

基于傅里叶变换红外反射谱的 DRAM 深沟槽结构测量系统研究

刘世元¹, 张传维², 沈宏伟², 顾华勇²

1. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074
2. 武汉光电国家实验室光电材料与微纳制造研究部, 湖北 武汉 430074

摘要 提出了一种基于傅里叶变换红外 (FTIR) 反射谱的动态随机存储器 (DRAM) 深沟槽结构测量方法与系统。给出了测量原理与方法, 设计了测量系统光路。通过可变光阑调节探测光斑大小并选择合适的入射角, 消除了背面杂散光反射干扰的影响, 大大提高了信噪比。对 DRAM 深沟槽样品进行反射光谱图测试与实验研究, 表明所述方法与系统能够提取出纳米级精度的深沟槽参数。该技术提供了一种无接触、非破坏、快速、低成本和高精度的深沟槽结构测量新途径, 在集成电路制造过程中的在线监测与工艺控制方面具有广阔的应用前景。

关键词 傅里叶变换红外光谱仪; 红外反射谱; 动态随机存储器; 深沟槽结构

中图分类号: O657.3 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)04-0935-05

引言

在微电子和微机电系统 (microelectromechanical system, MEMS) 设计与制造中, 目前普遍采用了高深宽比的微纳深沟槽结构^[1-3], 为了实现有效的工艺控制, 在制造过程中对深沟槽结构的尺寸进行在线、非破坏性的精确检测具有重要的意义。随着材料和几何结构的改变, 给现有的测量手段带来了挑战, 如基于轮廓的紫外/可见光谱法 (ultraviolet/visible spectroscopy, UV/Vis) 和基于剖面制样的扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM)^[4] 以及装有特殊探针的原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 等。这些传统测量方法已经很难甚至根本无法同时满足工艺控制和优化所需的无接触、非破坏、快速、低成本、高灵敏度等测量要求。本文提出一种基于模型的傅里叶变换红外反射谱测量方法, 提供了一种无接触、非破坏、快速、低成本和高精度的测量新途径。常规傅里叶变换红外反射谱 (Fourier transform infrared reflectance, FTIR) 测量无法精确提取动态随机存储器 (dynamic random access memory, DRAM) 深沟槽结构的特征尺寸参数, 存在信号微弱、信噪比低、测量性能差、速度慢等问题。本研究运用自行设计的光路系统, 通过限制红外光的散度角控制探测光斑的大小, 选择合适的入射角度以及利用空间滤波器消除样品的背光杂散干扰等措施, 极大提高了信噪比和系统测量性能。通过理论仿真分析和测量系

统的实验测量, 验证了该方法的可行性, 完全适应最新工艺中越来越复杂的沟槽结构的测量^[2,5,6]。

1 测量原理与方法

硅相对于红外光束是透明的, 因此红外光束可以穿透硅片表面膜层和沟槽; 由于沟槽底部占空比的突变产生了光学常数的不连续性, 透射光束在膜层底部不连续界面产生反射, 与硅片表面的反射光束产生干涉; 利用干涉图和光谱图之间的对应关系, 通过对干涉图进行傅里叶积分变换的方法来测定并研究反射光谱图。测量过程如图 1 所示。

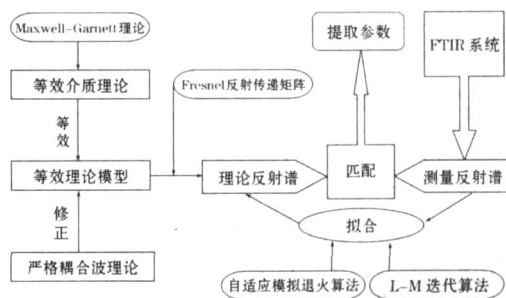


Fig 1 FTIR measurement system flowchart

FTIR 系统将红外光束投射到含有深沟槽结构的硅片表面, 接收从深沟槽结构各分界面反射形成的干涉光, 经傅里

收稿日期: 2007-10-08, 修订日期: 2008-01-12

基金项目: 国家“863”计划项目 (2006AA04Z325), 国家自然科学基金项目 (50775090) 和新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-06-0639) 资助
作者简介: 刘世元, 1970 年生, 华中科技大学机械学院教授 e-mail: shyliu@mail.hust.edu.cn

