文章编号：1005-5630(2025)05-0085-10 **DOI**: 10.3969/j.issn.1005-5630.202403110047

基于氙灯光源的光谱干涉薄膜测厚技术研究

汪嘉欣，王臻磊，张卓南，周 辰，万新军
（上海理工大学 光电信息与计算机工程学院，上海 200093）

摘要：利用氙灯光源宽光谱特性，结合薄膜光谱干涉原理，设计并搭建了一套大量程低成本薄膜厚度光学测量系统。比较研究了 LED 光源和宽谱氙灯光源的光谱干涉信号，提出了一种针对不同厚度薄膜的多模式薄膜厚度计算方法。从数十微米到百纳米厚度区间内，可以根据调制周期峰值数，分别采用傅里叶相位梯度法，极值法和光谱拟合法解算薄膜厚度。基于构建的实验系统，先后对 4～30 μm 系列标准厚度片，以及百纳米级硅基 SiO_2 薄膜样品开展膜厚测量实验。通过和商业仪器测量结果比对，验证了本文方法在大量程膜厚测量中的可行性和精度。本文研究对于拓展低成本光谱干涉膜厚测量技术的应用具有借鉴意义。

关键词：氙灯；宽光谱；薄膜厚度；光谱干涉
中图分类号：TN 209 **文献标志码**：A

Research on thin film thickness measurement method based on spectral interferometry with Xenon lamp

WANG Jiaxin，WANG Zhenlei，ZHANG Zhuonan，ZHOU Chen，WAN Xinjun
（School of Optical-Electrical Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China）

Abstract: In this paper, a low cost large-range optical measurement system for thin film thickness is designed and built by using the broad spectral characteristics of Xenon lamp and the principle of thin film spectral interferometry. The spectral interference signals of LED light source and wide-spectrum Xenon lamp source are compared, and a multi-modal method for thin films of different thicknesses is proposed. For thin films covering several hundred nanometers to tens of micrometers, the thickness calculation method can be selected from the Fourier phase gradient method, the peak points method and the spectrum fitting method. Through the construction of the experimental system, a series of 4-30 μm thick standard PET sheet samples and silicon-based SiO_2 film samples are successfully measured, and the results are compared with commercial film thickness measurement systems, which verifies the feasibility of the large range film thickness measurement using the proposed method. The research in this paper can be of reference to the expansion of the range of low cost spectral interferometric film thickness measurement technology.

收稿日期：2024-03-11
基金项目：上海市科技创新行动计划（19511104600）
第一作者：汪嘉欣 (1999—)，女，硕士研究生，研究方向为光学测量仪器等。E-mail：2286365945@qq.com
通信作者：万新军 (1981—)，男，讲师，研究方向为光学测量仪器、光学设计等。
E-mail：xinjun.wan@usst.edu.cn

Keywords: Xenon lamp; broad spectrum; thin film thickness; spectral interference

薄膜工艺在光学元件、通信器件、平板显示和集成电路制造等领域具有不可替代的作用。薄膜的厚度参数对薄膜的力学性能和光学性能往往能起到决定性影响。因此，如何快速且准确地测量薄膜的厚度仍是热点研究问题[1]。

目前，薄膜厚度测量的方法一般可分为非光学方法[2]和非接触式光学方法[3]。其中，光学膜厚测量方法主要包括椭圆偏振法[4]、白光干涉法[5]和光谱干涉法[6]。椭偏法和白光干涉法在膜厚测量中精度较高，但其系统结构复杂，所用的椭偏仪和白光干涉仪等仪器价格昂贵。

光谱干涉法是一种利用薄膜不同表面的反射光在光谱分光面上的干涉信号来计算膜厚，该方法相对简单易操作、成本低，更符合工业应用需求。

光谱干涉法膜厚测量通常采用宽光谱光源照射薄膜样品，用光谱仪接收光谱干涉信号，使用色散元件配合线阵相机阵列，避免了波长扫描检测，测量速度快。同时，利用光纤技术可实现测量光发射与接收的同轴复用，测量易操作。围绕光谱干涉法膜厚测量近年来开展了众多研究，逐渐形成了极值法[7]、包络法[8]、全光谱拟合法[9]和傅里叶相位梯度法[10-11]等多种主流方法。包络法和全光谱拟合法主要应用于多层膜的参数测量。2012 年，北京理工大学荆龙康等[12]利用自适应模拟遗传算法，同时考虑薄膜材料的色散模型，通过全光谱拟合方法成功实现多层薄膜厚度和光学常数测量。2015 年，刘朝霞等[13]提出了一种利用薄膜反射光谱包络线法计算光电薄膜光学常数和厚度的方法。2019 年，中国计量大学狄韦宇[14]将改进的自适应遗传算法与单纯形法相结合，实现晶圆片薄膜光学常数和厚度的反射光谱法测定研究。

单层膜膜厚测量在塑料薄膜及显示面板制造领域应用广泛，主要测量方法包括极值波长法和傅里叶相位梯度法。极值波长法作为一种简单直观的膜厚测定方法，计算量小测量速度快。但测量精度受极值点的定位准确性影响较大，当光谱信号包含噪声时，极值点不易判读。2020 年，天津大学 Hao 等[15]对传统傅里叶变换法进行改进，利用相位功率谱算法解算薄膜厚度，减小了膜厚测量误差，其实现的膜厚测量范围在 1～75 μm。2023 年，长春理工大学董所涛[16]研制了覆盖可见光至中红外波段的宽光谱光学膜厚监控系统，解决了窄带滤波等波长精确定位和红外波段膜厚精确控制等问题。综合文献调研分析，现有光谱干涉测量系统大多应用体积紧凑的 LED 光源，其光谱相对较窄，限制了光谱干涉的膜厚测量范围。

