

激光与光电子学进展

基于光学散射仪的 T 型相变存储器三维形貌参数测量

董正琼, 袁顺, 李晨阳, 唐少康, 聂磊*

湖北工业大学机械工程学院现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068

摘要 T 型相变存储器的低功耗、非易失性、高存储密度和高可靠性等优势使其被国际半导体工业协会认为是下一代半导体存储器的主流产品之一。为了保证 T 型相变存储器制造工艺的可控性, 提出了一种基于光学散射的纳米结构三维形貌参数测量方法。基于严格耦合波分析方法建立了 T 型相变存储器的光学特性模型。分析了待测样品上椭圆偏振光的振幅和相位变化量。用逆散射问题反演求解待测纳米结构的三维形貌参数等信息。利用光学散射仪对 T 型相变存储器的三维形貌参数进行测量, 并将待测参数的提取结果与扫描电子显微镜的测量结果进行对比, 验证了光学散射仪在 T 型相变存储器形貌表征及制造工艺监控上的可行性与有效性。

关键词 散射; 纳米结构; 光学散射仪; T 型相变存储器; 三维形貌参数

中图分类号 TH744

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1929001

Three-Dimensional Morphology Parameters Measurement of T-Type Phase Change Random Access Memory Based on Optical Scatterometry

Dong Zhengqiong, Yuan Shun, Li Chenyang, Tang Shaokang, Nie Lei*

Hubei Key Laboratory of Manufacture Quality Engineering, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China

Abstract T-type phase change memory has the advantages of low power consumption, non-volatility, high storage density and high reliability, so it is considered by the International Semiconductor Industry Association to be one of the mainstream products of the next generation semiconductor memory. In order to ensure the controllability of the manufacturing process of T-type phase change memory, a method for measuring three-dimensional morphology parameters of nanostructures based on optical scattering is proposed in this paper. The optical characteristic model of T-type phase change memory is established based on the rigorous coupled wave analysis method. The amplitude and phase change of elliptically polarized light on the sample to be measured are analyzed. The inverse scattering problem is used to solve the three-dimensional morphology parameters of the nanostructures to be measured. The three-dimensional morphology parameters of T-type phase change memory are measured by optical scatterometer, and the extraction results of the parameters to be measured are compared with those of scanning electron microscope. The feasibility and effectiveness of optical scatterometer in T-type phase change memory morphology characterization and manufacturing process monitoring are verified.

Key words scattering; nanostructure; optical scatterometry; T-type phase change random access memory; three-dimensional morphology parameters

1 引言

相变存储器(PCRAM)被人们广泛认为具有成为下一代高密度、非易失性存储器的潜力^[1-3]。PCRAM中每一个比特位对应的PCRAM单元形貌结构参数都会直接影响最终的芯片性能^[4]。目前,相关人员设计

了许多具有不同形貌特征的PCRAM单元^[5-7],其中,T型结构最为常见。每个T型PCRAM单元中,其关键尺寸(CD)和第一层锗、锑、碲合成材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$ (GST)孔的深度等形貌参数在很大程度上决定了该单元的电流密度和热分布能力,进而影响器件的相态转换效率。为了保证T型PCRAM制造工艺的可控

收稿日期: 2021-08-28; 修回日期: 2021-09-29; 录用日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51975191)、湖北省教育厅重点项目(D20201401)

通信作者: *leimie@hbut.edu.cn

性,在规模化制造过程中对其三维形貌参数的快速、无损、精确在线测量尤为关键^[8]。

传统半导体器件的三维形貌测量中,原子力显微镜(AFM)利用原子之间的范德华力作用呈现样品的表面特性、形貌信息等,检测分辨率可以达到亚纳米级。作为一种接触式测量方式,AFM的高硬度针尖容易导致待测样品表面出现破坏性划伤。作为一种逐点扫描方式,AFM存在测量周期长、测量效率较低的问题^[9]。扫描隧道显微镜(STM)先对待测样品表面进行电子束轰击,通过分析两者相互作用产生的二次电子、背散射电子实现亚纳米级的检测分辨率,但STM只能在真空环境中测量且电子束的轰击可能会破坏样品^[10-11]。近场光学显微镜(NFOM)虽然能满足十分之一入射波长($\lambda/10$)及其以下的空间分辨率,但该方法只能表征样品的表面形貌且效率较低^[12-13]。以光学散射仪(Optical scatterometry)为代表的非干涉型远场测量技术具有非接触、无损伤等优势,近年来在薄膜厚度以及亚波长线条光栅的测量表征中得到了人们的广泛关注^[14-16]。

