

doi:10.3788/gzxb20144303.0314001

# 硅基半导体芯片激光红外显微成像系统研究

贺锋涛, 王晓琳, 张凯, 米波, 张冠芳

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

**摘 要:**为了解决可见光显微成像技术无法实现硅基芯片内部结构观测的问题,根据 1 064 nm 的红外激光对硅材料具有一定穿透深度的特性,设计了一种硅基半导体芯片激光红外显微成像系统.该系统采用数值孔径为 0.42 的长工作距显微物镜,通过音圈电机振动多模石英光纤消除散斑噪音,由系统观察 CD-RW 盘片道间距,表明系统分辨率可达到 1.6  $\mu\text{m}$ ,接近理论值,实现了对芯片厚度为 70  $\mu\text{m}$  的静态随机存储器内部结构显微成像的观测.

**关键词:**半导体芯片;激光红外显微成像;多模石英光纤;音圈电机

中图分类号:TN219

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)03-0314001-4

## The Micro-imaging System of Infrared Laser on Silicon-based Semiconductor Chip

HE Feng-tao, WANG Xiao-lin, ZHANG Kai, MI Bo, ZHANG Guan-fang

(College of Electronic Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** The visible micro-imaging technology cannot observe the chip internal structure. In order to solve this issue, a silicon-based semiconductor chip laser infrared microscopy imaging system was designed. The characteristic of 1 064 nm wavelength of infrared laser that has a certain penetration depth for silicon material was applied for the design. A microscope objective with numerical aperture of 0.42 was adopted in this system. The multimode silica fiber vibration method was used to eliminate the speckle noise. The track pitch of CD-RW disk image was observed by microscope infrared imaging. The results showed that the system resolution can reach 1.6  $\mu\text{m}$  and close to the theoretical value. So it can achieve internal structure observation of static RAM of which the thickness of the chip is 70  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** Semiconductor chip; Infrared laser micro-imaging; Multimode silica fiber; Voice coil motor

**OCIS Codes:** 140.0140; 110.0110; 180.0180; 230.0230

## 0 引言

随着科技的发展、社会的进步,人们在物质上的要求日益提高,作为当今科技主要组成部分的集成电路,在社会发展中已占据了重要的地位.集成规模的提高以及功能上集成度的加大成为社会发展的必然趋势<sup>[1]</sup>.由于半导体技术的关键尺寸已从微米级缩小到亚微米乃至纳米级,因此利用半导体芯片来提高电路的集成度,以适应逐渐增加的多功能应用.所以对半导体芯片的失效分析显得尤为重要.

半导体芯片激光红外显微成像技术是通过半导体芯片内部的显微成像,实现对芯片内部结构的观察以及对缺陷的检测<sup>[2]</sup>.根据观察到的芯片内部结构特征,来为改进芯片设计提供参考<sup>[3]</sup>,同时对芯片内部缺陷定位,可以提高其良品率和可靠性.本文采用 1 064 nm 的红外激光作为光学显微镜的照明光源,利用音圈电机振动多模石英光纤来消除由于激光相干性所产生的散斑噪音,得到 SARM 芯片内部显微成像,解决了可见光显微成像技术无法对硅基芯片内部观察及检测的问题.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61201193)和陕西省自然基金基础研究计划项目(No. 2012JQ8014)资助

**第一作者:**贺锋涛(1974-),男,副教授,博士,主要研究方向为激光成像关键技术中的散斑消除及光电传感信息处理技术、信息高密度光储存等. Email:hefengtao@xupt.edu.cn

**通讯作者:**王晓琳(1987-),女,硕士,主要研究方向为激光成像关键技术中的散斑消除等. Email:qywxl2008@126.com

**收稿日期:**2013-07-08; **录用日期:**2013-08-26

<http://www.photon.ac.cn>

# 1 激光红外显微成像的系统结构

红外显微成像技术是将显微镜技术应用到红外成像系统<sup>[4]</sup>中,利用红外线的穿透能力,来观测芯片内部结构<sup>[5]</sup>.红外显微成像系统的分辨率由显微物镜的分辨率、CCD摄像头的分辨率和图像采集卡的分辨率决定;但主要决定于显微物镜的分辨率<sup>[6]</sup>.由瑞利判据可知,物镜的分辨率由下式决定: $d=0.61 \frac{\lambda}{NA}$ ,即与照明光源的波长成正比,与物镜的数值孔径成反比.本系统选用显微镜物镜的数值孔径 NA 为 0.42 保持不变,采用波长为 1 064 nm 的红外激光作为光源,其分辨率的理论值可达 1.49  $\mu\text{m}$ .由于散斑噪音的存在,影响了成像的质量,所以我们利用光纤振动的方法对散斑进行消除.具体如下,将一个音圈电机固定在多模石英光纤上,让音圈电机振动带动光纤振动,对传输中红外激光的相干性起到破坏作用,进而达到消除散斑的目的.原理如图 1.本系统的基本组成可大致分为:光学显微镜,CCD 图像采集<sup>[7]</sup>,微型计算机.