针对 LED 光源光谱干涉测量系统膜厚测量范围偏小的缺点，本文提出了一种利用氙灯的宽光谱进行多模式光谱干涉膜厚测量的方法。从数十微米到百纳米的厚度，可以根据调制周期峰值数分别选取傅里叶相位梯度法，极值法和光谱拟合法解算薄膜厚度。设计并搭建了一套大量程薄膜厚度光学测量系统，通过聚对苯二甲酸乙二醇酯（polyethylene terephthalate, PET）标准厚度片和硅基 SiO_2 薄膜样品测量验证了该技术方案的可行性。

1　光谱干涉薄膜测厚原理

1.1　薄膜反射光干涉

当光入射到单层光学薄膜表面时，透射和反射光结构如图 1 所示。

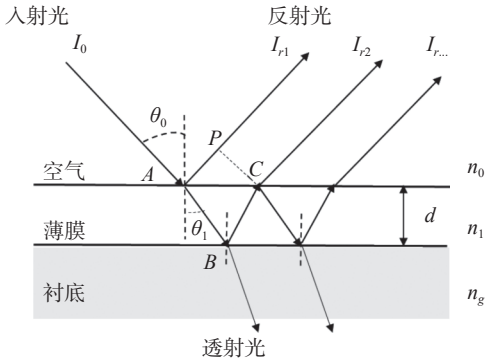


图 1　单层薄膜界面的反射光结构

Fig. 1　Reflected light structure of single-layer film interface

反射光频率相同，振动方向相同，相邻波前间的相位差保持恒定，根据光的干涉理论可以在薄膜的同一侧发生相干干涉。简化模型只考虑双光束干涉情况，即前两束最强的反射光的干涉信

号表达式为

$$I_r(z,\lambda)=I_{r1}+I_{r2}+2\sqrt{I_{r1}I_{r2}}\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\cdot z+\Phi_0\right) \tag{1}$$

式中：I_{r1}，I_{r2} 为反射光到达探测器上前两束光场振幅；λ 为波长；Φ_0 为初始相位；z 为相邻两级反射光的光程差。对于厚度为 d、折射率为 n_1 的平行薄膜，同一入射角 θ_0 下，

$$z=2d\sqrt{n_1^2-n_0^2\sin^2\theta_0}=2n_1d\cos\theta_0 \tag{2}$$

当白光垂直射入单层薄膜时，光程差近似为 $2n_1d$。将干涉光送入光谱仪，根据式(1)和(2)，通过分析干涉光 I_r 的光谱信号可以测量得到薄膜厚度 d。光谱干涉信号的波动周期与薄膜厚度 d 直接相关。当光谱仪的光谱探测范围和分辨率一定时，可以测量的薄膜厚度 d 基本由所用光源的光谱范围决定，越宽的光谱范围可以覆盖越大的薄膜厚度范围。目前商用成熟的低成本便携光谱仪的光谱探测范围可以达到 200～1 100 nm，光谱分辨率约为 0.5 nm。经过调研多数文献在测量薄膜厚度时都选用体积紧凑的 LED 光源。光源光谱范围应该与光谱仪光谱范围相匹配，从而发挥光谱仪的最大性能。本文选取了在谱段上能够覆盖 200～1 100 nm 波段的氙灯宽谱光源来开展光谱干涉薄膜测量研究。

对于多层膜，反射光谱干涉光强信号可以转换成薄膜的反射率谱，通过匹配实际信号与反射率谱理论模型光谱拟合来优化计算多层膜的各层膜厚。以双层膜为例，图 2 为双层膜等效示意图。

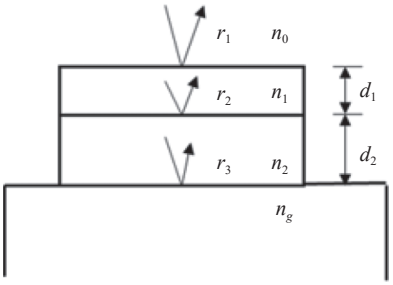


图 2　双层膜等效示意图

Fig. 2　Schematic diagram of equivalence structure of bilayer film

双层膜的膜厚为 d_1 和 d_2。考虑正入射情况，反射系数 r_1、r_2、r_3 和相位系数 δ_1、δ_2 分别为

$$r_1=\frac{n_0-n_1}{n_0+n_1},\quad r_2=\frac{n_1-n_2}{n_1+n_2},\quad r_3=\frac{n_2-n_g}{n_2+n_g} \tag{3}$$

$$\delta_1=\frac{2\pi}{\lambda}\cdot 2n_1d_1,\quad \delta_2=\frac{2\pi}{\lambda}\cdot 2n_2d_2 \tag{4}$$

式中：n_0 为空气折射率；n_1 为第一层薄膜折射率；n_2 为第二层薄膜折射率；n_g 为衬底折射率。

将紧挨衬底薄膜与衬底之间看成整体，再与空气介质方薄膜构成平行薄膜，通过菲涅尔递推公式获得双层膜的综合反射系数为

$$r^{\sim}=\frac{r_2+r_3*\mathrm{e}^{(\mathrm{i}\delta_2)}}{1+r_2*r_3\mathrm{e}^{(\mathrm{i}\delta_2)}} \tag{5}$$

$$r_{双}=\frac{r_1+r^{\sim}*\mathrm{e}^{(\mathrm{i}\delta_1)}}{1+r_1*r^{\sim}*\mathrm{e}^{(\mathrm{i}\delta_1)}} \tag{6}$$