光学散射仪本质上是一台椭圆偏仪,通过分析光入射到样品表面前后偏振态的变化,同时利用光学模型拟合算法获取光学常数以及待测结构的关键尺寸等形貌信息,是一种间接且快速的测量方法^[17-18]。本文利用光学散射仪获取T型PCRAM单元的形貌参数,且提取的参数与扫描电子显微镜(SEM)的测量结果具有较高的一

致性,验证了将光学散射仪运用在T型PCRAM形貌表征及制造工艺监控上的可行性与有效性。

2 测量方法

光学散射测量方法的基本原理:首先,根据电磁场与待测纳米结构之间的相互作用机理、已知的光学入射条件(包括入射角、入射波长、方位角等参数)和样品信息(包括几何形貌参数、材料光学常数等参数),采用电磁场建模理论计算待测样品的光学特性(振幅比和相位差)^[19];然后,利用测量仪器获取待测样品的实际测量光谱数据;最后,用逆向求解算法将光学特性模型计算的光谱与仪器测量的光谱进行拟合,反演样品的待测形貌参数^[20]。

针对呈周期性排布的T型PCRAM单元三维形貌参数测量需求:首先,采用严格耦合波分析(RCWA)方法对样品进行光学特性正向建模^[21],在给定的样品三维形貌参数、材料光学常数(折射率 n 和消光系数 k)和测量条件配置(入射波长 λ 、入射倾斜角 θ 和方位角 φ 等参数)下,仿真计算该条件对应的理论斯托克斯参量^[22-23];然后,利用列文伯格-麦夸特(LM)非线性回归优化算法将上述理论模型计算的光谱与仪器测量光谱进行拟合,进而实现光学散射测量中的纳米结构待测参数逆向求解^[24-26]。基于LM算法的样品待测参数提取过程如图1所示。

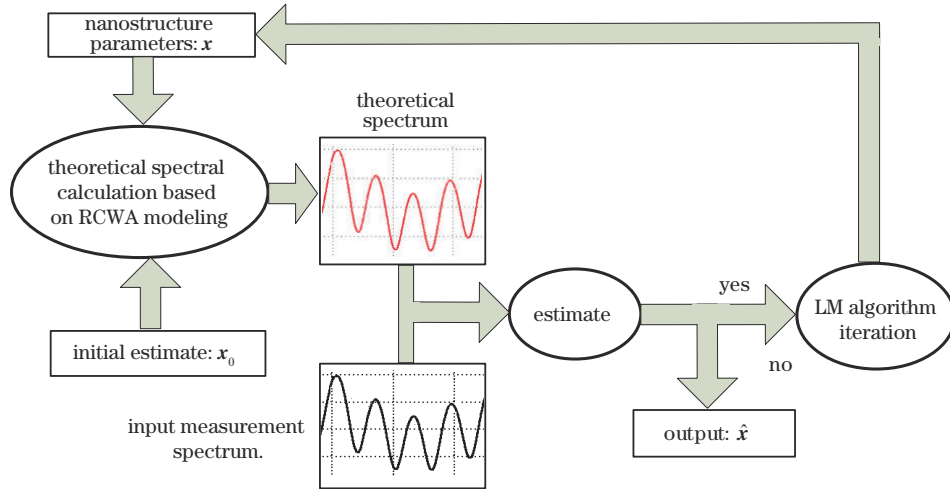


图1 基于LM算法的样品待测参数提取过程

Fig. 1 Extraction process of sample parameters to be measured based on LM algorithm

不失一般性,先将待测纳米结构的形貌参数表示为 $x=[x_1, \dots, x_n]^T$ 。其中, x_1, \dots, x_n 为线宽、侧壁角、线高等三维形貌参数。用斯托克斯参量 S_1 、 S_2 和 S_3 作为理论正向模型的输出光谱,可表示为

$$\begin{cases} S_1 = \cos(2\Psi) \\ S_2 = \sin(2\Psi) \times \cos(\Delta), \\ S_3 = \sin(2\Psi) \times \sin(\Delta) \end{cases} \quad (1)$$