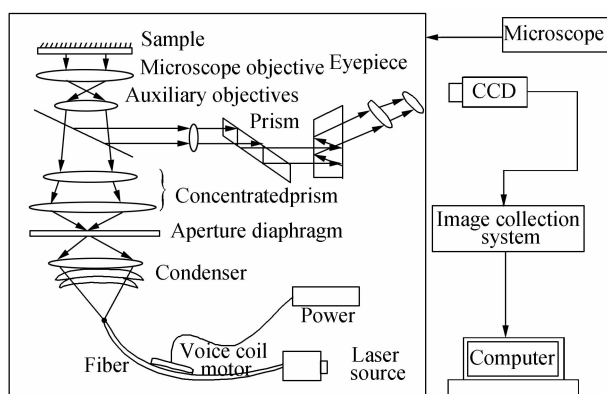


图 1 原理图

Fig. 1 Schematic diagram

## 1.1 散斑噪音的消除

自 1960 年激光器问世后,人们就观察到了激光散斑现象,即为高相干性的激光在粗糙的物体表面所形成的颗粒图样,又称散斑噪音<sup>[8]</sup>.这种散斑的存在严重影响激光显微成像的质量,掩盖图像的信息,降低了图像的分辨率,成为激光显示、激光成像<sup>[9]</sup>等应用的制约因素之一,因此对激光散斑噪音的消除问题具有重要的研究意义.如何减弱散斑噪音的影响一直是人们研究的问题,不少科研工作人员曾提出降低散斑对比度的方法,如利用不同波长的光源照明来降低激光相干性<sup>[10]</sup>,从而减弱散斑,利用脉冲激光的叠加、移动散射体等方法来降低散斑<sup>[11]</sup>.这些方法虽然减弱散斑的影响,但系统较为复杂.本系统采用 8051 单片机控制 AD9850 的输出频率,通过 AD9850 产生信号,由 ULN2003 大电流驱动阵列来驱动音圈电机振动,进而带动多模石英光纤振动,使激光的相位发生变化,从而

破坏了激光的强相干性,起到消除散斑噪音的作用.

图 2 为没有消除散斑的情况下,对抛光玻璃表面的显微成像,由对比度公式  $C = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle}}$  (其中,  $I$  是散斑图样的强度)<sup>[12]</sup>通过 MATLAB 软件计算其对比度为 0.1676,采用振动光纤的方法对散斑进行消除后的抛光玻璃表面图像如图 3 所示,计算其对比度为 0.0383.比较图 2 和图 3,该方法对散斑噪音的消除有很好的效果,使显微图像达到 5% 以下的散斑对比度,低于人眼对图像的分辨<sup>[9]</sup>.

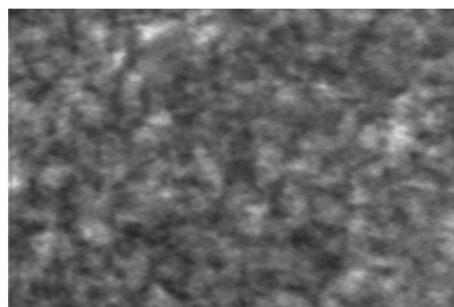


图 2 有散斑时抛光玻璃表面图像

Fig. 2 The polished glass surface image when existing speckle noise

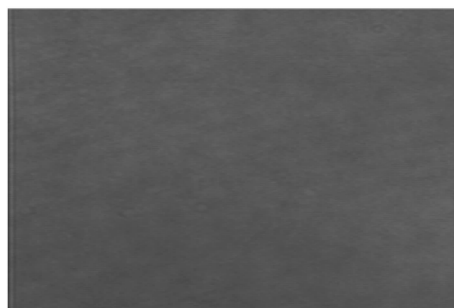


图 3 消除散斑的抛光玻璃表面图像

Fig. 3 The polished glass surface image without speckle noise

## 1.2 激光红外显微成像系统分辨率的检测

光学显微镜中的分辨率是指能清楚区分被检物体细微结构最小间隔的能力.图 4 是选用波长为 1 064 nm 的红外激光作为照明光源,通过显微物镜 50 倍放大,数值孔径为 0.42,景深 1.6  $\mu\text{m}$ ,CCD 摄像头像素为 786  $\times$  576 的激光红外显微成像技术对 CD-RW 所成的像.