图 3 对比了采用白光 LED 光源和氙灯宽谱光源测量厚度名义值在 290 nm，3.9 μm 和 30 μm 的薄膜反射光干涉光谱信号。从光谱上看，白光 LED 有效工作波段基本在 500～700 nm 区间；在此区间，3.9 μm 薄膜干涉信号的采样质量是满足测量要求的，但是对于 30 μm 厚薄膜则干涉调制信号明显采样率不够，对于 290 nm 厚薄膜则没有明显光谱干涉调制波动信号。采用氙灯光谱时，测量 30 μm 厚度薄膜在 700～1 100 nm 波段区间干涉调制的采样是足够的，对于 290 nm 厚薄膜也有足够的调制波动，因此采用宽谱氙灯光源可测的薄膜厚度更宽，适用范围更广。

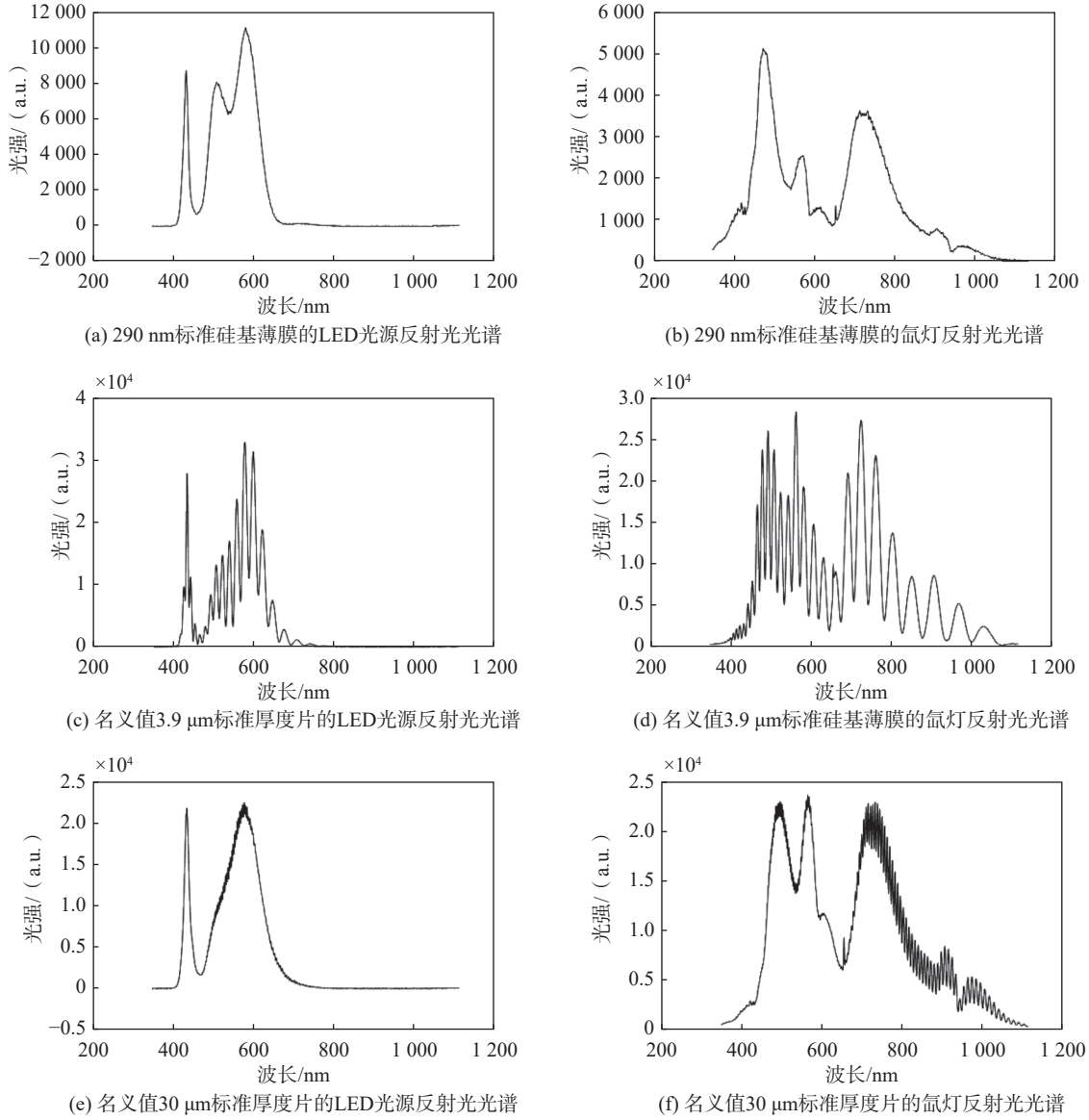
1.2　薄膜厚度计算

基于薄膜反射光干涉光谱信号测量薄膜厚度的计算方法主要包括以下 3 种方法。

1.2.1　极值波长法

根据式(1)，薄膜反射率光谱曲线随波长增加呈现周期性波动，当膜层光学厚度为四分之一波长的整数倍时，反射率曲线出现极值拐点。极值波长法通过精确定位反射率极值处对应的波长并计算一定波长范围内干涉光谱的峰(谷)数测定薄膜的厚度。若 λ_1 和 λ_2 分别是相邻峰(谷)的两个极值波长($\lambda_1>\lambda_2$)，n 为薄膜折射率，不考虑色散影响，则由相邻峰谷的两个极值可以得到的膜厚 d 为