叶变换得到测量反射光谱。由于入射光波长远大于沟槽的特征宽度，因此可利用等效介质理论将微纳深沟槽结构等效为薄膜堆栈结构模型^[7,81]。深沟槽结构所对应的各等效层介电常数可采用 Maxwell-Garnett 理论计算得到，Maxwell-Garnett 理论计算如(1)式所示

$$\frac{-h}{+2h} = \sum_{j=1}^N f_j \frac{j-h}{j+2h}, \quad f_j = 1 \quad (1)$$

其中， h 是该等效层所对应的沟槽结构层主要材料的电介质常数， f_j 是该等效层所对应的沟槽结构层中第 j 种其他介质所占的体积百分比， j 是该等效层所对应的沟槽结构层中第 j 种其他介质的电介质常数， j 为沟槽结构层中其他介质种类所对应的序号。设沟槽结构层中介质种类数为 N ， j 取值为 1 至 N 。利用等效介质理论可以将各种不同结构的深沟槽等效为一定光学常数多层均匀薄膜堆栈模型，然后用严格耦合波理论对各均匀薄膜层光学常数进行修正。应用菲涅尔 (Fresnel) 公式和薄膜光学传递矩阵计算等效光学模型反射光谱^[9]。多层薄膜的光学传递矩阵如公式(2)所示

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} = D_0^{-1} \left[\prod_{l=1}^N D_l P_l D_l^{-1} \right] D_s \quad (2)$$

由此可得膜层的反射系数 r 和反射率 R

$$r = \frac{M_{21}}{M_{11}}, \quad R = |r|^2 \quad (3)$$

其中 D_0 是环境的光学特征矩阵， D_s 是基底的光学特征矩阵， D_l 是第 l 层薄膜的折射率和折射角的矩阵函数， P_l 是第 l 层相位变化角的矩阵函数。

综合(1)、(2)和(3)式，可以计算出等效光学模型的理论反射光谱，它与沟槽结构的组成成分、深度和宽度等有关。利用自适应模拟退火算法和 Levenberg-Marquardt (LM) 迭代算法相结合，以待测量的沟槽几何特征参数为拟合参数，通过理论光谱计算模型对测量反射光谱进行拟合，实现测量反射谱与理论反射谱的最佳匹配^[10,11]，进而获得沟槽的深度及宽度等几何特征参数，其过程如图 1 所示。

2 测量系统设计

2.1 硬件结构

基于模型的傅里叶变换红外反射谱测量系统的硬件主要包括红外光源、干涉仪、探测光路、探测器和计算机。如图 2 所示，红外光经由迈克尔逊干涉仪调制，进入探测光路；进入探测光路的光束经调节后对样品进行探测；光束经探测光路出射后由探测器收集，经过高速、高精度的模数转换器把模拟信号转换为数字信号，得到包含样品信息的干涉图；通过计算机，引入傅里叶变换对原始的干涉图进行傅里叶积分变换，使之成为反射率和波数相对应的波谱图。根据测量要求，测量系统选用 Newport 公司的 MIR8025 光谱仪系统，硅碳棒红外光源波长范围为 1.7 ~ 28 μm ，探测器采用氮冷却 MCT (mercury cadmium telluride) 探测器。

2.2 探测光路

探测光路由离轴抛物镜光学系统、光斑调节光阑、空间滤波器和样品台组成。如图 3 所示，光束经迈克尔逊干涉仪

调制后进入探测光路，投射到离轴抛物镜 1 上面，光束偏转 90 角后聚焦，在焦平面上放置可调光阑 9，光束经过焦平面后发散，投射到离轴抛物镜 2 上面，发散光束变成平行光束，经平面反射镜 7 反射后，光束投射到离轴抛物镜 3 上面，光束偏转 90 角，由平行光束变为聚焦光束，聚焦光束以 45 角入射到垂直放置的样品 10 表面，反射的发散光束由离轴抛物镜 4 接收，发散光束变成平行光束并入射到平面反射镜 8，经反射后光束改变方向投射到离轴抛物镜 5 上，光束偏转 90 角后聚焦，在焦平面上放置空间滤波器 12，光束经过焦平面后，由离轴抛物镜 6 把发散光束变成平行光束并偏转 90 角，最后平行光束从探测光路出射，进入 MCT 探测器。

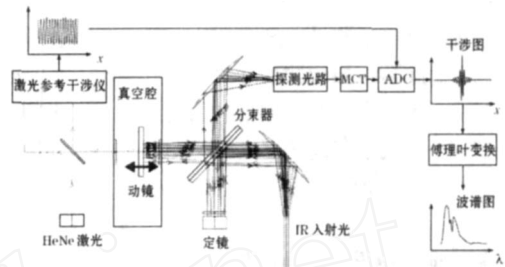


Fig. 2 FTIR schematics of the optical layout and block diagram of the signal path of the FTIR system

