

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311094

蓝宝石衬底损伤层厚度和折射率的椭偏测量*

崔长彩¹, 李慧慧¹, 陈希¹, 周志豪^{1,2}, 胡中伟¹

(1. 华侨大学制造工程研究院 厦门 361021; 2. 泉州三安半导体科技有限公司晶圆生产部 泉州 362300)

摘要:为了定量测量蓝宝石衬底在化学机械抛光过程中产生的损伤层厚度 d 和折射率 n ,提出了一种光谱椭偏测量法。首先,测量蓝宝石衬底反射光谱(波长范围:250~1 650 nm)偏振态的改变量(即振幅比和相位差);然后,通过光学建模和测量数据反演,获得损伤层 d 和 n 。实验研究了 Al_2O_3 和 SiO_2 两种磨料加工蓝宝石衬底损伤层 d 和 n 的变化趋势,前者 d 呈现波动趋势且最小值(约1.4 nm)出现在40 min左右,后者 d 持续下降,在20 min接近1 nm;二者损伤层 n 均小于蓝宝石晶体 n 。另外,实验和仿真分析结果表明相位差与厚度变化趋势一致,因无需建模反演,可作为快速表征损伤层 d 变化趋势的参量。总之,所提方法作为光学无损测量模式,适用于加工过程监测。

关键词:光谱椭偏;蓝宝石衬底;损伤层;厚度;折射率

中图分类号: TH74

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.30

Ellipsometric measurement of subsurface damaged layer thickness and refractive index of sapphire substrates

Cui Changcai¹, Li Huihui¹, Chen Xi¹, Zhou Zhihao^{1,2}, Hu Zhongwei¹

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Quanzhou Sanan Semiconductor Technology Co., Ltd., Quanzhou 362300, China)

Abstract: To quantitatively measure the thickness d and refractive index n of the damage layer on sapphire substrate produced during chemical mechanical polishing, a spectral ellipsometric method is proposed. First, the change of spectral polarization state (i. e., amplitudes ratio and phases difference) of light (from 250 to 1 650 nm) reflected on sapphire substrate is measured. Then, the thickness and refractive index of damaged layer are extracted by optical modeling and inversion of measured data. The d and n of substrates polished by Al_2O_3 and SiO_2 abrasives are measured. The d of the former fluctuates with the better result about 1.4 nm after 40 min, and the latter continues decreasing with the better result 1 nm after 20 min. The n produced by two abrasives is both smaller than that of sapphire crystal. Meanwhile, the experiment and simulation analysis indicate that the change of phase difference is similar with d , which can be used to quickly evaluate the change of damage layer thickness because of no requirements for modelling and inversion. Therefore, the proposed method can be utilized to monitor the machining process as a nondestructive optical way.

Keywords: spectroscopic ellipsometry; sapphire substrate; damaged layer; thickness; refractive index

0 引言

蓝宝石(sapphire)作为芯片的衬底材料,具有硬度高、化学稳定性高、耐磨性好等优异特性,在高端智能手机、平板电脑、电视等电子显示领域获得较好应用^[1-2]。衬底质量直接影响后续芯片外延层的生长质量,因此,衬

底具有纳米级粗糙度、超平坦且无亚表面损伤是制造高质量芯片的基础^[3]。但是,蓝宝石属于脆性材料,受限材料的本身属性,超精密加工仍面临挑战。晶体切片后在衬底表面和亚表面会留下裂纹、划痕、晶格畸变、位错等缺陷,后续需要经过研磨和抛光等工艺逐步去除损伤并改善衬底的平坦度和表面粗糙度^[4]。化学机械抛光(chemical mechanical polishing, CMP)作为应用最为广泛

收稿日期:2023-02-24 Received Date: 2023-02-24

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(52275531)资助

的超精密加工工序,通过力学-化学耦合作用实现表面反应层的形成和去除^[5],以达到表面超光滑且近无亚表面损伤的质量要求。为获得蓝宝石单晶的镜面效果,有学者讨论了抛光过程中化学机械抛光的必备条件,并提出了相应的抛光机理,获得了表面粗糙度为 2 nm 的蓝宝石单晶表面^[6]。学者们也尝试使用不同的抛光液以优化加工质量并提高加工效率^[7-8]。随着表面缺陷的去除和超光滑表面的形成,表面会产生一层薄薄的损伤层,合理控制加工时间可有效减小损伤层的形成。在加工过程中,深入理解损伤层的形成和去除过程是实现衬底高效高质量 CMP 加工的关键。但因缺乏高精度的表面/亚表面质量无损检测手段,不易连续监测加工质量以及获得较优的加工时间节点。因此,实现 CMP 加工过程中衬底亚表面损伤层的高精度无损检测对判断加工质量、优化加工时间具有重要指导意义,是制造高品质衬底的必然需求。特别是随着蓝宝石衬底尺寸的不断变大,加工工艺的优化将会显著降低生产成本。