$$d=\frac{\lambda_1\lambda_2}{2n(\lambda_1-\lambda_2)} \tag{7}$$



(a) 290 nm标准硅基薄膜的LED光源反射光光谱　(b) 290 nm标准硅基薄膜的氙灯反射光光谱

(c) 名义值3.9 μm标准厚度片的LED光源反射光光谱　(d) 名义值3.9 μm标准硅基薄膜的氙灯反射光光谱

(e) 名义值30 μm标准厚度片的LED光源反射光光谱　(f) 名义值30 μm标准厚度片的氙灯反射光光谱

图 3　不同厚度膜片的 LED 反射光光谱干涉和氙灯反射光光谱干涉信号

Fig. 3　Reflection spectrum of LED and Xenon lamp for various thickness films

极值法测量薄膜厚度具有简单快速的优势，但对于光谱干涉信号的干涉调制对比度要求较高，因此比较适合于数微米的膜厚范围。

1.2.2　傅里叶相位梯度法

傅里叶相位梯度法是指利用傅里叶变换计算相位梯度来确定薄膜厚度。对光谱仪采集的横坐标为波长、纵坐标为光强的原始反射光谱图，进行平滑处理。用三次样条插值实现波长 λ 到波数 σ 域的转换，使波数空间信号均匀化。由于采集到光谱干涉调制信号通常是叠加在低频包络信号上，因此需要采用经验模态分解法[17]（empirical mode decomposition, EMD）作为高通滤波器自适应滤波提取高频光谱干涉项。

EMD 法是一种时频域信号分解的预处理算法[18]，它无需预先设定任何基函数，依据数据自身的时间尺度特征来进行信号分解，在处理非平稳及非线性数据上具有明显的优势，适合分析非线性非平稳的信号序列。对光谱干涉信号进行 EMD 自适应滤波后获得高频信号 I_{IMF1}，再对其进行傅里叶变换得到 $S(z)$，

$$S(z)=IFFT(I_{\mathrm{IMF1}}(k))=S(z-d)+S^{*}(-z-d) \tag{8}$$

保留 $S(z)$的正值部分 $S^{+}(z)=S(z-d)$，并对 $S^{+}(z)$ 再次进行傅里叶逆变换。即原始高频干涉

光谱经两次傅里叶变换后变换成复数形式，提取其复函数的实部和虚部即可得到相位信息。对相位进行解包裹，得到波数与相位的关系图。最后，利用最小二乘法拟合获得斜率即光程差 $z=\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}K}$，即可解算薄膜厚度 d。

当薄膜厚度达到数十微米时，薄膜反射干涉光谱信号中调制峰数十分多，且存在基础的类高斯调制包络干扰，此时采用极值法计算膜厚精度受到限制。傅里叶相位梯度法通过众多周期调制信号来计算膜厚，抗干扰能力强，精度也更高。

1.2.3　光谱拟合法

光谱拟合法是在已知反射率模型的基础上，基于波长 λ 处给定的折射率、消光系数和厚度，通过膜层的反射率公式计算反射率的理论值 $R(n, k, d, \lambda)$。将计算得到的反射率理论曲线与实际测量的反射率曲线 $R_0(\lambda)$ 进行比对，构造如式(9)所示的评价函数 F。当理想反射率曲线尽可能逼近实测曲线，此时可以寻找到薄膜厚度的最佳匹配值。通常利用模拟退火、遗传算法、Levenberg-Marquardt 法等优化算法[19-20]求解薄膜参数，可以快速得到薄膜厚度值。相比前两种算法，光谱拟合法在测量较薄厚度薄膜和多层膜上具有独特优势。

$$F=\sum_{\lambda=\lambda_L}^{\lambda_L}[R(n,k,d,\lambda)-R_0(\lambda)] \tag{9}$$

当薄膜厚度很薄时，或者测量对象是多层膜时，采集的反射光谱干涉信号不再呈现为明显的调制周期信号，不满足梯度法、极值法解算膜厚度的条件，此时必须通过光谱拟合法解算厚度。

1.3　基于宽光谱光源的多模式薄膜厚度计算方法

根据图 3 中的光谱干涉信号可以看出，不同厚度薄膜的光谱干涉信号调制频率存在明显区别，相匹配的膜厚计算方法也需要调整。因此，本文提出了一种基于宽光谱光源的多模式薄膜厚度计算方法。

数百纳米厚度的较薄薄膜对应的光谱干涉信号周期跨度很大，需要大范围的光谱干涉信号分析薄膜厚度信息，此时比较适用的膜厚计算方法是光谱拟合算法。对于数微米厚薄膜的厚度测量，由于干涉调制信号的周期数介于光谱拟合信号要求和傅里叶梯度法要求之间，则比较适合采用极值法进行膜厚计算。数十微米厚的较厚薄膜光谱干涉信号波动频率高，只有在较大波长的区间内才有足够的干涉调制对比度，因此，它适合选取大波动区间的光谱干涉信号通过傅里叶相位梯度法或者极值法进行膜厚计算。具体选择哪一种方法进行膜厚计算，可以根据光谱反射率信号的峰值计数进行初步判断。

图 4 是本文设计的多模式薄膜厚度计算方法的流程图。由于不同薄膜的材料组成的差异，实际反射率光谱曲线会存在各种变化，具体选择哪一种方法计算薄膜厚度有时也可以调整。

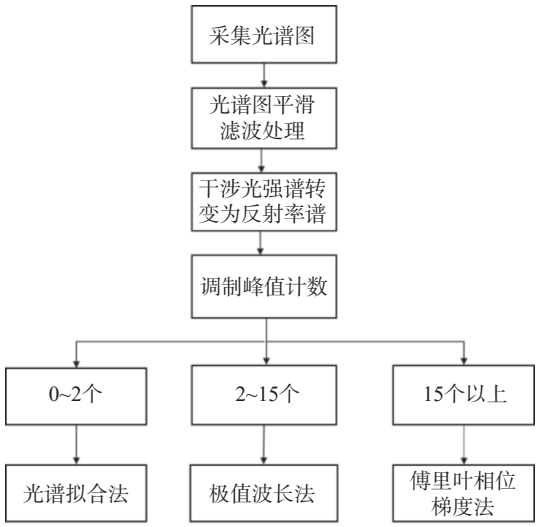


图 4　多模式薄膜厚度计算方法的流程图

Fig. 4　Flow diagram of a multi-mode film thickness calculation method

2　实验装置和结果分析

2.1　实验装置

为验证所提出宽光谱光源薄膜厚度测量方法的可行性，本文构建了一个基于氙灯光源的低成本薄膜厚度测量系统。如图 5 所示，实验系统由氙灯光源、Y 型光纤、会聚透镜和便携式光栅光谱仪(高利通：型号 GLA639，光谱分辨率 0.6 nm)等组成。氙灯光源发出的光通过 Y 型光纤传输，经过会聚透镜聚焦薄膜样品表面，反射光再通过会聚透镜耦合回 Y 型光纤，输出到光栅光谱仪。采集光谱仪输出的干涉光谱信