式中, Ψ 和 Δ 分别为入射光波反射前后零级衍射光的

椭圆参数振幅比和相位差,均可利用RCWA方法仿真得到。正向计算时的输入信息包括T型PCRAM结构的几何形貌参数、材料的光学常数以及入射角、波长和方位角等仿真参数。

将光谱椭圆偏仪测量T型PCRAM样品获取的斯托克斯参量分别记为 S_1' 、 S_2' 和 S_3' ,在待测参数的逆向迭代提取过程中,需要根据斯托克斯参数测量光谱与理论仿真结果的一致性评价函数值并调整待测形貌参数的仿真输入值,二者之间的拟合误差可用卡方分布 χ^2

表示为

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^K \left[\frac{(S_{1k} - S_{1k}')^2}{\sigma_{1k}^2} + \frac{(S_{2k} - S_{2k}')^2}{\sigma_{2k}^2} + \frac{(S_{3k} - S_{3k}')^2}{\sigma_{3k}^2} \right], \quad (2)$$

式中: K 为光谱点的总数目; k 为光谱点索引; σ_{1k}^2 、 σ_{2k}^2 和 σ_{3k}^2 分别为斯托克斯 3 个分量的测量标准差, 将其倒数

定义为拟合权值因子。

利用 LM 优化算法提取纳米结构的待测参数时, 先根据先验信息设定一组参数迭代初值 x_0 , 再利用 RCWA 方法建立的光学特性模型计算斯托克斯参量的理论光谱, 然后根据式(2)描述的评价函数将其与仪器测量光谱进行拟合。用均方根误差(MSE)量化测量光谱与理论模型计算光谱之间的匹配程度, MSE 可表示为

$$X_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{3n - m} \sum_{k=1}^n [(S_{1k} - S_{1k}')^2 + (S_{2k} - S_{2k}')^2 + (S_{3k} - S_{3k}')^2]} \times 1000, \quad (3)$$

式中: n 为测量光谱的点数; m 为待拟合参数的数量。MSE 越小, 表明光谱数据的匹配程度越高, 当达到最佳匹配(MSE 最小)时, 即可提取出待测形貌参数的输

出结果^[27], 从而将 T 型 PCRAM 三维形貌光学散射测量中的逆问题描述为

$$\hat{x} = \underset{x \in \Omega}{\operatorname{argmin}} (\chi^2) = \underset{x \in \Omega}{\operatorname{argmin}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left[\frac{(S_{1k} - S_{1k}')^2}{\sigma_{1k}^2} + \frac{(S_{2k} - S_{2k}')^2}{\sigma_{2k}^2} + \frac{(S_{3k} - S_{3k}')^2}{\sigma_{3k}^2} \right] \right\}, \quad (4)$$

式中: \hat{x} 为纳米结构的形貌参数提取结果; Ω 为取值范围。

3 实验设计

3.1 实验仪器及样件描述

实验使用的测量仪器是一台双旋转补偿器 Mueller 矩阵椭偏仪, 其基本原理和实物图如图 2 所示。其中, 旋转补偿器 1 和旋转补偿器 2 以相同的基频 ω 同步旋转(二者的转速比 $\omega_1 : \omega_2 = 5 : 3$)。出射光对应的斯托克斯向量 S_{out} ^[28] 可表示为

$$S_{\text{out}} = [M_A R(A)] \cdot [R(-C_2) M_{C_2}(\delta_2) R(C_2)] \cdot M_S \cdot [R(-C_1) M_{C_1}(\delta_1) R(C_1)] \cdot [R(-P) M_P] \cdot S_{\text{in}}, \quad (5)$$

式中: M_P 和 M_A 分别为描述起偏器和检偏器的矩阵; $M_{C_1}(\delta_1)$ 和 $M_{C_2}(\delta_2)$ 分别为描述旋转补偿器 1 和旋转补