损伤层的厚度和折射率是评判晶体加工质量的重要指标。目前,衬底超精密加工后产生的亚表面损伤层,厚度可达纳米级,通常使用透射电镜法进行检测,成本高且效率低^[9],远远不能满足产业上快速无损检测的需求。光谱椭偏(spectroscopic ellipsometry, SE)作为一种无损高精度(厚度灵敏度 0.01 nm)且快速测量(3~10 s)的光学技术,不仅可以获得薄膜厚度,也同时可以获得反映材料属性的光学常数^[10]。蓝宝石作为光学各向异性晶体,可通过 SE 表征获得蓝宝石晶体本身的光学特性^[11]以及双折射值^[12]。折射率作为光学系统中应用最广泛的光学参数之一,对系统的光学性能具有极其重要的影响。厚度与折射率所组成的光学厚度直接影响双折射器件在光学系统中的时延特性^[13]。在获取蓝宝石光学特性的基础上,Losurdo 等^[14]根据伪介电常数,发现蓝宝石衬底表面有 1.3 nm 左右的覆盖层,并指出将蓝宝石作为衬底,研究薄膜特性时,考虑衬底与薄膜之间的界面层将有助于获得较好的拟合结果^[15]。SE 表征衬底损伤的文献中,Wang 等^[16]采用准布儒斯特角法(q brewsters angle technique, qBAT)评估了抛光 CaF₂ 晶体表面和亚表面质量。胡春光等^[17]和 Yao 等^[18]也基于此方法研究粗抛和精抛工艺下光学材料表面/亚表面质量的变化,判断损伤程度。qBAT 法通过准布儒斯特角偏移量和相位角变化斜率以及数据的变化趋势直观地反映了样品表面质量的变化,但对于亚表面损伤层厚度的精确定量还需要进一步建模以及结合材料光学参数的先验知识进行计算。Li 等^[12]通过穆勒矩阵光谱椭偏技术获得了碳化硅晶体的光学特性并定量地表征了碳化硅磨抛衬底亚表面损伤层的厚度^[19-20]。由上可知,使用 SE 定量化表征衬底光学特性以及加工后的亚表面损伤层是可行的。

然而,蓝宝石衬底与其它光学元件的精密加工方式存在差异,且因光学材料的物化特性各异,尤其是蓝宝石的光学各向异性十分微弱,因此,光谱椭偏法在蓝宝石抛光过程中亚表面损伤层的表征策略还有待探索。

本文采用宽光谱椭偏仪测量了 C 面蓝宝石衬底在 CMP 过程中的椭偏光谱。通过光学建模和数值反演获得抛光过程损伤层的厚度和折射率,并提出了相位差作为表征损伤层厚度变化趋势的评价指标,为损伤的快速评价提供了一种有效手段。对比分析了 Al₂O₃ 和 SiO₂ 两种类型的磨料对蓝宝石衬底加工质量的影响。给出了单晶蓝宝石超精密加工过程中亚表面损伤层的变化规律,对制造高质量超光滑的衬底具有指导意义。

1 损伤层光谱椭偏分析

1.1 光谱椭偏测量原理

如图 1 所示,光谱椭偏法通过测量偏振光经样品反射或透射前后 p 光和 s 光的振幅比 Ψ 与相位差 Δ 以得到椭偏参数 ρ ,再建立合适的物理模型构建菲涅尔公式,利用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)迭代算法匹配仪器测量结果和模型拟合结果,进而获取样品厚度和光学常数等参数^[21]。整个过程包括测量-建模-拟合-分析 4 个主要步骤。

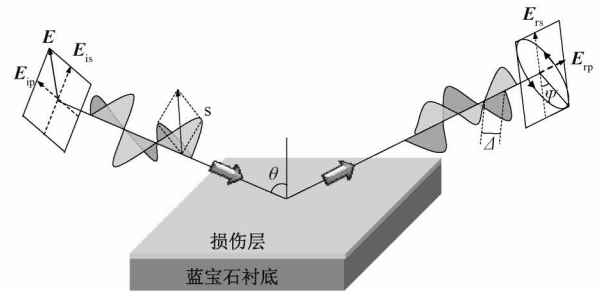


图 1 光谱椭偏测量原理图

Fig. 1 Principle of spectral ellipsometry measurement

通过光谱椭偏法对样件进行测量,所获得的椭偏参数 ρ , 定义为:

$$\rho = \tan(\Psi) e^{i\Delta} = r_p/r_s = (E_{rp}/E_{ip})/(E_{rs}/E_{is}) \quad (1)$$