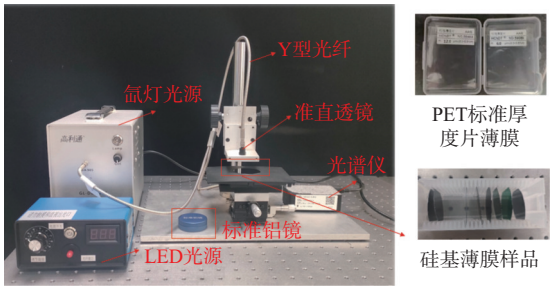


图 5　实验测量系统

Fig. 5　Experimental measurement system

号，根据上面设计的多模式薄膜厚度计算方法，实现对大膜厚范围的薄膜样品的快速、高精度测量。

本文选取的薄膜测量样品包含两种，如图 5 所示。一种是 PET 材质的微米级标准厚度片，厚度范围在数微米至数十微米；另一种是采用光驰 900 镀膜机在 2 inch（1inch=2.54 cm）硅晶圆上镀单层 SiO_2 薄膜和双层膜（SiO_2 和 Ta_2O_5 薄膜）。为了验证实验装置测量精度，对于微米级厚度单层薄膜，本文选用商业白光干涉三维显微镜（瑞霏光电：型号 Micro1000）和本文装置进行了对比测量；对于纳米级厚度硅基薄膜，选用商业椭偏仪（horiba 公司：uvisel 椭偏仪）进行对比测量分析。

2.2　微米级标准厚度片测量

本文选用了 6 片 PET 材料标准厚度膜片名义厚度值在 4～30 μm 区间内，按照膜片厚度标记为 1～6 号样品，进行了光谱干涉信号测量实验。根据反射光谱干涉信号的调制周期数来选定膜厚计算方法。对于样品 1 和 2 采用极值法计算膜厚，可以直接对光谱干涉信号进行峰值提取，选取信噪比好的多组相邻峰间距计算膜厚，求取平均值作为最终膜厚测量值。对于样品 3～6，实验发现由于薄膜较厚，其反射率谱中峰值过多，容易出现多值情况，造成极值波长法解算误差较大，因此采用傅里叶相位梯度法计算膜厚。实验发现，直接对干涉光谱信号处理，而非先通过反射率调制曲线，计算得到的相位梯度重复性更优；此外，通过分析氙灯光源反射干涉光谱的信号调制质量可知，选取 500～800 nm 波段进行数据处理，结果更加稳定。图 6 为名义值 12 μm 标准厚度片（样品 4）的傅里叶相位梯度分析方法的解算过程。

在每片标准厚度片有效区域内随机选取

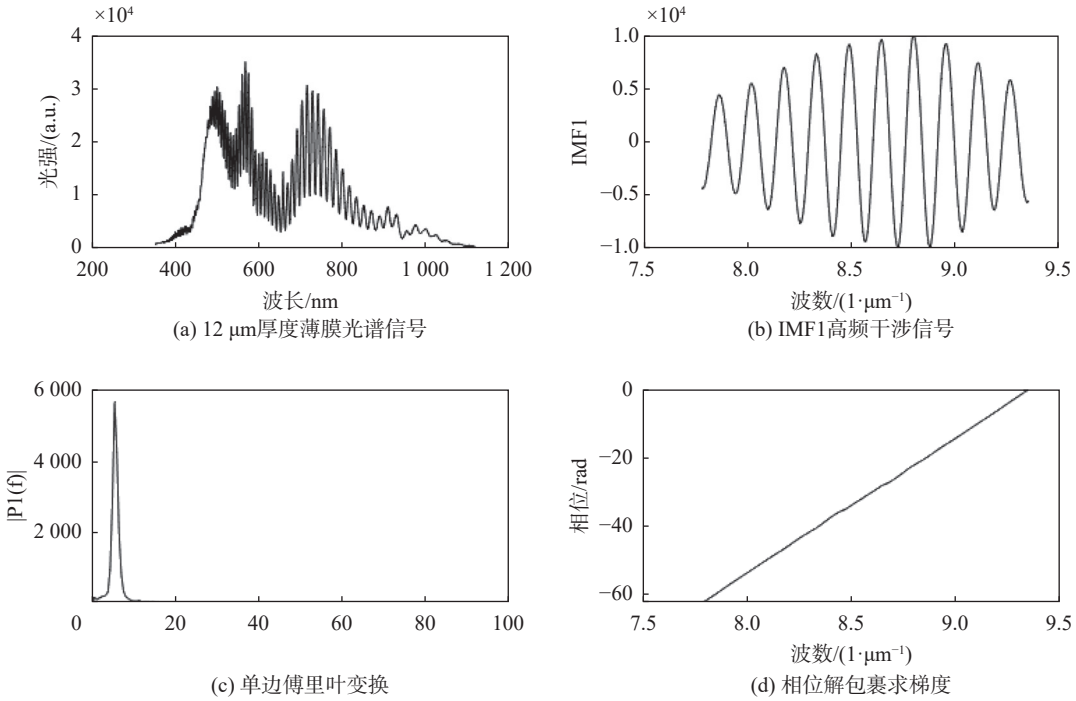


图 6　名义值为 12 μm 标准厚度片傅里叶相位梯度法膜厚解算过程流程图

Fig. 6　The nominal value is 12 μm standard thickness sheet Fourier phase gradient film thickness solution process flow chart