偿器 2 的矩阵; M_S 为描述待测样品的 Mueller 矩阵; S_{in} 为入射光对应的斯托克斯向量。计算波片对入射光的作用时, 需要先给出入射光斯托克斯向量在波片局部坐标系中的定义(与 $R(C_1)$ 相乘), 经过波片后光的斯托克斯向量需要转化为全局坐标系中的表示方式(与 $R(-C_1)$ 相乘)。 $R(\alpha)$ 为描述相应元器件的旋转矩阵: 当 α 为 P 和 A 时, 表示入射面与起偏和检偏器透光轴之间的夹角; 当 α 为 C_1 和 C_2 时, 表示入射面与旋转补偿器 1 和旋转补偿器 2 快轴的夹角, 且 $C_1 = 5(\omega t - C_{S1})$ 和 $C_2 = 3(\omega t - C_{S2})$ 。 C_{S1} 和 C_{S2} 分别表示两个补偿器在 $t=0$ 时的快轴方位角, δ_1 和 δ_2 分别为补偿器 1 和旋转补偿器 2 的相位延迟量。对式(5)进行展开, 得到出射光束的光强为

$$I(t) = I_{00} M_{11} \left\{ a_0 + \sum_{n=1}^{16} [a_{2n} \cos(2n\omega t - \phi_{2n}) + b_{2n} \sin(2n\omega t - \phi_{2n})] \right\} = I_0 \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{16} [\alpha_{2n} \cos(2n\omega t - \phi_{2n}) + \beta_{2n} \sin(2n\omega t - \phi_{2n})] \right\}, \quad (6)$$

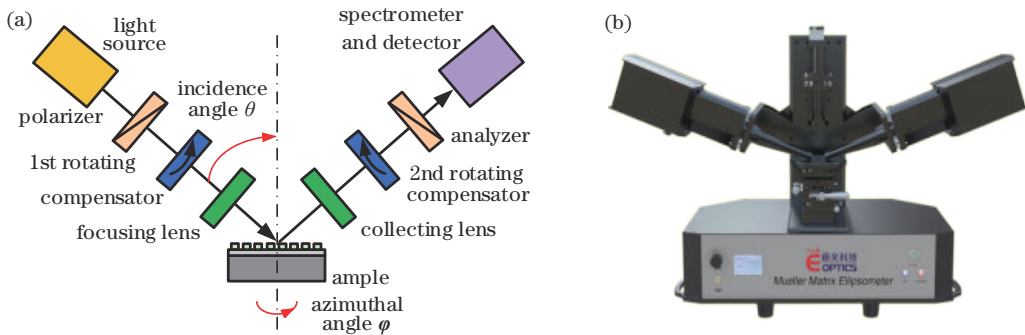


图 2 椭偏仪的基本原理及实物图。(a)基本原理;(b)实物图

Fig. 2 Basic principle and physical map of the ellipsometer. (a) Basic principle; (b) physical map

式中： I_{00} 为光谱响应函数； M_{11} 为样品相应 Mueller 矩阵的第一个元素； ϕ_{2n} 为相位，可通过 C_{s1} 和 C_{s2} 计算； $I_0 = I_{00} M_{11} a_0$ ， $\alpha_{2n} = a_{2n} / a_0$ 为直流分量； $\beta_{2n} = b_{2n} / b_0$ 为归一化的交流分量。获得谐波系数 α_{2n} 和 β_{2n} 后，根据 Hadamard 分析方法从谐波系数 $\{I_0, \alpha_{2n}, \beta_{2n}\}$ 中得到样品相应的 Mueller 矩阵元素 $M_{ij} (i, j = 1, 2, 3, 4)$ ， M_{ij} 实际是 α_{2n} 和 β_{2n} 的线性组合，根据 M_{ij} 进一步得到斯托克斯向量。实验采用的入射光波长范围为 400~1600 nm，入射角为 65° ，方位角为 0° 。

存储器中的全功能 PCRAM 芯片主要包括 PCRAM 阵列、输入/输出缓冲区、读数电路、写入电路、字线译码器、位线译码器以及逻辑控制电路，如图 3(a) 所示。T 型 PCRAM 单元阵列是 PCRAM 芯片最为核心的部分，其结构如图 3(b) 所示。其中， Λ_x 和 Λ_y 分别为 x 和 y 方向的周期。一个 PCRAM 单元阵列

包含数以百万计的独立结构单元，每个独立的结构单元对应一个二进制比特位，从下到上依次为 Si 基底、Si 的自然氧化层、钛钨(TiW)下电极、第一层 GST 孔、第二层 GST 孔和上电极， SiO_2 为最外层的保护材料。每个 PCRAM 结构单元的几何形貌参数包括深度 $H_1 \sim H_4$ 、直径 $D_1 \sim D_4$ 以及每两层之间的套刻偏移量等。待测样品形貌参数的标称值如表 1 所示。其中，待测参数包括第一层 GST 孔的直径 D_2 和深度 H_2 、下电极和第一层 GST 孔之间的套刻偏移量 O_{x1} 和 O_{y1} 以及下电极圆柱的直径 D_1 与深度 H_1 。