式中: r_p 和 r_s 为 p 光和 s 光的菲涅尔反射系数, E_p 和 E_s 是 p 光和 s 光的电磁场分量。 Ψ 和 Δ 是待求介质的厚度 d 、复折射率 $\tilde{n} = n + ik$ 、入射波长 λ 和入射角 θ 的函数。如果已知入射光/出射光的偏振态,可以通过菲涅尔公式计算得到介质的厚度和复折射率等参数,这便是椭偏求解介质参数的原理。拟合结果可通过参数均方误差(mean squared error, MSE)进行评价:

$$MSE = \frac{1}{N - m - 1} \sum_{j=1}^N [\rho_{\text{exp}}(\lambda_j) - \rho_{\text{calc}}(\lambda_j)]^2 \quad (2)$$

式中: N 为总的的数据点个数, m 是拟合参数的个数, j 为波长点的个数。exp 和 calc 分别代表测量和拟合的椭偏数据。总体来说, MSE 值越小, 代表测量数据和建模数据相差越小, 意味着拟合效果越好。

1.2 蓝宝石衬底光学层状模型

在整个椭偏分析过程中, 构建合适的物理模型首先决定了能否提取出样件参数。而待求参数(薄膜厚度和复折射率)的初值设定将影响拟合结果的准确性。

用于椭偏分析的 CMP 蓝宝石衬底光学层状物理模型如图 2 所示。蓝宝石为负单轴晶体, 寻常光波(ordinary wave, 简称 o 光)的复折射率 $\tilde{n}_o$ 小于非寻常光波(extraordinary wave, 简称 e 光)的复折射率 $\tilde{n}_e$, 对角化后的介电张量为 $\varepsilon = (\tilde{n}_o, \tilde{n}_o, \tilde{n}_e)$, 沿光轴方向不存在双折射。对于损伤层, 一般为非晶产物^[9], 可等效为各向同性薄膜, 未知参数为折射率 n_{damage} 和厚度 d_{damage} 。在实际建模中, 光学层状模型还将考虑添加等效粗糙层, 如图 2(a) 所示。在椭偏光学建模中, 粗糙层采用等效介质近似(equivalent medium approximation, EMA)模型进行描述, 包含两个参数, 即占空比 f 和等效厚度 d_{EMA} 。当表面粗糙度达到超光滑表面($Sa < 1$ nm), 表面粗糙度的影响可以忽略, 椭偏模型中不考虑粗糙层, 如图 2(b) 所示。

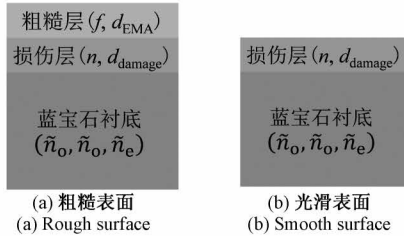


图 2 蓝宝石衬底光学层状模型

Fig. 2 Optical layered model of sapphire substrate

1.3 椭偏光谱响应分析

单晶蓝宝石的带隙值约为 9 eV ^[22], 在近紫外和可见光波段具有极高的光学透过率, 且光学性质十分稳定, 不同研究者们在此波段获得蓝宝石的光学常数基本一致^[23]。因此, 本文将蓝宝石晶体 o 光和 e 光的光学常数设为已知值, 主要讨论损伤层参数的椭偏响应。

为了选择合适的入射角, 同时探究对损伤层参数敏感的椭偏参数。在波长 660 nm 处, 研究了入射角、薄膜厚度和折射率影响下的椭偏参数灵敏度。蓝宝石的布儒斯特角约为 60° , 将入射角设为 60° 和该角前后的 55° 和 65° 参与仿真。设定损伤层厚度变化为 $0 \sim 10 \text{ nm}$ (间隔为 1 nm)。加工过程中, 因水分子的参与, 损伤层的化学成分与蓝宝石不同, 折射率一般小于基体折射率, 设定损伤层折射率变化范围为 $1.2 \sim 1.4$ (间隔为 0.1)。椭偏