15 个测量点，用实验装置测量薄膜厚度。用白光干涉显微镜测量每片样品中心区域点的厚度值作为参考真值来评估实验装置的测量精度。图 7 为 6 组标准厚度片 15 个随机点的误差图，可以看到，除个别点误差偏大，整体上误差在 0.1 μm 范围内，测量稳定。每个样片的 15 次测量结果取平均值结果如表 1 所示，其测量结果与白光干涉法测量结果基本一致，且基本符合标准厚度片的名义值，表明本文实验装置对于数微米至数十微米级的薄膜厚度测量是重复可靠的，部分误差偏大测量结果可能是由于 PET 薄膜样品的褶皱或者氙灯光源的原始光谱起伏导致。由于当前实验条件所限，实验最大膜厚样片仅约 30 μm，但根据图 3 所示干涉调制信号波形，可测的最大膜厚应当可以达到数百微米量级，目前正在制备相关实验样品。

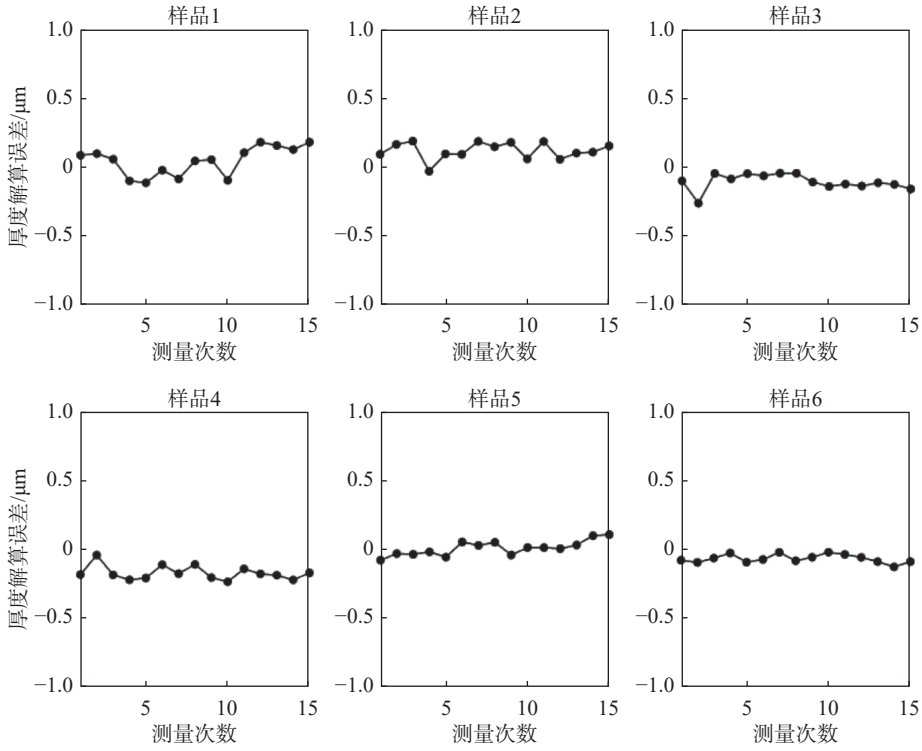


图 7　6 组标准片 15 次随机点膜厚测量的解算误差结果

Fig. 7　Calculation error results of 15 random point film thickness measurements for six standard pieces

表 1　随机点 15 次测量平均值结果

Tab. 1　Film thickness measurement results at 15 random points

μm

标准厚度片	1	2	3	4	5	6
傅里叶相位梯度法	4.605	5.791	9.062	11.965	15.290	28.085
白光干涉法	4.650	5.660	9.160	12.136	15.277	28.124
标准差	0.103	0.068	0.057	0.051	0.052 3	0.063

2.3　硅基镀膜样品测量

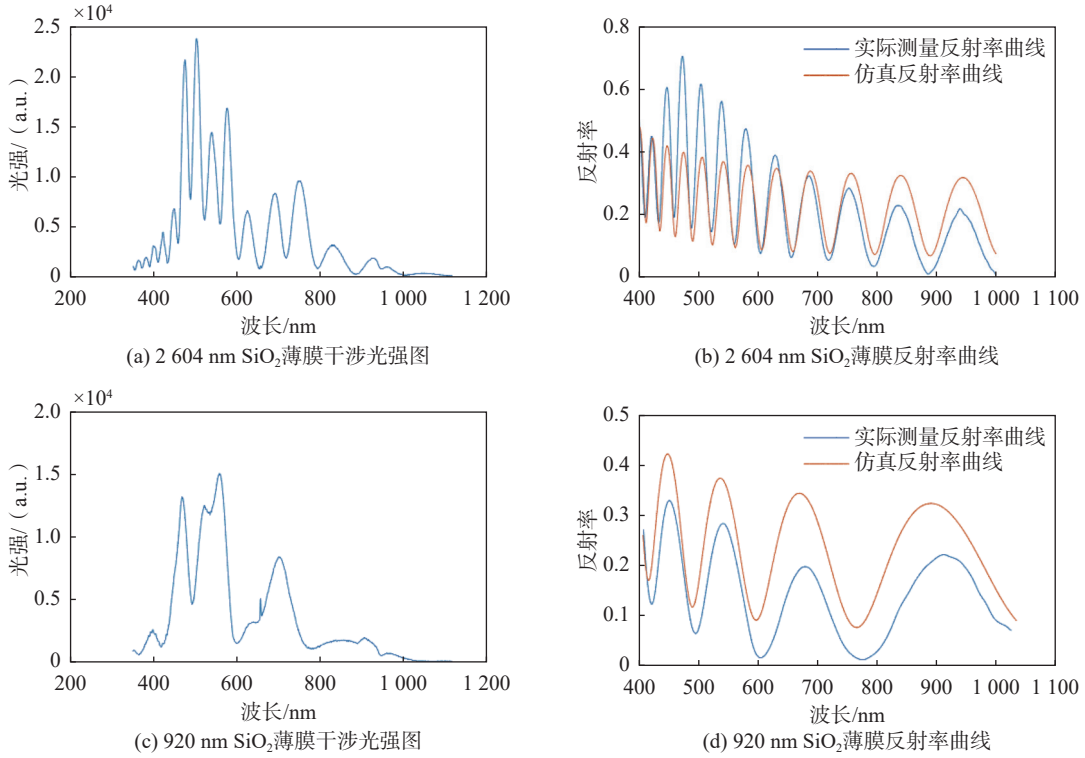
为进一步验证本系统测量较薄厚度膜层的可行性，对硅基薄膜样品进行厚度测量。首先用商业椭偏仪测量了硅基薄膜的厚度，如表 2 所示，结果表明实际制备的薄膜厚度和设计值差异明显。用本文实验系统对这 4 个硅基薄膜样品进行了测量。图 8 所示为本文系统测量 2 604 nm 和 920 nm 硅基 SiO_2 薄膜的干涉光谱信号和反射率光谱信号图。反射率光谱信号的计算过程如下：