表 1 待提取参数的标称值

Table 1 Nominal values of parameters to be extracted unit: nm

Morphology parameter	D_1	D_2	H_1	H_2	O_{x1}	O_{y1}
Nominal value	500	130	15	65	40	100

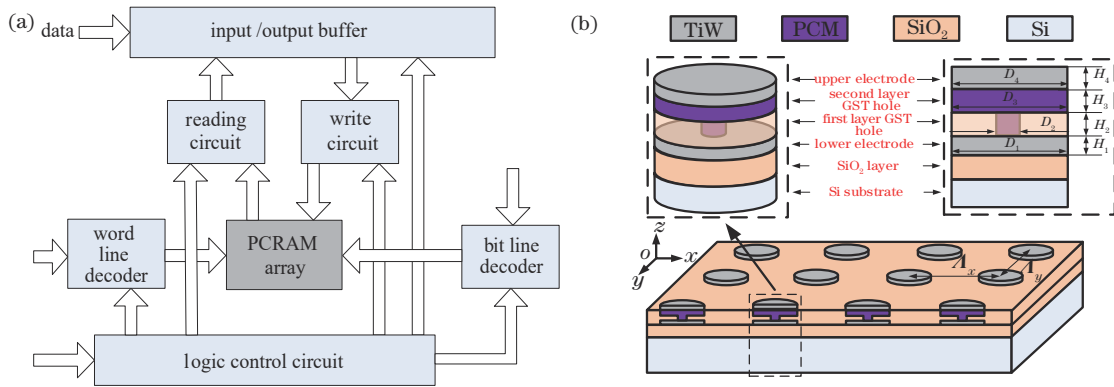


图 3 PCRAM 芯片的结构。(a) 各模块的框图；(b) T 型 PCRAM 单元阵列示意图

Fig. 3 Structure of the PCRAM chip. (a) Block diagram of each module; (b) schematic diagram of T-type PCRAM unit array

3.2 实验结果

图 4 为制作的 TiW 下电极对应的形貌和 SEM 测量结果。首先，利用 Mueller 矩阵椭偏仪对图 4(b) 中的样品进行测量，在 65° 入射角和 0° 方位角下获得了 30 组斯托克斯向量的重复性测量数据。然后，根据 LM 迭代优化过程，将每组测量光谱数据与 RCWA 模型计算的光谱进行拟合，并提取出样品的待测参数，拟合过程中，Si、 SiO_2 以及 TiW 材料在不同入射波长下的光学常数根据文献[29-31]选取。图 5 为测量斯

托克斯参量与理论光谱之间的最佳拟合结果，对应的 MSE 为 20.26。提取的形貌参数 D_1 和 H_1 分别为 (562.4 ± 0.92) nm 和 (12.3 ± 0.07) nm，与 SEM 测量的 D_1 (554 nm) 接近 (没有深度值测量结果的原因是 SEM 测量时直径需断面制样，会破坏样品)。两者之间存在偏差的主要原因可能是 SEM 测量结果为某个单元结构的形貌参数值，而光学散射仪测量结果反映的是测量光斑覆盖区域内所有单元结构形貌参数的平均值^[32]。

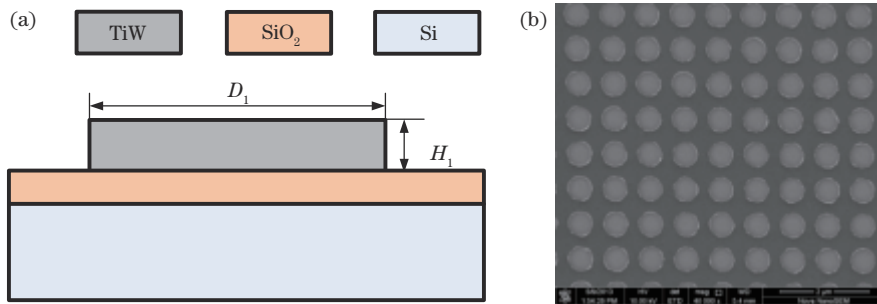


图 4 TiW 下电极的结构。(a) 形貌示意图；(b) SEM 的测试结果

Fig. 4 Structure of the TiW bottom electrode. (a) Schematic diagram of the morphology; (b) test results of the SEM

