

# 硅(外延)片表面结构缺陷的光学无损检测\*

邓江东 李增发 张光寅 颜彩繁

(南开大学物理系 天津 300071)

王宏杰

(天津半导体材料厂 天津 300186)

**摘要** 反射型魔镜检测方法(R-MM)是基于“局域波面畸变”缺陷成像原理的一种光学无损检测方法。我们采用R-MM方法检测了大量的硅片和硅外延片,非常方便直观地观测到漩涡缺陷、杂质条纹、管道等十多种反映实际生产工艺问题的缺陷,经化学腐蚀对比实验表明,检测结果是可靠的。在本文中,我们还着重讨论了外延层对衬底结构缺陷“放大”作用及其物理机制。并报道了缺陷种类与外延片类型之间存在的一些特殊对应关系。

PACC: 4260K, 8170C, 6170

## 1 引言

半导体晶片表面(层)缺陷,包括各种原生缺陷(位错、杂质、微缺陷等)和晶片加工缺陷(如划痕等),对器件质量和成品率都有不同程度的影响。例如:单晶生长中的碳杂质在材料中产生碳析出,将引起螺旋缺陷,而造成器件的结漏电增大,载流子寿命降低。随着近年来超大规模集成电路技术(VLSI)的兴起,对半导体晶片的质量要求更为严格,常规的半导体缺陷检测方法,如金相腐蚀法、扫描电镜法、X-射线形貌术等,已不能满足现代检测中大面积、无损伤、高效率等要求,因此,研究和发展新型的半导体检测技术,特别是研制VLSI工艺过程中分工序、逐一、连贯的在线检测方法和技术,一直是国际半导体生产领域研究的热点。

“魔镜”检测方法是近年来发展起来的一种新型光学检测技术<sup>[1]</sup>,被应用于Si片、光盘、液晶玻璃等各咱表面缺陷的检测<sup>[2~4]</sup>。本文应用反射魔镜检测技术(R-MM),通过对大量硅片和硅外延片表面结构缺陷的检测,讨论了外延层对衬底结构缺陷的放大作用及其物理机制,并报道了外延片掺杂类型与缺陷类型的对应关系,这将对国内半导体生产及工艺研究有着一定的指导意义。

\* 本课题得到天津市自然科学基金资助,1994年4月通过国家技术鉴定

邓江东 博士研究生,专业为固体光散射和固体能谱

李增发 教授,专业为固体物理和材料物理

张光寅 教授,多年从事激光、固体、材料物理和光学非线性的研究

1995年1月27日收到初稿,1995年5月9日收到修改稿

## 2 半导体缺陷“魔镜”检测原理

图1是半导体缺陷“魔镜”检测原理示意图。需要特别指出的是，即使被检测半导体表面是完全平整的，如果在表面或亚表层存在生长不均匀区（应力区）和杂质分布，这时由于自由载流子浓度的局域变化，使相应区域的折射率 $(n_c = n + ik)$ 发生变化，从而将影响反射光的反射率 $r$ 和反射位相（波面） $\psi^{[5]}$ ，亦使波面产生局域的畸变。例如：若在重掺杂硅单晶生长中杂质分布是不均匀的，杂质富集区的电导率 $\sigma_n$ 为 $10^3 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ ，而杂质非富集区的电导率 $\sigma_{Si}$ 为 $10^{-3} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ ，经计算，则有：

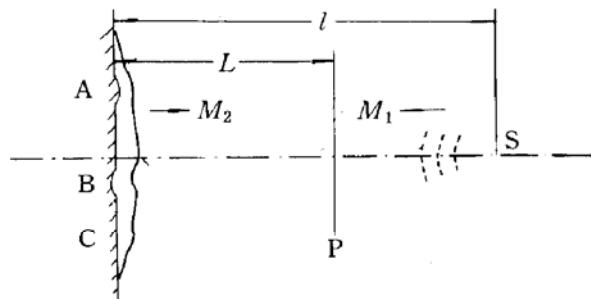


图1 半导体缺陷“魔镜”检测原理示意

A,B,C——样品表面的凸起,凹坑和杂质;P——显示层;  
S——点光源;M<sub>1</sub>,M<sub>2</sub>——入射与反射波面。

$$r_n = 0.31, \quad \operatorname{tg}\psi_n = 0.05$$

$$r_{Si} = 0.29, \quad \operatorname{tg}\psi_{Si} \approx 0$$

若入射波长为632.8nm，则波面畸变起伏深度约为5nm，这和前面讨论的可分辨表面起伏深度有相同的量级。由于伴随着反射率的变化，这时反射图象一般没有明暗相间的变

化，而是单一的亮或暗条纹，图象直接反映样品表面的杂质分布。这样，我们在“局域波面畸变”概念上建立起的反射“魔镜”检测方法（称 the R-MM Approach），不但可以检测半导体表面的微小起伏，而且可检测一些位相型缺陷，如杂质条纹等。这是国外同类方法所不能比拟的。