表 2　硅基薄膜样品解算厚度结果比较

Tab. 2　Comparison of thickness measurement results for silicon-based thin film samples

nm

样品	椭偏仪膜厚测量结果	本文膜厚测量方法结果
硅基 SiO_2	290	285
	920	925.2
	2 604	2 720.6
硅基Ta_2O_5–SiO_2	179～169	175～165



(a) 2 604 nm SiO_2薄膜干涉光强图　(b) 2 604 nm SiO_2薄膜反射率曲线

(c) 920 nm SiO_2薄膜干涉光强图　(d) 920 nm SiO_2薄膜反射率曲线

图 8　硅基薄膜干涉光强图和反射率曲线

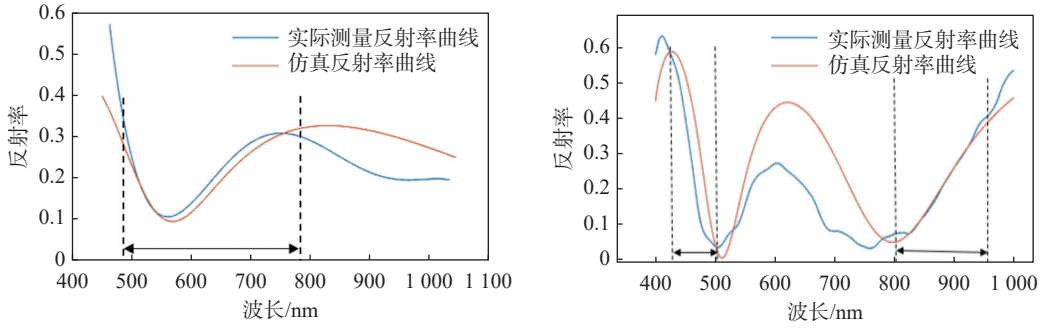
Fig. 8　Silicon-based standard film interferometric intensity and reflectance

在光源被阻断的情况下，先测量背景光谱 I_{bgk}；接着分别测量标准铝反射镜的反射光谱 I_1 和薄膜样品的反射光谱 I_2；再结合厂家提供标准铝镜的实测反射率 R_{ref}，通过式(10)可以计算薄膜结构的绝对反射率 R。获取反射率谱后，对于部分波段反射率分布噪声过大的情况，可以通过多项式拟合进行平滑处理，但必须确保原本波形的准确性。

$$R=\frac{I_2-I_{bgk}}{I_1-I_{bgk}}R_{ref} \tag{10}$$

对于薄膜厚度 2 604 nm 的样品，采用傅里叶相位梯度法，解算的薄膜厚度为 2 720.6 nm。当厚度继续变小到 920 nm 时，傅里叶相位梯度法不再适用，采用极值法，解算的薄膜厚度为 915.2 nm。图 8(b)和(d)中还对比了实测反射率曲线和基于解算的薄膜厚度仿真的反射率曲线，反映了本文膜厚解算的准确性。在测量过程中，受标准镜和实测样品测量操作中反射角度差异，氙灯光源强度波动以及操作方式等多因素影响，会造成测得的反射率曲线存在局部偏大或偏小的情况，但只要实测反射率谱与仿真谱波动趋势重合较好，对应极值点位置差异较小，利用极值法也是可靠的。

当测量厚度更薄的硅基薄膜样品时，反射率谱中不存在明显的两个极值，此时极值波长法难以解算薄膜厚度，如图 9(a)中所示为 290 nm 硅基薄膜的反射率谱曲线。当薄膜结构不是单层膜时，如本文中双层薄膜样品，极值法和相位梯度法也不再适用。针对这些应用场景，本文验证了基于宽谱光源干涉光谱信号采用光谱拟合法来解算膜厚的可行性。根据预知的镀膜膜层参数初始参数，设置折射率，建立膜层材料色散模型，根据薄膜反射率谱计算模型，利用 MATLAB 优化工具箱中的遗传算法(Genetic-Algorithm)进行优化处理，从而得到最接近的薄膜参数。表 2 中显示了这两个样品采用光谱拟合法解算的实验样品的膜厚值和椭偏仪测量值的对比，结果比较接近。图 9(a)显示了模型拟合解算的反射率谱线和实测反射率谱线的对比图，两者相关度较高；由于采用了宽光谱光源，可以更好的确保光谱拟合解算的可靠性。图 9(a)中光谱反射调制波形基本