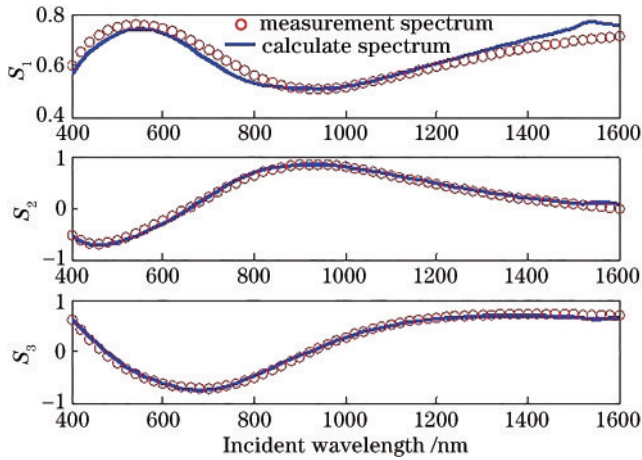


图 5 TiW 下电极的测量和最优化理论斯托克斯参量

Fig. 5 Measured and optimal theoretical Stokes parameters of the TiW bottom electrode

在 TiW 下电极基础上制作了第一层 GST 孔结构,其结构形貌和 SEM 测量结果如图 6 所示。可以发现,结构最上方有一个凸起,这是由加工工艺中下层 TiW 电极的堆积效应导致。一般而言,该凸起的厚度与下电极的深度 H_1 保持一致,其中心孔的直径与 GST 通孔的 D_2 相同,因此,通过引入侧壁角(SWA)对结构形貌的细节进行表征。利用 ME-L 型 Mueller 矩阵椭

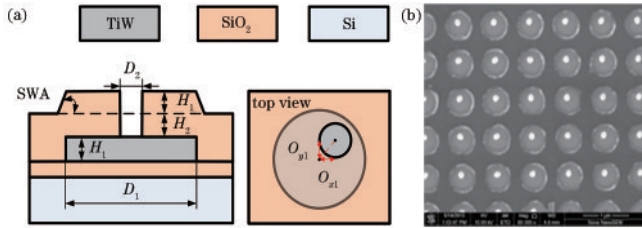


图 6 第一层 GST 孔的结构。(a)形貌示意图;

(b) SEM 的测试结果

Fig. 6 Structure of the first layer of GST holes. (a) Schematic diagram of the morphology; (b) test results of the SEM

表 2 基于光学散射仪和 SEM 的形貌参数测量结果

Table 2 Measurement results of structural parameters based on optical scattermeter and SEM

Morphology parameter	D_1 /nm	D_2 /nm	H_1 /nm	H_2 /nm	O_{x1} /nm	O_{y1} /nm	SWA /($^\circ$)
Optical scattermeter	562.4 ± 0.92	130.6 ± 0.12	12.3 ± 0.07	69.7 ± 0.10	48.4 ± 0.33	112.1 ± 0.46	86.3 ± 0.13
SEM	553.7	127.4	/	/	42.1	104.3	/

4 结 论

利用光学散射仪对 T 型 PCRAM 单元的形貌参数进行了测量,通过建立样品几何形貌参数、材料光学常数、测量条件配置等与斯托克斯向量之间的数学模型,利用 LM 算法拟合得到 PCRAM 的关键尺寸以及第一层 GST 孔和下电极之间的套刻偏差等待测形貌参数,最后将光学散射仪的测量结果与 SEM 的测量值进行对比,验证了将光学散射仪运用于 T 型 PCRAM 三维形貌测量的可行性与有效性。考虑到光学散射仪具有

偏仪对图 6(b)中的样品进行测量,在 65° 入射角和 0° 方位角下获得了 30 组斯托克斯向量的重复性测量数据,再根据 LM 迭代优化过程提取出样品的待测参数。由于上文中已经获取了参数 H_1 和 D_1 ,此处提取的形貌参数仅包括 H_2 、 D_2 、SWA、 O_{x1} 和 O_{y1} 、

