有关。

3.3 标准样品数据处理

样品选用北京量拓公司的标定厚度为 61.4 nm 和 100 nm 硅上镀二氧化硅薄膜样品,根据 3.1 节中式(14)和式(19)可知不能直接准确求出样品的光学椭圆偏参数,所以在相同调制条件下通过测量空气得到增幅系数 A 和杂光系数 B ,对样品光学椭圆偏参数进行范围选定,然后将计算结果代入遗传算法中,计算拟合结果如图 6 所示。

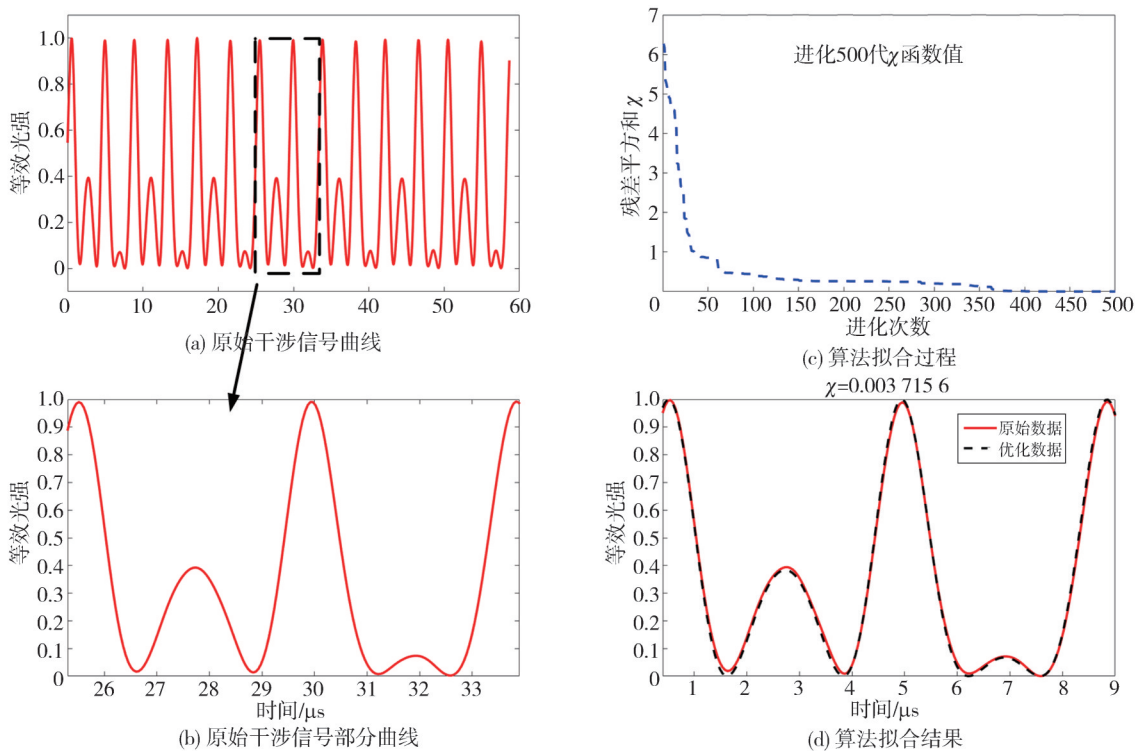


图 6 遗传算法仿真过程图
Fig. 6 Genetic algorithm simulation process diagram

图 6(a) 为原始干涉信号曲线, 图 6(b) 为放大图 6(a) 中虚线框周期的曲线, 图 6(c) 和图 6(d) 为利用遗传算法对图(a)中第一个时间周期的曲线拟合过程及结果。可以看到拟合计算过程所需调制信号时间为 $8.3 \mu\text{s}$, 比传统弹光锁相椭偏方法快 1~2 个数量级, 而且拟合曲线和原始曲线的残差平方和 χ 收敛到最小值 0.003 7, 验证

了方法的时间分辨率低、可行性和准确性。利用所提方法测量 2 个样品的结果如图 7 所示。可以看出, 拟合信号与干涉信号之间的残差平方和都小于 0.015, 拟合计算的薄膜厚度 d 与样品实际厚度相对误差优于 0.1%, 最大偏差在 1 nm 以内。所以, 遗传算法计算的样品光学椭偏参数即为样品的实际光学椭偏参数。