参数灵敏度与薄膜参数的相关性通过可视化的 Psi-Delta 轨迹图描述, 如图 3 所示。

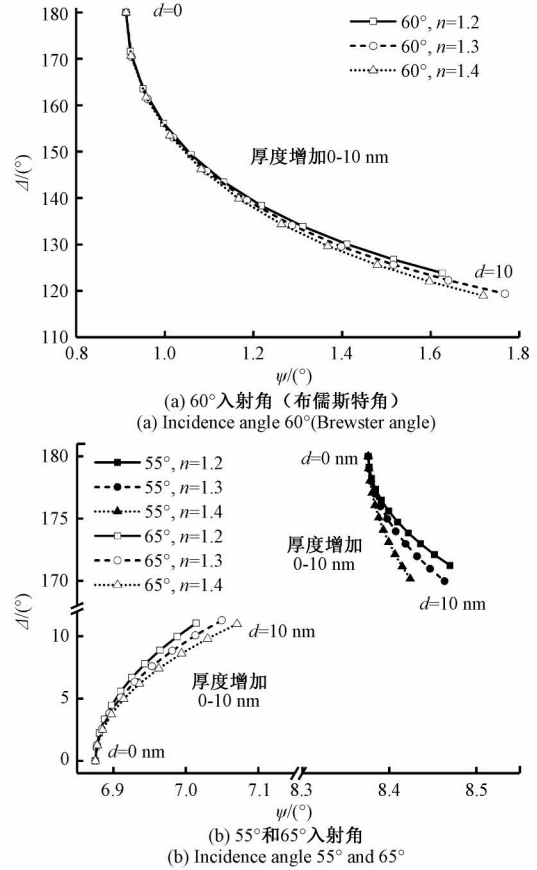


图 3 蓝宝石衬底损伤层光谱响应仿真结果

Fig. 3 Simulation results of spectral response of sapphire substrate damage layer

根据仿真结果, 对于因厚度变化引起的椭偏响应, 在 3 个入射角下, Δ 数值的变化量远大于 Ψ 数值的变化量。例如, 损伤层厚度从 5 nm 增加到 6 nm 时 ($n=1.2$), 55° 、 60° (布儒斯特角) 和 65° 入射角下, Δ 变化量达到 0.88° 、 5.13° 和 1.11° , 而 Ψ 的变化量为 0.01° 、 0.08° 和 0.01° 。

对于折射率变化引起的椭偏响应, 因所设定的损伤层厚度属于超薄膜范畴, 3 个入射角下 Δ 数值对折射率的微弱变化几乎无响应。相比而言, Ψ 数值的变化量略大于 Δ 数值的变化量。

由以上分析可知, Δ 参数可作为损伤层相对厚度变化的评判指标。 Ψ 参数变化量十分微弱且同时受到折射率和厚度的影响, 因此不适用于损伤层参数评价。

由数据可知, 采用布儒斯特角附近的角作为入射角, 椭偏参数对薄膜厚度和折射率的敏感性基本相当。入射角为布儒斯特角时, 椭偏参数的敏感性最高, 但是, 此角度下入射角测量的误差会显著影响拟合结果^[24]。

实际分析时不选择此角度下的数据参与拟合。考虑到椭圆偏仪在 65° 入射角参与校正, 测量中选取 65° 下的椭圆偏数据参与拟合。此角度下, Δ 数值的增加反映了薄膜厚度的相对增加; Ψ 数值的增加反映了厚度和折射率的相对增加。需要注意的是, 将表面粗糙度等效为粗糙层时, Δ 同样对粗糙层的厚度具有敏感性。因此, Δ 的变化综合反映了损伤层厚度和表面质量的变化。

2 蓝宝石衬底光谱椭圆偏测量实验

2.1 蓝宝石衬底样品

蓝宝石衬底来自福建三安光电有限公司, 晶向为 C 向, 尺寸为 4 英寸, 厚度为 $660 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$ 。衬底经单面铜抛后, 分别以 Al_2O_3 和 SiO_2 为磨料, 采用单面 CMP 的加工方式进行抛光加工实验。在加工过程中, 分 8 个时间节点随机抽取每盘中两个样品分析, 抽取的时间节点为 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 和 120 min。整个抛光过程一共抽取两组 16 个样品, 对其进行椭圆偏光谱测量。

2.2 光谱椭圆偏测量结果

采用双旋转型穆勒矩阵椭圆偏仪 (ME-L, 武汉颐光科技有限公司) 对样品测量, 得到样品的椭圆偏光谱, 光谱范围为 250~1650 nm。对于 C 向晶体, 光轴始终与晶面垂直。因此, 在椭圆偏测量时入射面始终与光轴平行, 欧拉角为 $(0, 0, 0)$, p 光和 s 光不发生交叉极化, 穆勒矩阵的辅对角线始终为 0。此时, 穆勒矩阵相比琼斯矩阵不能提供更多的样件信息。