## 3 R-MM 检测结果与对比实验

图2是R-MM检测装置示意图。光源是632.8nm的He-Ne TEM<sub>00</sub>模激光管，空间滤波器用于获得理想的均匀扩散光束，调整光束扩散角，可检测不同大小的半导体晶片，样品的反射光由显示屏或CCD摄像机接收。

我们用这套反射“魔镜”检测系统首先检测了大量的硅片和硅外延片，这些样片来源于国内外不同厂家，有西门子公司，有色金属研究所，739半导体厂，天津半导体厂等，片子直径30mm到80mm不等，外延层厚度为2~50μm。

一般情况下，若片子表面质量完好，将得到均匀的反射“魔镜”图像，但实际上，用“魔镜”检测，这种“完善无缺”的片子极其少见，总是不同程度地存在着一些缺陷，这表明该方法对缺陷具有很高的灵敏度。

通过R-MM检测到的硅抛光片的典型缺陷有10余种，包括刀痕、划道、抛光花斑等晶体加工缺陷和管道、杂质条纹等生长缺陷，其中，管

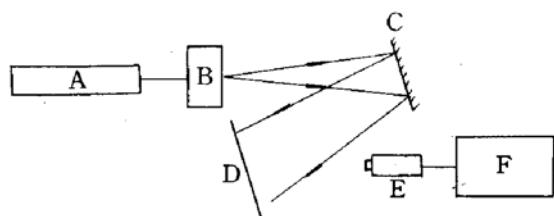


图2 R-MM 检测实验装置  
A——He-Ne 激光器; B——空间滤波器;  
C——硅外延片; E——CCD 摄像机; F——监视器。

道、杂质条纹等图样的缺陷条纹呈明显杂质分布特征,这反映了本检测方法对杂质型缺陷的灵敏性,而这是国外类似方法<sup>[3]</sup>所不能达到的。在硅外延片上观察到20余种典型图样,包括漩涡缺陷、杂质条纹、管道、星型结构等单晶生长缺陷;刀痕、麻坑、划道、塌边等晶片加工缺陷;云雾、沾污、类滑移线、异质点等外延缺陷。部分缺陷图样见图3(见图版Ⅰ)。在这些缺陷图样的初步识别过程中,参照了国家标准《硅材料在生缺陷图谱》<sup>[6]</sup>。

在化学腐蚀对比实验中,我们选择R-MM检测有生长管道、星形结构、漩涡缺陷的三种硅外延片,按照国家标准方法对其进行化学腐蚀显示。即:先对样品背面进行铬离子抛光,再置于氟塑料花蓝中进行化学抛光,然后按标准方法用铬酸进行腐蚀显示,其中对漩涡缺陷片的腐蚀是在吹湿氧环境下进行。腐蚀结果及对应的缺陷图样见图4(见图版Ⅰ)。显然,化学腐蚀显示和R-MM检测结果是一致的,说明R-MM对缺陷的检测是可靠的。另外,我们对漩涡缺陷、管道、星型结构三种生长缺陷进行了跟踪检测,对大量硅外延片的统计结果由表1所示。

表1 几种生长缺陷的R-MM检测统计

缺陷类型	常出现的外延片掺杂类型	衬底电阻率范围/ $\Omega \cdot \text{cm}$
漩涡缺陷	P/P <sup>+</sup>	<0.01
管道	N/N <sup>+</sup>	<0.01
星形结构	N/P, P/N	0.1~30

## 4 结果讨论和分析

### 4.1 外延层对衬底缺陷的“放大”作用

从硅外延片上观测到的缺陷信息明显多于硅抛光片。在这些缺陷中,除了云雾、多晶、沾污等少数缺陷产生于外延工艺过程外,大部分缺陷来源于晶体生长和晶片加工过程,如生长管道和刀痕,而且,一些缺陷如漩涡在硅抛光片上是很难观测到的。显然,这些缺陷经外延工艺后在外延层上又显现出来,我们把这一现象称为外延层对衬底缺陷的“放大”作用。

可以从气相外延生长动力学角度<sup>[7]</sup>对此现象做一定性的阐述。外延层的生长速率可表达为:

$$v = \frac{k_s h_G N_T Y}{(k_s + h_G) N_{Si}}$$

其中  $h_G$  为气相质量转移系数,它表示在单位时间内由气相转移到单位生长层面积上的反应剂分子数; $k_s$  为表面化学反应速率常数; $N_T$  为气体中每立方厘米的分子总数; $N_{Si}$  为硅单晶原子密度; $Y$  为反应剂的摩尔分数。

在外延工艺条件稳定的情况下,即排除外延工艺过程产生的缺陷,对硅抛光衬底上的各点, $Y$ 、 $N_T$ 、 $k_s$  均可认为是常数,外延层的生长速率  $v$  由与基片表面有关的  $h_G$  和  $N_{Si}$  决定。在基片表面晶格完整处和缺陷处,气相外延转移系数  $h_G$  和硅单晶原子密度  $N_{Si}$  都是不一样的,这样使得两处的外延生长速率不同(尽管原基片上两处是完全平整的)。因此,只要基片中存在结构缺陷,如层错、滑移线、杂质分布、单晶生长及基片加工时残留应力等,经外延后,在结构缺陷对应的外延层表面就将变得凹凸不平,由此中以说衬底缺陷通过外延层在表面“放

大”了.