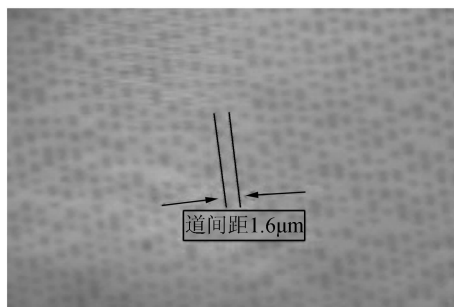


图 4 50X 显微物镜激光红外显微成 CD-RW 盘片的图像

Fig. 4 CD-RW disk image by microscope infrared imaging with 50X microscope objective

由 1.1 节计算得知系统理论分辨率为  $1.49 \mu\text{m}$ , 图 4 清晰地观察到道间距为  $1.6 \mu\text{m}$  的 CD-RW 盘片<sup>[13]</sup>的显微图像,表明系统分辨率接近理论值。

## 2 激光红外显微成像的系统成 SRAM 的图像

采用波长为  $1064 \text{ nm}$  的红外激光作为光学显微镜的照明光源,笔者对成像过程中的散斑噪音的消除以及激光红外显微成像系统的分辨率进行研究和检测.利用红外显微成像技术具有图谱合一、微区化、可视化、高准确度和高灵敏度等优点<sup>[14]</sup>,可以很好地观察芯片的内部结构组成及缺陷检测.图 5 是用半导体芯片激光红外显微成像技术在  $20\times$  的显微物镜对静态随机存储器表面(其缩写形式为 SRAM,即表示 Static RAM)所成的像.图 6 和图 7 是用该技术分别在  $20\times$  和  $50\times$  的显微物镜对 SRAM 不同灵敏区所成的像。

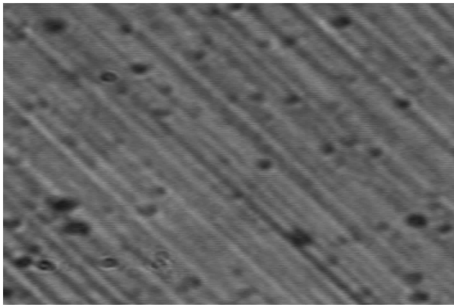


图 5  $20\times$  显微物镜激光红外显微成 SRAM 器件表面的图像  
Fig. 5 SRAM devices surface image by microscope infrared imaging technology with  $20\times$  microscope objective

由图 5 可以看到,采用激光红外显微成像技术,对 SRAM 表面进行成像,清晰地观察到其表面具有划痕及灰尘.然后上移样品,分别采用 HY- $20\times$  型  $20$  倍 NIR 无穷远超长工作距物镜,工作距离  $30.8 \text{ mm}$ ,焦距长  $10 \text{ mm}$ ,数值孔径  $0.29$ ,景深  $3.5 \mu\text{m}$  和 HY- $50\times$  型  $50$  倍 NIR 无穷远超长工作距物镜,以及工作距离  $20.5 \text{ mm}$ ,焦距长  $4 \text{ mm}$ ,数值孔径  $0.42$ ,景深  $1.6 \mu\text{m}$  的显微物镜,清晰地观察到 SRAM 器件内部不同灵敏

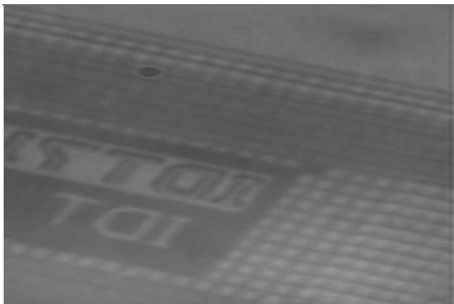


图 6  $20\times$  显微物镜激光红外显微成 SRAM 器件灵敏区的图像  
Fig. 6 SRAM devices sensitive region image by microscope infrared imaging technology with  $20\times$  microscope objective



图 7  $50\times$  显微物镜激光红外显微成 SRAM 器件灵敏区的图像  
Fig. 7 SRAM devices sensitive region image by microscope infrared imaging technology with  $50\times$  microscope objective

区的图像,如图 6 和图 7 所示,得到芯片内部结构信息,为改进芯片设计提供参考.同时可对芯片内部缺陷定位,能很好地提高芯片的良品率和可靠性,这样不仅会极大地促进集成电路设计生产能力,特别是信息网络的建设,提升国家信息化水平均有重要意义<sup>[15]</sup>。