图 4(a) 和 (b) 分别为采用 Al_2O_3 和 SiO_2 作为抛光磨料加工蓝宝石衬底, 测量每片衬底中心点位置所得到的椭圆偏光谱随加工时间的变化。

考虑到单波长下测量结果受光谱稳定性和测量误差的影响较大, 为了定量地从椭圆偏光谱中提取椭圆偏参数的变化趋势, 采用可见光波段 400~500 nm 椭圆偏参数各波长下的平均值作为参考指标。得到在两种磨料加工下, 椭圆参数 Ψ 和 Δ 平均值随加工时间的变化趋势, 如图 5 所示。图 5 为两组衬底的表征结果, 并同时给出了

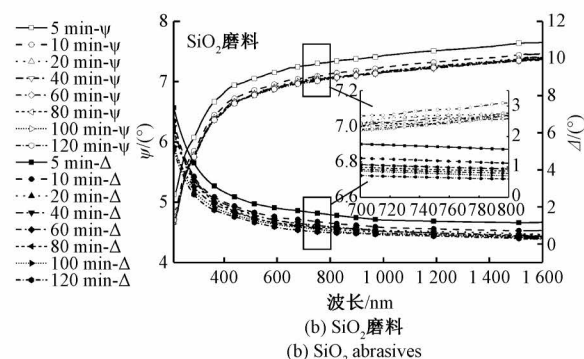
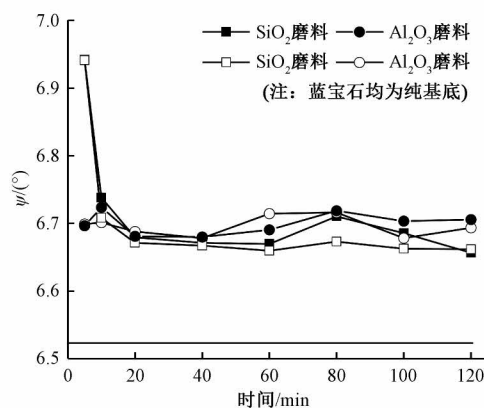
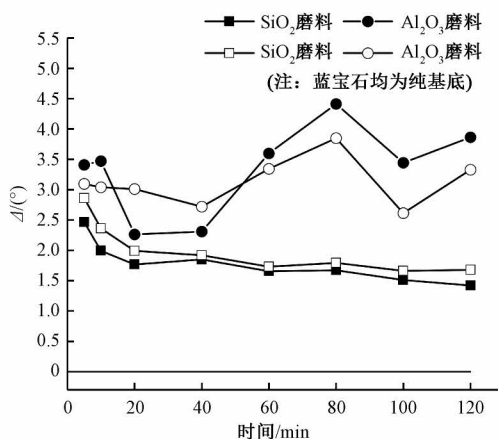


图 4 抛光过程衬底椭圆偏测量光谱

Fig. 4 Ellipsometry measurement spectra in the process of polishing



(a) 椭圆参数Psi随加工时间的变化趋势
(a) Variation trend of ellipsometric parameter Psi with processing time



(b) 椭圆参数Delta随加工时间的变化趋势
(b) Variation trend of ellipsometric parameter Delta with processing time

图 5 两种磨料加工蓝宝石衬底时椭圆偏参数变化趋势
Fig. 5 Variation trend of ellipticity parameters of sapphire substrate processed with Al_2O_3 and SiO_2 abrasives

400~500 nm 波长下, 蓝宝石基体上无任何膜层 (无损伤的纯蓝宝石衬底) 的椭圆偏参数参考值 (Ψ 的平均值为 6.52, Δ 的平均值为 0)。

由图 5 可以看出,同一种抛光磨料下的两组衬底数据,椭偏参数的变化趋势表明实验结果具有较好的一致性。其差异受多种因素综合影响,如加工留下的样品表面质量差异、椭偏测量的随机误差等。

由 1.3 仿真结果可知, Ψ 的变化反映了损伤层折射率和厚度的变化趋势。采用 Al_2O_3 作为磨料加工蓝宝石衬底,明显存在 4 个变化阶段,即缓慢下降阶段(5~40 min),上升阶段(40~80 min),下降阶段(80~100 min),最后上升阶段(100~120 min)。采用 SiO_2 作为磨料加工蓝宝石衬底,整体上存在两个阶段,即急速下降阶段(0~20 min)和缓慢下降阶段(20~120 min)。总体上, Ψ 的变化量较小,加工 20 min 后,整体变化量不超过 0.05° 。

在 65° 入射角下,蓝宝石衬底上若无任何膜层, Δ 数值为 0。采用 Al_2O_3 作为磨料加工蓝宝石衬底, Δ 的变化趋势与 Ψ 基本一致,在 40 和 100 min 处数值相对较小。采用 SiO_2 作为磨料加工蓝宝石衬底,存在二个阶段,即急速下降阶段(0~20 min)和缓慢下降阶段(20~120 min),20 min 后的 Δ 值变化不超过 0.5° 。由此可见采用 Al_2O_3 作为磨料的较优加工时长为 40 min 或者 100 min;采用 SiO_2 作为磨料加工,仅考虑损伤层的厚度变化,较优加工时长应不小于 20 min 才能满足加工需求。