图 7 为样品测量斯托克斯参量光谱与正向模型理论计算光谱之间的最佳拟合示意图,对应的 MSE 为 12.79,逆向提取的 D_2 、 H_2 、SWA、 O_{x1} 和 O_{y1} 参数和 SEM 测量结果如表 2 所示。其中,SEM 的测量结果只包含了待测纳米结构的平面尺寸,未对样品进行断面处理。可以发现,实验获取的其他待测形貌参数值与 SEM 测量结果均存在微小偏差。除上述提到的原因外,实际样品结构存在较大粗糙度、结构表面的不均匀性、正向光学特性模型的简化以及聚焦透镜的数值孔径等参数也会对测量结果造成一定影响^[33],但测量结果也验证了利用光学散射测量方法对 T 型 PCRAM 进行三维形貌参数表征的有效性。

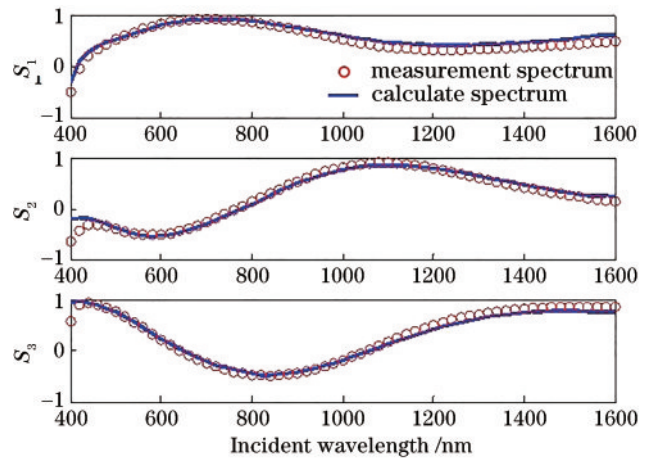


图 7 第一层 GST 孔结构的测量和最优化理论斯托克斯参量

Fig. 7 Measured and optimal theoretical Stokes parameters of the first layer GST pore structure

的无损、快速、非接触、高精度以及容易实现在线测量等优势,有望将该方法运用于其他半导体纳米结构(如闪存存储器)的测量表征中。

参 考 文 献

- [1] Shi X Z, Chen C S, Liu S H, et al. Nonvolatile and reconfigurable tuning of surface lattice resonances using phase-change $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films[J]. Results in Physics, 2021, 22: 103897.
- [2] Liu B, Wei T, Hu J, et al. Universal memory based on phase-change materials: from phase-change random