## 3 结论

多年来,虽然半导体芯片缺陷定位检测的方法和技术已经取得了很大进步,但是随着半导体集成电路技术的发展,提高芯片的良品率和可靠性是研究者所重视的部分,因此半导体芯片失效分析技术显示出日益增加的重要性.本文使用波长为  $1064 \text{ nm}$  的红外激光作为显微系统的照明光源,利用音圈电机振动多模石英光纤,破坏激光的相干性,达到消除散斑噪音的目的,使用红外显微成像技术对半导体硅芯片内部进行显微成像,实现对硅芯片内部结构的观察及缺陷检测定位.能够提升现有芯片设计和生产的能力,推动我国的半导体产业发展,具有实际工程应用前景和巨大的市场潜力。

### 参考文献

- [1] BURNS J, AULL B, CHEN Chang-lee, *et al.* A wafer-scale 3-D circuit integration technology[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, 53(10): 2507-2516.
- [2] MOOKHERJEA S, GRANT H R. High dynamic range microscope infrared imaging of silicon nanophotonic devices[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4705-4707.
- [3] WANG Zhao-ying, HU Zhi-yong, BAO Huan-min, Tunable multi-wavelength fiber laser based on semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(3): 321-324. 王肇颖,胡智勇,包焕民,等.基于半导体光放大器的可调谐多波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2006, 35(3): 321-324.
- [4] ZHANG Fu-di, ZHANG Jian-qi, XU Yin. Quantization simulation and fidelity validation of infrared staring imaging sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(4): 596-601. 张福娣,张建奇,徐茵.红外凝视传感器定量仿真及模型验证[J]. *光子学报*, 2011, 40(4): 596-601.
- [5] FU Xiu-hua, WANG Gang, LIU Dong-mei, *et al.* Research and preparation of the visible and infrared control and guide system filters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 174-179.

- 付秀华,王刚,刘冬梅,等. 可见于红外制导系统高通滤光片的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 174-179.
- [6] ZHANG Dong-ling, HE Feng-tao, FENG Xiao-qiang, *et al.* High-resolution optical micro-survey system with blue illuminating source[J]. *Applied Optics*, 2005, 26(3): 57-59. 张东玲, 贺锋涛, 冯晓强, 等. 高分辨率蓝光光学显微测量系统[J]. 应用光学, 2005, 26(3): 57-59.
- [7] WU YUN-long, SHAO Li, ZHANG Kai, *et al.* Image metric analysis of laser jamming effect based on wavelet energy and spot size[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(7): 832-838. 吴云龙, 邵立, 张恺, 等. 基于小波能量和光斑尺寸的干扰图像尺度分析[J]. 光子学报, 2013, 42(7): 832-838.
- [8] LIU Zhan-wei, WU Ning-ning, XIE Hui-min, *et al.* Electron microscope speckle photography technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 64-68. 刘战伟, 吴宁宁, 谢惠民, 等. 电子显微镜散斑照相技术[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 64-68.
- [9] HE Feng-tao, JIA Qiong-yao, SUN Lin-jun. Design of liquid crystal laser projection display system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2699-2702. 贺锋涛, 贾琼瑶, 孙林军. 液晶激光投影显示系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2699-2702.
- [10] JIA Qiong-yao, HE Feng-tao. Research for the problem of speckle homogenization in laser projection display[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 400-405. 贾琼瑶, 贺锋涛. 激光投影显示中散斑均化问题的研究[J]. 激光技术, 2013, 37(3): 400-405.
- [11] LI Xia, LIU Wei-qi, TIAN Zhi-hui, *et al.* Speckle contrast reduction in laser display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(2): 153-156. 李霞, 刘伟奇, 田至辉, 等. 激光显示中散斑对比度的降低[J]. 液晶与显示, 2008, 23(2): 153-156.
- [12] REN Shu-yan, ZHANG Zhuo. Restraining speckle of laser imaging system in accurate measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(3): 331-336. 任淑艳, 张琢. 精密测量中激光成像系统散斑的抑制因素[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 331-336.
- [13] HE Feng-tao, LIU Jia, WANG Chong. The micro-measurement system of high-resolution 405nm laser [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2011, 41(4): 603-605. 贺锋涛, 刘佳, 王翀. 高分辨 405nm 激光显微测量系统[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(4): 603-605.
- [14] LI Xiao-ting, ZHU Da-zhou, PAN Li-gang, *et al.* FTIR microspectroscopy and its progress in application [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(9): 2313-2318. 李晓婷, 朱大洲, 潘立刚, 等. 红外显示成像技术及其应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(9): 2313-2318.
- [15] LIU Peng-zu, HOU Jing, ZHANG Bin, *et al.* 1 550 nm passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 98-100. 刘鹏祖, 侯静, 张斌, 等. 基于半导体可饱和吸收镜的 1 550 nm 被动锁模光学激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 98-100.