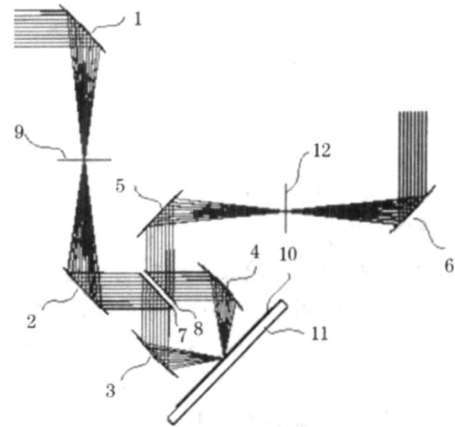


Fig. 3 Layout of the detecting optical path

轻微掺杂或不掺杂的硅片对于红外波长的光是透明的，在这样的硅片上进行反射系数的测量存在困难。在实验中，为了接收样品表面膜层的反射光使用了离轴抛物镜，如图 4 所示，从表面膜层入射到硅片内，并从背面反射回来的背光也会混杂在接收到的信号光束中。这些背光严重影响所得信号光束的质量，因为背光中包含了很多不确定因素，诸如硅片背面的平整度，衬底的掺杂程度，以及硅片夹的底面性质等因素。在探测光路中，我们应用了一个空间滤波器来抑制背面反射光，减小背光反射、自然光和畸变光束的影响，确保对膜层沟槽结构特征的测量精度。

探测光路中运用了一个可调光阑来限制光束散度角的大小，从而可以调节聚焦光斑的大小。图 5 是由光学软件 Zemax 对实际探测光路的仿真，光束的半散度角为 0.5°，在光束的焦平面处。调节光阑孔径大小，当光阑通光孔径为 0.7

mm 时,能得到 $200\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$ 的近似矩形光斑。此时探测光斑能够很好得满足对沟槽测量的要求,并且有利于硅片背面杂散光与表面反射光束的有效分离。

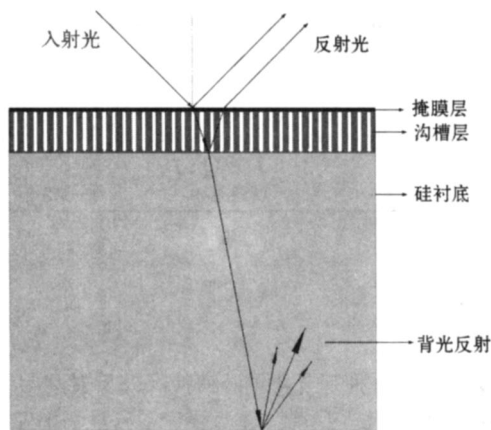


Fig. 4 Reflection and refraction of IR beam in the sample with deep trench structures

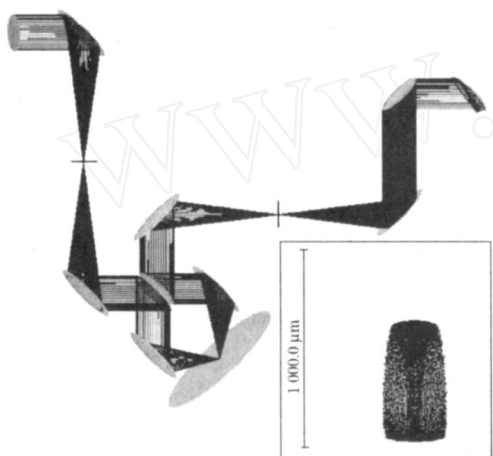


Fig. 5 Simulation of the optical path and the size of detection spot using Zemax

如图 6 所示为光束分别以 45° 、 90° 和 -45° 角入射到样品表面时,光束在样品表面聚焦的情况。入射光束半散度角取离散的 3 个值,分别为 -0.5° 、 0° 和 $+0.5^\circ$,可以发现,当且仅当探测光路中聚焦光束以 45° 角入射到样品表面时,能够使不同散度角的光束都近似聚焦在一个焦平面上即样品表面,光束能量集中,可以有效提高信噪比。 45° 角入射使探测光束尽可能多的包含沟槽结构信息,同时也有利于实现背面