3 结果与分析

3.1 蓝宝石衬底的加工

采用 3D 光学轮廓仪(ZYGO NewView 7300,美国翟柯公司)跟踪测量 CMP 加工蓝宝石衬底的表面粗糙度(S_a),其中, Al_2O_3 作为磨料,衬底初始 $S_a = 10.4 \text{ nm}$, SiO_2 作为磨料,衬底初始 $S_a = 11.5 \text{ nm}$ 。加工过程表面粗糙度变化如表 1 所示。采用 Al_2O_3 作为磨料加工,表面粗糙度很快减小,5 min 以后整个加工过程粗糙度没有变化,粗糙度值始终为 0.3 nm 。采用 SiO_2 作为磨料加工,表面粗糙度也很快减小,加工时长为 5 min 时粗糙度为 1.6 nm ,加工时长为 10 min 时粗糙度增加到 3.2 nm ,之后随着加工时长的增加,粗糙度逐渐减小至 0.2 nm 。

表 1 蓝宝石衬底 CMP 过程表面粗糙度变化情况

Table 1 Surface roughness variation of sapphire substrate during CMP process

时间/min	5	10	20	40	60	80	100	120
$S_a\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{nm}$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$S_a\text{-SiO}_2/\text{nm}$	1.6	3.2	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2

抽取加工 5 和 120 min 的衬底表面形貌图,如图 6 所示。可以看出,采用 Al_2O_3 作为磨料加工,加工初期(时

长 5 min)已达到亚纳米级表面粗糙度,随着加工时长的增加,始终保持优异的表面质量。采用 SiO_2 作为磨料加工,加工初期衬底表面还存在一些表面划痕,表面粗糙度下降相对较慢,20 min 后达到亚纳米级表面粗糙度。

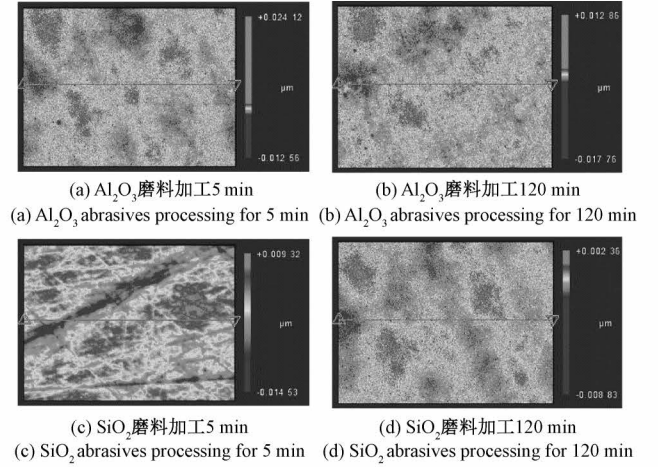


图 6 两种磨料加工蓝宝石衬底后表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of sapphire substrates processed by two abrasives

椭偏光学建模时,当衬底表面粗糙度达到亚纳米级别时,模型中可考虑不添加粗糙层。因此,仅在 SiO_2 作为磨料加工下,加工 5 和 10 min 的数据拟合时添加粗糙层,粗糙层的厚度设为测量得到的表面粗糙度值,占空比设为 50%。由此可知,粗糙层的添加并不会为整个光学模型带来更多的未知拟合参数。

3.2 CMP 加工蓝宝石衬底后亚表面损伤

在建模阶段,所测波段范围内的蓝宝石晶体不存在吸收,因此不考虑光学常数中的消光系数 k 。采用 Cauchy 色散模型描述损伤层,其折射率的表达式为:

$$n_{\text{damage}}^2(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (3)$$

其中, A 和 B 为拟合参数,波长为 λ ,单位为 μm^2 。在拟合阶段,采用 LM 算法对椭偏测量数据进行数值反演,以此得到介质的待求物理参数。最终,拟合得到采用两种抛光磨料抛光衬底,加工过程损伤层厚度和折射率的变化趋势如图 7 所示。

从图 7(a)中可以看出,采用 Al_2O_3 作为磨料较优的加工时长为 40 min,此时损伤层厚度达到相对最小值 $1.4 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ nm}$ 。采用 SiO_2 作为磨料加工 20 min 后,加工效率明显下降,损伤层厚度逐渐趋于平稳,并在 100~120 min 时达到最小,为 $0.9 \text{ nm} \pm 0.1 \text{ nm}$ 。综合考虑到加工效率和加工质量,较优的加工时长在 20~40 min 之间。