- access memory to optoelectronic hybrid storage[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(5): 058504.
- [3] 杜玲玲, 周细应, 李晓. 相变存储器及其用于神经形态计算的研究综述[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(12): 2398-2405.
Du L L, Zhou X Y, Li X. Review of phase change memory and its application in neuromorphic computation [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2020, 49(12): 2398-2405.
- [4] 盛俊杰. 相变随机存储器电特性测试方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
Sheng J J. Testing methods for electrical properties of phase change random access memory cell[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [5] Antolini A, Scarselli E F, Gnudi A, et al. Characterization and programming algorithm of phase change memory cells for analog in-memory computing[J]. Materials, 2021, 14(7): 1624.
- [6] Liang J L, Jeyasingh R G D, Chen H Y, et al. An ultra-low reset current cross-point phase change memory with carbon nanotube electrodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(4): 1155-1163.
- [7] 蓝天. 相变存储器器件结构及工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
Lan T. Device structure and fabrication process of phase change memory[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [8] Li W, Chen S Q, Deng H. Potential application of far-field superlens in optical critical dimension metrology: a simulation study[J]. Optical Engineering, 2017, 56(5): 053109.
- [9] Mei Q, Gao J, Lin H, et al. Structure light telecentric stereoscopic vision 3D measurement system based on Scheimpflug condition[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86: 83-91.
- [10] Fouchier M, Pargon E, Bardet B. An atomic force microscopy-based method for line edge roughness measurement[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(10): 104903.
- [11] Maniscalco B, Kaminski P M, Walls J M. Thin film thickness measurements using scanning white light interferometry[J]. Thin Solid Films, 2014, 550: 10-16.
- [12] Berguiga L, Orobtcouk R, Elezgaray J, et al. High-resolution-scanning waveguide microscopy: spatial refractive index and topography quantification[J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2523-2526.
- [13] Chui S T, Chen X Z, Yao Z H, et al. Effect of sample anisotropy on scanning near-field optical microscope images [J]. Journal of Applied Physics, 2021, 129(8): 083105.
- [14] 杨高元, 蔡茂琦, 李金昱, 等. 基于低能离子轰击的亚波长纳米结构制备[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1736001.
Yang G Y, Cai M Q, Li J Y, et al. Preparation of subwavelength nanostructures based on low-energy ion bombardment[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1736001.
- [15] 陈超文, 薛俊鹏, 张启灿, 等. 基于多视方程的高反光物体表面三维形貌测量[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2212002.
Chen C W, Xue J P, Zhang Q C, et al. Three-dimensional shape measurement of shiny surface based on multi-view equation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2212002.
- [16] Zhu J L, Liu S Y, Zhang C W, et al. Identification and reconstruction of diffraction structures in optical scatterometry using support vector machine method[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2013, 12(1): 013004.
- [17] Kucharski D, Zdunek H. A low-cost, simple optical setup for a fast scatterometry surface roughness measurements with nanometric precision[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 2020, 68(48): 485-490.
- [18] Minkov D A, Angelov G V, Nestorov R N, et al. Perfecting the dispersion model free characterization of a thin film on a substrate specimen from its normal incidence interference transmittance spectrum[J]. Thin Solid Films, 2020, 706: 137984.
- [19] 陈修国, 刘世元, 张传维, 等. 基于 Mueller 矩阵椭偏仪的纳米压印模板与光刻胶光栅结构准确测量[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 180701.
Chen X G, Liu S Y, Zhang C W, et al. Accurate measurement of templates and imprinted grating structures using Mueller matrix ellipsometry[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(18): 180701.
- [20] 朱金龙. 纳米结构光学散射测量中的形貌重构方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
Zhu J L. Profile reconstruction methods in optical scatterometry based nanostructure metrology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [21] 董正琼. 光学散射测量中的仪器测量条件配置优化方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
Dong Z Q. Research on instrument measurement configuration optimization in optical scatterometry[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [22] Li J, Shi L H, Ma Y, et al. Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for analyzing binary gratings[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(12): 2132-2135.
- [23] 陈修国. 基于广义椭偏仪的纳米结构测量理论与方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Chen X G. Theory and method of nanostructure metrology using generalized ellipsometry[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [24] Zhu J L, Jiang H, Shi Y T, et al. Fast and accurate solution of inverse problem in optical scatterometry using heuristic search and robust correction[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2015, 33(3): 031807.
- [25] Marquardt D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1963, 11

- (2): 431-441.
- [26] 陈修国, 袁奎, 杜卫超, 等. 基于 Mueller 矩阵成像椭偏仪的纳米结构几何参数大面积测量[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 070703.
Chen X G, Yuan K, Du W C, et al. Large-scale nanostructure metrology using Mueller matrix imaging ellipsometry[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(7): 070703.
- [27] 董正琼, 赵杭, 朱金龙, 等. 入射光照对典型光刻胶纳米结构的光学散射测量影响分析[J]. 物理学报, 2020, 69(3): 030601.
Dong Z Q, Zhao H, Zhu J L, et al. Influence of incident illumination on optical scattering measurement of typical photoresist nanostructure[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(3): 030601.
- [28] Heuke S, Rigneault H. Laser scanning dark-field coherent anti-Stokes Raman scattering (DF-CARS): a numerical study[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 3985-3995.
- [29] Chen S, En Y F, Li G Y, et al. An ion beam layer removal method of determining the residual stress in the as-fabricated TSV-Cu/TiW/SiO₂/Si interface on a nanoscale[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 112: 113826.
- [30] Gong J B, Dai R C, Wang Z P, et al. Temperature dependent optical constants for SiO₂ film on Si substrate by ellipsometry[J]. Materials Research Express, 2017, 4 (8): 085005.
- [31] Ji Y Q, Jiang Y G, Liu H S, et al. Optical constants of SiO₂ films deposited on Si substrates[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(4): 046401.
- [32] Nidamanuri R R, Zbell B. A method for selecting optimal spectral resolution and comparison metric for material mapping by spectral library search[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2010, 34 (1): 47-58.
- [33] 董正琼, 刘世元, 陈修国, 等. 基于灵敏度分析的一维纳米结构光学散射测量条件优化配置[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(1): 116-122.
Dong Z Q, Liu S Y, Chen X G, et al. Optimization of measurement configuration in optical scatterometry for one-dimensional nanostructures based on sensitivity analysis[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(1): 116-122.