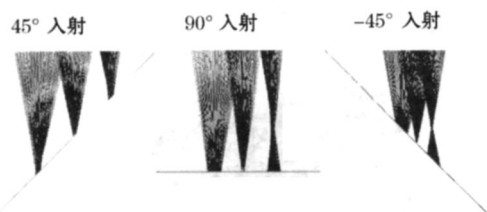


Fig. 6 The focus situation with different beam incidence angle of 45° , 90° and -45°

杂散光和表面反射光束的有效分离。

3 实验研究与结果分析

通过 FTIR 测试系统对样品硅片进行测试,测试硅片满足 SEMI 标准,硅片直径 200 mm,厚度为 1 mm。经扫描电镜测量得沟槽深度 $3\ \mu\text{m}$,宽度 90 nm,具有典型的深沟槽结构的特点。

对样品测试可以得到波数与反射率对应的波谱图,如图 7 所示。由于外界环境和干扰信号的影响,波形比较粗糙,经滤波和校正后可以得到平滑的曲线^[12,13]。谱线有下降趋势的同时,谱线小周期对应的振幅略有衰减。由理论分析可知,谱线的振幅与沟槽宽度有关,小周期与沟槽深度有关,大周期与氮化硅层厚度有关,小周期对应的振幅略有衰减是由沟槽底部的不均匀性所导致的^[14,15]。

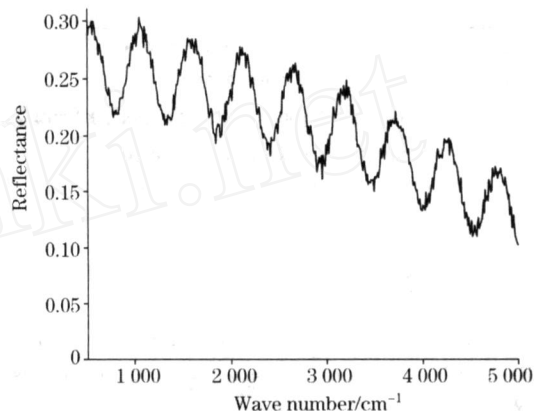


Fig. 7 FTIR reflectance spectrum from the measurement of the sample

利用等效介质理论将微纳深沟槽结构等效为多层薄膜堆栈结构的理论光学模型。对于瓶颈状和锥状沟槽,应对沟槽层再进行分层等效,建立等效光学模型。如图 8 所示,样品等效为 4 层薄膜堆栈结构,分别为空气层、氮化硅层、沟槽层和衬底层。

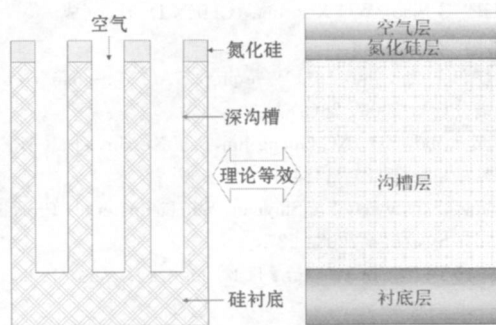


Fig. 8 Sample with trench structures and the corresponding equivalent theory model

利用严格耦合波理论对各均匀薄膜层光学常数进行修正。应用菲涅尔 (Fresnel) 公式和薄膜光学传递矩阵计算等效

光学模型反射光谱可以得到波数与反射率对应的理论模拟波谱图。对测量得到的反射光谱进行平滑和校正处理后,利用自适应模拟退火算法和 Levenberg-Marquardt (LM) 迭代算法相结合,以待测量的沟槽几何特征参数为拟合参数,通过理论光谱计算模型对测量反射光谱进行拟合,实现测量反射谱与理论反射谱的最佳匹配,进而提取沟槽深度及宽度等几

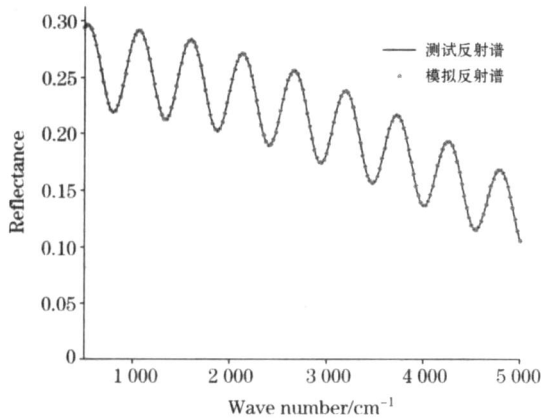


Fig 9 The fitting of the reflectance spectra from measurement and theoretical model