总体上,采用 Al_2O_3 作为磨料加工后的损伤层厚度大于采用 SiO_2 作为磨料加工的损伤层厚度。损伤层厚

度拟合结果与 Δ 值的变化趋势(图 5(b)) 基本一致。即衬底经 Al_2O_3 作为磨料加工得到的 Δ 值高于经 SiO_2 作为磨料加工得到的 Δ 值。由此表明,在大于布儒斯特角的入射角度下,较高的 Δ 值表明损伤层的厚度相对较大。因此,可见光指定光谱波段 Δ 平均值,可作为快速评价损伤相对变化趋势的指标,为衬底损伤的评价提供一种有效手段。

图 7(b) 为波长 660 nm 处损伤层的折射率。蓝宝石 α 光折射率在此波长下为 1.771。从图 7(b) 中可以看出,采用 Al_2O_3 作为磨料和 SiO_2 作为磨料加工损伤层折射率的变化量小于 0.4,表明加工过程中的损伤层的化学产物产生了微弱变化,并于加工后期趋于稳定。

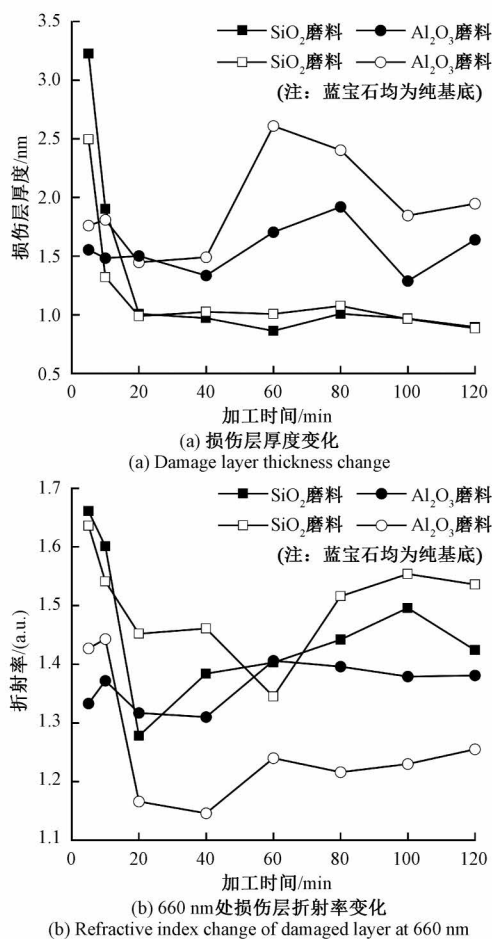


图 7 CMP 加工过程损伤层参数变化趋势

Fig. 7 Change trend of damage layer parameters during CMP processing

4 结 论

基于光谱椭偏技术,获得了 CMP 加工过程蓝宝石衬底的亚表面损伤参数。结果表明,根据椭偏参数 Delta 值的相对大小,可对加工时长进行优化选择。可见光某光

谱波段 Delta 平均值可以快速评价损伤变化趋势。

光谱椭偏分析结果表明,CMP 加工过程中,采用 Al_2O_3 作为磨料加工蓝宝石衬底能够迅速获得超光滑表面。采用 SiO_2 作为磨料加工蓝宝石衬底,加工前期衬底存在表面划痕,加工质量随加工时长逐步提升,加工过程中损伤层厚度均小于 Al_2O_3 作为磨料加工后的损伤层厚度。折射率的变化表明,在加工后期,损伤层的化学产物变化较大。

根据表征结果,采用 Al_2O_3 作为磨料加工蓝宝石衬底较优的加工时长为 40 min,采用 SiO_2 作为磨料加工蓝宝石衬底较优的加工时长为 20~40 min。CMP 加工产生的亚表面损伤层折射率均小于蓝宝石晶体的折射率,加工后衬底表面仍残留纳米级的损伤层。

参考文献

- [1] JUNG I, SONG S, CHOI M, et al. Evolution of mechanically formed bow due to surface waviness and residual stress difference on sapphire (0001) substrate[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 269: 102-108.
- [2] KHATTAK C P, SHETTY R, SCHWERTFEGER C R, et al. World's largest sapphire for many applications[J]. Journal of Crystal Growth, 2016, 452: 44-48.
- [3] ZHOU Y, PAN G SH, GONG H, et al. Characterization of sapphire chemical mechanical polishing performances using silica with different sizes and their removal mechanisms[J]. Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 513: 153-159.
- [4] 尹韶辉,王永强,李叶鹏,等. 蓝宝石基片的磁流变化学抛光试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 80-87.
- [5] 甘阳,张飞虎. 单晶碳化硅和蓝宝石基片化学机械抛光的表面反应层形成机制的研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(36): 3930-3939.
- [6] GAN Y, ZHANG F H. Review on formation mechanism of chemical reaction layer during chemical mechanical polishing of monocrystalline SiC and sapphire substrates[J]. Science China Press, 2016, 61(36): 3930-3939.
- [7] 袁巨龙,崔丽芬,张如源,等. 蓝宝石单晶纳米加工技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(1): 187-192.
- [8] YUAN J L, CUI L F, ZHANG R Y, et al. Research on nanoprocessing technology of sapphire single crystal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1995, 16(1): 187-192.