(a) 290 nm薄膜反射率谱　　(b) Ta_2O_5–SiO_2双层薄膜反射率谱

图 9　硅基薄膜样品实测反射率曲线和光谱拟合曲线

Fig. 9　Measured reflectance curves and simulation curves of silicon-based standard films

包含一个完整周期，因此本文系统所能探测的最薄膜厚应该可以达到数十纳米量级。对于硅基双层薄膜样品，图 9(b)也显示了模型拟合反射率谱和实测谱线具有较好的相关性，证明本文采用宽光谱光源结合光谱拟合法具有较好的可行性。图中虚线部分为本文进行光谱拟合的局部波段。

实验中，理论模型仿真的反射率谱和实测反射率都存在一定的幅值偏差，如图 8 和图 9 所示，这对光谱拟合法膜厚解算精度具有一定的影响。这些偏差的原因主要还是实验装置的光路调节精度和标准铝镜的标准反射率谱数值误差。后续工作将采取设计更为精确的样品调平结构和更精确的标准比对样品等措施来提高测量精度。

3　结　论

基于微型光栅光谱仪的低成本光谱干涉膜厚测量技术在工业膜厚测量中具有广泛的应用前景。本文针对 LED 光源光谱干涉测量膜厚测量范围偏小的缺点，提出了一种利用氙灯的宽光谱特性进行多模式光谱干涉膜厚测量的方法。设计并搭建了一套大量程薄膜厚度光学测量系统；通过对 PET 标准厚度片和硅基 SiO_2 薄膜样品的测量和比对，实际验证了该方法能够实现数十微米厚度到百纳米厚度区间膜厚的准确测量。

根据实验结果分析，本文所提的宽光谱干涉薄膜测量方案的测量范围应该还可以优化，扩大至数十纳米至数百微米的膜厚区间。在接下来的工作中，还可以通过选用更高精度的标准反射率参比镜、设计更高精度的光路调节机构，从而获得更准确的反射率光谱曲线，提升膜厚测量精度。本文研究对于拓展低成本光谱干涉膜厚测量技术的应用范围具有借鉴意义。

参考文献：

[1] 李玉春. 光学薄膜的发展及应用前景 [J]. 黑龙江科技信息, 2017(2): 14 – 15.

[2] 李敏, 何平. 基于 ARM920T 的薄膜厚度在线测量系统设计 [J]. 自动化仪表, 2009, 30(8): 61 – 63.

[3] 李潇潇, 张志恒, 张效宇, 等. 基于像散的光学元件厚度非接触测量研究 [J]. 激光技术, 2019, 43(6): 741 – 746.

[4] 张金旭, 陈家扬, 吴冠豪. 基于光谱干涉椭偏法的薄膜厚度测量 [J]. 计测技术, 2023, 43(1): 122 – 127.

[5] KIM J, KIM K, PAHK H J. Thickness measurement of a transparent thin film using phase change in white-light phase-shift interferometry[J]. Current Optics and Photonics, 2017, 1(5): 505 – 513.

[6] GUO T, ZHAO G H, TANG D W, et al. High-accuracy simultaneous measurement of surface profile and film thickness using line-field white-light dispersive interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 137: 106388.

[7] 刘滢滢, 柯伟平, 董占民, 等. 白光反射谱测薄膜厚度实验 [J]. 仪器仪表标准化与计量, 2008(1): 45 – 46.

[8] 夏志林, 薛亦渝, 赵利, 等. 基于包络线法的薄膜光学常数分析 [J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2003, 25(5): 73 – 76.

[9] 李国龙, 钟景明, 王立惠, 等. 反射光谱拟合法确定聚合物半导体薄膜光学常数和厚度 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 043101.

[10] HLUBINA P, CIPRIAN D, LUŇÁŇEK J, et al.

Dispersive white-light spectral interferometry with absolute phase retrieval to measure thin film[J]. Optics Express, 2006, 14(17): 7678 – 7685.

[11] 牛渊, 张敏, 王俊杰, 等. 基于白光干涉法测量微光栅形貌及相关几何参量的研究 [J]. 光学仪器, 2017, 39(2): 1 – 7.

[12] 荆龙康, 蒋玉蓉, 倪婷. 自适应模拟退火遗传算法在薄膜厚度及光学常数反演中的应用 [J]. 光学技术, 2012, 38(2): 218 – 222.

[13] 刘朝霞, 楚合营, 黄新成, 等. 反射光谱包络线法测量光电薄膜的光学常数和厚度 [J]. 大学物理实验, 2015, 28(3): 11 – 14,31.

[14] 狄韦宇. 晶圆片薄膜光学常数和厚度的反射光谱法测定研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2020.

[15] HAO R, ZHU L L, LI Z X, et al. A miniaturized and fast system for thin film thickness measurement[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7284.

[16] 董所涛. 高精度宽光谱光学膜厚监控系统的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2023.

[17] 刘增力, 徐双, 全海燕, 等. 基于 EMD 自适应滤波的谱分析方法研究 [J]. 昆明理工大学学报 (理工版), 2009, 34(5): 22 – 25.

[18] 张丽娜, 李凤臣, 彭必全, 等. HHT 法的基本原理及其应用探讨 [J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), 2013, 36(4): 419 – 423.

[19] 张晓娟, 乔冠军, 刘汉臣. 多层光学薄膜模拟退火算法的研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3660 – 3664.

[20] 高鹏, 班超, 任少鹏, 等. 一种基于遗传算法的光学薄膜优化设计方法 [J]. 真空, 2021, 58(2): 27 – 30.

（编辑：张　磊）