生长缺陷,如漩涡缺陷、管道、杂质条纹、星型结构等,以前只能通过化学腐蚀或红外显微等专门技术才能观察到.特别是漩涡缺陷,一般认为只有在中阻值单晶(电阻率 $0.1\sim 50\Omega \cdot \text{cm}$ )中观察到,不会出现于重掺杂单晶中(电阻率 $<0.01\Omega \cdot \text{cm}$ ),原因是由于漩涡缺陷是众多微缺陷的宏观体现,在重掺杂单晶中,杂质掩盖了这些微缺陷,使之在化学腐蚀显示中不容易显示出来.但在表1中看到,即使在电阻率为 $0.006\Omega \cdot \text{cm}$ 的重掺杂衬底硅外延片中,亦观测到漩涡缺陷,这正是外延层的“放大”作用的结果.

#### 4.2 外延片掺杂类型与缺陷的对应关系

从表1看到,缺陷与外延片掺杂类型有一定的关系,如漩涡缺陷很少出现在N/P型和N/N<sup>+</sup>型外延片,仅出现在P/P<sup>+</sup>型,而管道一般只出现在N/N<sup>+</sup>型片中,星型结构出现于N/P片.对于掺硼(B)的P/P<sup>+</sup>型片,由于B的分凝系数接近于1,在重掺杂单晶(浓度超过 $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )中,极易产生硅自间隙原子凝聚(即所谓的A缺陷)<sup>[6]</sup>,进而形成间隙位错环,出现漩涡缺陷;管道是一种贯穿晶体纵向的杂质富集区,目前N/N<sup>+</sup>型片中,重掺杂质一般为锑,而锑的分凝系数远小于1,在<111>晶向无位错单晶中(特别是尾部),由于杂质浓度过高,组分过冷而易形成析锑现象,出现(111)小平面,最后形成管道;星型结构是一系列位错排沿<110>方向密集排列而形成的宏观分布,只要衬底存在位错或机械损伤,在热应力作用下将产生大量的滑移位错,而在N/P型外延片中,外延层和衬底的掺杂类型不同,将使晶格失配位错大大增加,从而增加了星型结构缺陷的发生率.

另外,在硅(外延)片表面缺陷的检测中,最为常见的缺陷是晶片加工缺陷,如刀痕、划道等等,这反应了晶片加工中存在诸如刀片振动太猛、抛光粉不匀、表面粘污等工艺问题,而这一问题在国产硅片中表现得更为严重.研究已表明<sup>[9]</sup>,硅片表面和背面的机械损伤,将大大降低器件成品率,例如,在双极型集成电路中经常出现的发射极漏电现象,主要来源就是硅片上存在划道等缺陷.因此,加强半导体生产中各工艺环节的技术监督,对提高我国电子产品的成品率有着极重要的意义.

#### 参 考 文 献

- [1] 邓江东,李增发,等,物理,1994,23:556.
- [2] S. Kato *et al.*, Inst. Elect. Commun. Eng., Japan, SSD-77, 1977, 33:81.
- [3] K. Kugimiya *et al.*, J. Cryst. Growth, 1990, 103:461.
- [4] K. H. Yang *et al.*, J. Elect. Soc., 1985, 132:1214.
- [5] K. Seeger, Semiconductor Physics (Wien, Springer, 1973), ch. 3.
- [6] 国家标准局,硅材料原生缺陷图谱,GBn 266-87,中国标准出版社,1986.
- [7] 黄汉尧,等,半导体器件工艺原理,国防工业出版社,1980.
- [8] 电子工业生产技术手册,第六分册,电子工业出版社,1989.
- [9] K. Kugimiya, J. Elect. Soc., 1983, 130:2123.

## Optical Non-Damaged Evaluation of Si Epitaxial wafer's Surface Defects

Deng Jiangdong, Li Zengfa, Zhang Guangyin and Yan Caifan

(*Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Wang Hongjie

(*Tianjin Semiconductor Factory, Tianjin 300186*)

Received 27 January 1995, revised manuscript received 9 May 1995

**Abstract** The reflection Magic-Mirror Approach (R-MM) is an optical nondamaged method based on the principle of the local distortion of perfect wave-front. In this paper, we have evaluated various Si wafers and epitaxial wafers, and observed about 30 kinds of typical patterns of surface imperfections, including swirl defects, growth tube, impurity stripe, saw marks, start-like structure etc. Mainly, the phenomenon that the epi-layer "amplifies" the defects in the substrate during epi-growth process is found and discussed.

**PACC:** 4260K, 8170C, 6170