- [7] ZHANG ZH Y, LIU J, HU W, et al. Chemical mechanical polishing for sapphire wafers using a developed slurry [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 62: 762-771.
- [8] WANG X, LEI H, CHEN R L. CMP behavior of alumina/metatitanic acid core-shell abrasives on sapphire substrates[J]. *Precision Engineering*, 2017, 50: 263-268.
- [9] LUO Q F, LU J, XU X P, et al. Removal mechanism of sapphire substrates (0001, 110 and 100) in mechanical planarization machining [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(18): 16178-16184.
- [10] FUJIWARA H. *Spectroscopic ellipsometry: Principles and applications* [M]. Ibaraki: John Wiley & Sons, 2007.
- [11] YANG J Y, ZHANG W J, LIU L H. Anisotropic dielectric functions of (0001) sapphire from spectroscopic ellipsometry and first-principles study[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2015, 473: 35-41.
- [12] LI H H, CUI CH C, BIAN S B, et al. Model-free determination of the birefringence and dichroism in c-cut crystals from transmission ellipsometry measurements [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(7): 2192-2200.
- [13] 陈恺, 祝连庆, 刘昭君, 等. 基于光纤激光频率分裂效应的折射率/厚度双参量测量研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(11): 27-34.
- CHEN K, ZHU L Q, LIU ZH J, et al. Measurement of refractive index and thickness based on the fiber laser frequency splitting effect [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(11): 27-34.
- [14] LOSURDO M, CAPEZZUTO P, BRUNO G. Plasma cleaning and nitridation of sapphire ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) surfaces: New evidence from in-situ real time ellipsometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(4): 2138-2145.
- [15] SONG B K, GU H G, FANG M SH, et al. Layer-dependent dielectric function of wafer-scale 2D MoS₂ [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(2): 1801250.
- [16] WANG J, MAIER R L. Surface assessment of CaF₂ deep-ultraviolet and vacuum-ultraviolet optical components by the quasi-Brewster angle technique [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5621-5628.
- [17] 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 CH G, SUN ZH Y, FANG Z X, 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.
- [18] YAO CH Y, HUO SH CH, SHEN W F, et al. Assessing the quality of polished brittle optical crystal using quasi-Brewster angle technique [J]. *Precision Engineering*, 2021, 72: 184-191.
- [19] LI H H, CUI CH C, BIAN S B, et al. Double-sided and single-sided polished 6H-SiC wafers with subsurface damage layer studied by mueller matrix ellipsometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(23): 235304.
- [20] LI H H, CUI CH C, LU J, et al. Mueller matrix ellipsometric characterization of nanoscale subsurface damage of 4H-SiC wafers: From grinding to CMP [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 9: 820637.
- [21] 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 X D, ZHANG R J, ZHENG Y X, et al. Spectroscopic ellipsometry and its applications in the study of thin film materials [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1195-1234.
- [22] HARMAN A K, NINOMIYA S, ADACHI S. Optical constants of sapphire ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) single crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(12): 8032-8036.
- [23] YAO H, YAN C H. Anisotropic optical responses of sapphire ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) single crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(9): 6717-6722.
- [24] AZZAM R M A, BASHARA N M. *Ellipsometry and polarized light* [M]. New York: North-Holland-Publishing Company, 1977.

作者简介



崔长彩(通信作者), 1996年于黑龙江省佳木斯大学获得学士学位, 2000年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为华侨大学制造工程研究院教授, 主要研究方向为半导体薄膜光电特性及几何特征测量方法与表征、超硬磨料磨具形貌测量和表征、机器人加工中的测试和控制技术、现代智能优化算法原理及应用。

E-mail: cuicbc@hqu.edu.cn

Cui Changcai (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Jiamusi University in 1996, received her M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2000, and received her Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2003. She is currently a professor at Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University. Her main research interests include measurement and characterisation of optoelectronic properties geometrical features of semiconductor thin films, measurement and characterisation of surface morphology of abrasives tools, testing and control technology in robot processing and principles and applications of modern intelligent optimisation algorithms.