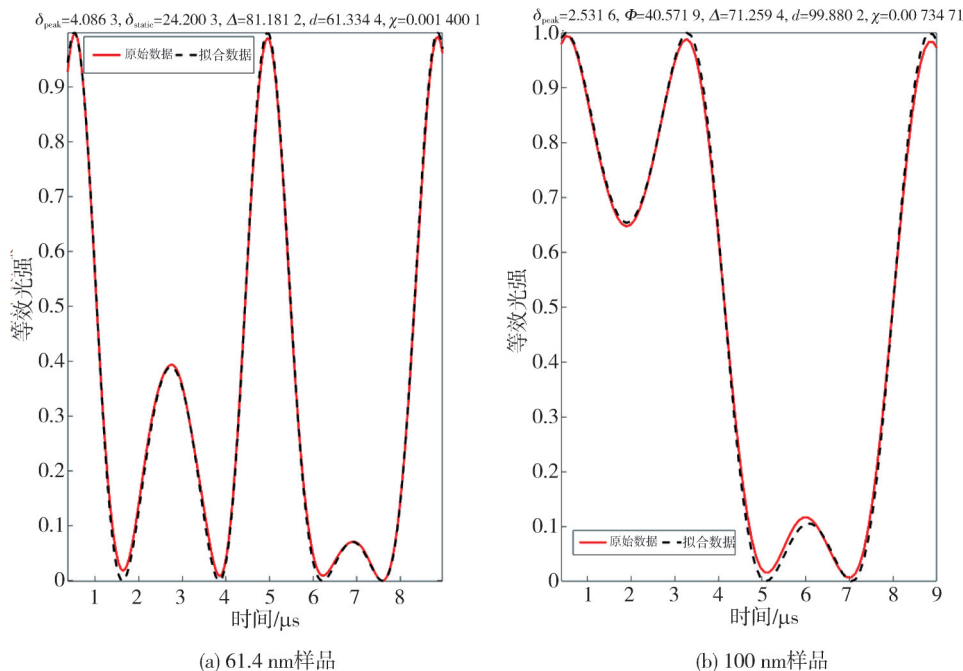


图 7 两个样品拟合信号与样品干涉光强信号

Fig. 7 Two sample fitting signals and sample interference light intensity signals

4 结论

本文基于遗传算法的特性和高速单弹光调制技术, 设计了一种新型光谱椭偏测量方法, 成功实现了单弹光测量系统中对样品薄膜厚度及光学椭偏参数的高效求解。为满足在大延迟变化范围内对纳米级薄膜厚度进行高精度和高灵敏度的在线测量需求, 进一步提出了一种通过识别单个调制周期内干涉信号的极值来确定参数范围的策略, 以确保遗传算法能够得出唯一解。实验表明, 该方法在建立驱动信号占空比与 δ_{peak} 之间的线性关系时表现出色; 实测得出 δ_{static} 稳定在 0.035 4 rad 左右, 最大偏差仅为 0.007 3 rad, 标准差为 0.003 3 rad; 此外, 通过遗传算法的参数拟合与提取, 测得薄膜厚度与真值的相对误差优于 0.1%, 且其偏差在 1 nm 以内。综上所述, 该方法不仅弥补了传统单弹光系统在实时在线测量方面的不足, 能够同时精确获取样品的光学椭偏参数

和薄膜厚度, 而且还展示出优异的测量准确性和稳定性, 为相关领域的研究提供了强有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 王佳彤, 黄启章, 高剑峤, 等. CdSe 量子点滤光片尺寸、温度依赖的光学特性[J]. 中国光学, 2021, 14(1): 163-169.
WANG Jiatong, HUANG Qizhang, GAO Jianqiao, et al. Size and temperature dependence of spectral transmittance for CdSe colloidal quantum dot film filters[J]. Chinese Optics, 2021, 14(1): 163-169. (in Chinese)
- [2] SUN J, LI X, ZHANG H, et al. A method for measuring and calibrating the thickness of thin films based on infrared interference technology [J]. Results in Physics, 2023, 51: 106727.
- [3] LIU S, CHEN X, ZHANG C. Development of a broadband Mueller matrix ellipsometer as a powerful tool for nanostructure metrology [J]. Thin Solid