—: Measurement; ··: Theoretical model

何特征参数。图 9 所示为谱线拟合的结果,两者吻合得很好。如表 1 所示,FTIR 测试结果与 SEM 测试结果非常接近,参数提取精度在 1% 以内。

Table 1 Parameters measured by SEM and FTIR

	测量结果/ μm		参数提取精度/%
	SEM	FTIR	
氮化硅层	0.15	0.150 1	0.056 7
沟槽层	3	2.991 0	0.101 5
沟槽宽度	0.09	0.090 2	0.212 7

4 结束语

本文提出了一种基于傅里叶变换红外反射谱的 DRAM 深沟槽结构测量方法与系统。重点描述了测量系统工作原理和硬件结构设计。解决了调节光斑大小、背光干扰消除、入射角度选择等问题。阐述了实验方法,揭示了基于模型的傅里叶变换红外反射谱测量的理论基础。测量系统有能力从复杂的结构中测出多重参数,实现高深宽比深沟槽宽度和深度等尺寸的精确测量,为集成电路制造过程中的在线监测与工艺控制提供了一个非常有效的工具,具有广阔的应用空间。

参 考 文 献

- [1] Wittmann J, Kupfer C. Journal of the Electrochemical Society, 2005, 152(2): G148.
- [2] Rudolph U, Weikmann E, Kinne A, et al. Proceedings of 2004 IEEE/ SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, 2004. 89.
- [3] Kibe M, Sakai T, Ohiwa T, et al. Proceedings of 2003 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing, 2003. 362.
- [4] Ram P, Anthony P, Ophir D. Proceedings of SPIE, 2002, 4689: 1077.
- [5] Zaidi S, Stojakovic G, Gutmann A, et al. Proceedings of SPIE, 2003, 5038: 185.
- [6] Wang Xiaodong, Zeng Wanxue, Lu Guoping, et al. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2007, B25(4): 1376.
- [7] Jellison G E. Handbook of Silicon Semiconductor Metrology. New York: Marcel-Dekker, Inc., 2001. 723.
- [8] Weidner A, Slodowskib M, Halm C, et al. Proceedings of SPIE, 2004, 5375: 232.
- [9] Yeh P. Optical Waves in Layered Media. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2005. 102.
- [10] ZHU Jun, LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, et al (朱 军, 刘文清, 刘建国, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(10): 1573.
- [11] CHENG Biao, WU Xiao-hua, CHEN De-zhao (成 飙, 吴晓华, 陈德钊). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(10): 1923.
- [12] ZHANG Tian-shu, LIU Wen-qing, GAO Min-guang, et al (张天舒, 刘文清, 高闻光, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(3): 430.
- [13] LI Qing-bo, ZHANG Guang-jun, XU Ke-xin, et al (李庆波, 张广军, 徐可欣, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(8): 1484.
- [14] Zhang Chuangwei, Liu Shiyuan, Shi Tielin, et al. Proceedings of 3rd. IEEE International Conference on Nano/ Micro Engineered and Molecular Systems, 2008. 227.
- [15] Kessel T, Wickramasinghe H K. Optics Letters, 1999, 24: 1702.

Model-Based FTIR Reflectometry Measurement System for Deep Trench Structures of DRAM

LIU Shi-yuan¹, ZHANG Chuan-wei², SHEN Hong-wei², GU Hua-yong²

1. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. Division of Optoelectronic Materials and Micro-Nano Manufacture, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China

Abstract A method and system for measuring deep trench structures of dynamic random access memory (DRAM) based on Fourier transform infrared (FTIR) reflectometry is proposed. The principle of the measurement system is presented, along with a detailed description of the optical path design. By regulating the slit aperture to decrease the size of the detection spot and optimizing the incidence angle onto the wafer, the reflection from the backside of the wafer is suppressed, thus the signal-to-noise ratio (SNR) of the measurement is increased significantly. The experiments carried out on the deep trench structures of DRAM demonstrate that the trench geometric parameters can be extracted with a nanometer scale accuracy using the proposed system, thus the technique is proven to provide a non-contact, nondestructive, time-effective, low-cost and high resolution tool for the measurement of deep trench structures. It is expected that the proposed technique will find potential applications in the on-line monitoring and process control for microelectronics and microelectromechanical system (MEMS) manufacturing.

Keywords FTIR spectrometer; Infrared reflectance spectrum; DRAM; Deep trench structure

(Received Oct. 8, 2007; accepted Jan. 12, 2008)