- Films, 2015, 584: 176-185.
- [4] ARWIN H. Application of ellipsometry techniques to biological materials[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(9): 2589-2597.
- [5] DEHURY T, KUMAR S, KUMAR SINHA A S, et al. Thickness dependent phase transformation and resistive switching performance of HfO_2 thin films[J]. Materials Chemistry and Physics, 2024, 315: 129035.
- [6] 李兆宇, 刘子豪, 王瑶莹, 等. 高精度激光共焦半导体晶圆厚度测量[J]. 光学精密工程, 2024, 32(7): 956-965.
LI Zhaoyu, LIU Zihao, WANG Yaoying, et al. High-precision laser confocal measurement of semiconductor wafer thickness[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(7): 956-965. (in Chinese)
- [7] 周剑, 何兴理, 金浩, 等. 基于 ZnO 压电薄膜的柔性声表面波器件[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 346-350.
ZHOU Jian, HE Xingli, JIN Hao, et al. Flexible ZnO thin film SAW device on polyimide substrate[J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 346-350. (in Chinese)
- [8] 胡春光, 孙兆阳, 方子璇, 等. 基于准布儒斯特角法研究抛光过程中光学材料的表面质量[J]. 光学精密工程, 2020, 28(2): 315-323.
HU Chunguang, SUN Zhaoyang, FANG Zixuan, et al. Study on surface quality of polished optical materials with quasi-Brewster angle method[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(2): 315-323. (in Chinese)
- [9] 朱绪丹, 张荣君, 郑玉祥, 等. 椭圆偏振光谱测量技术及其在薄膜材料研究中的应用[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1195-1234.
ZHU Xudan, ZHANG Rongjun, ZHENG Yuxiang, et al. Spectroscopic ellipsometry and its applications in the study of thin film materials[J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1195-1234. (in Chinese)
- [10] 张金旭, 陈家扬, 吴冠豪. 基于光谱干涉椭圆偏法的薄膜厚度测量[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 122-127.
ZHANG Jinxu, CHEN Jiayang, WU Guanhao. Measurement of thin film thickness based on spectral interference ellipsometry [J]. Measurement Technology, 2023, 43(1): 122-127. (in Chinese)
- [11] 谢大洋, 刘政杰, 薛鹏, 等. 广义椭圆偏仪双补偿器任意比例旋转控制系统[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(2): 125-130.
XIE Dayang, LIU Zhengjie, XUE Peng, et al. Generalized ellipsometry double compensator arbitrary proportional rotation control system[J]. Journal of Detection and Control, 2024, 46(2): 125-130. (in Chinese)
- [12] 李苏斌. 双旋转补偿器型穆勒矩阵椭圆偏仪同步控制系统设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [13] 王志斌, 张瑞, 赵冬娥, 等. 光弹调制互差频偏振测量及误差分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 876-883.
WANG Zhibin, ZHANG Rui, ZHAO Donge, et al. Photoelastic-modulator-based differential frequency polarization modulation measurement and error analysis [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 876-883. (in Chinese)
- [14] 刘坤, 李克武, 李坤钰, 等. 弹光调制器相频特性分析与稳定控制技术[J]. 激光杂志, 2024, 45(7): 36-41.
LIU Kun, LI Kewu, LI Kunyu, et al. Analysis of phase frequency characteristics and stability control technology of photoelastic modulator [J]. Laser Journal, 2024, 45(7): 36-41. (in Chinese)
- [15] 李克武, 王黎明, 王志斌, 等. 弹光和电光级联的组合相位调制型椭圆偏测量术[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 690-697.
LI Kewu, WANG Liming, WANG Zhibin, et al. Phase-modulated ellipsometry combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 690-697. (in Chinese)
- [16] 张瑞, 王志斌, 李晓, 等. 单弹光调制傅里叶偏振光谱测量研究[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 95-99.
ZHANG Rui, WANG Zhibin, LI Xiao, et al. Spectropolarimeter measurement based on photoelastic-modulator and Fourier transform [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 95-99. (in Chinese)
- [17] 王爽, 韩燮, 李晓, 等. 弹光调制椭圆偏参量的数字锁相数据处理[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1314-1321.
WANG Shuang, HAN Xie, LI Xiao, et al. Digital phase-locked data processing for ellipsometric parameter measurements based on photoelastic modulation [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1314-1321. (in Chinese)