

# “魔镜”方法与晶体缺陷的检测<sup>1)</sup>

邓江东 李增发 张光寅 颜彩繁

(南开大学物理系, 天津 300071)

“魔镜”技术是我国西汉时期的一项创造发明, 由此引发的“魔镜”检测方法现在已被有效地应用于各种镜状表面缺陷的检测。本文介绍了“魔镜”检测原理以及我们采用激光技术发展起来的一种“魔镜”检测方法, 并简要报道了用“魔镜”方法检测硅外延片表面缺陷及晶体内部生长不均匀等缺陷的最新成果。

**关键词** 表面缺陷, 无损检测, 魔镜

## Abstract

The “magic mirror” (MM) approach has been used effectively to detect various flaws on mirror-like surface. In this paper, the MM method is improved by using a homogeneous laser beam with perfect wave front. Two kinds of MM instruments, the R-MM and the T-MM, are established for testing the mirror-like surface and transparent crystals, respectively. Various Si epi-wafers are diagnosed and some typical patterns of surface flaws are observed sensitively. Some results of detecting optical-damaged spots and growth imperfections in crystal sheet are also reported.

**Key words** surface defect, none-destructive detection, magic mirror

随着超大规模集成电路技术 (VLSI) 和各种光电子技术的迅速发展, 在现代生产中, 对材料和器件的质量控制更为严格, 检测要求更加苛刻。面对一系列的问题, 例如, 如何无损伤地和实时地检测大面积硅片的表面结构性质, 如何有效地控制异质外延薄层或其他晶体的生长均匀性, 等等, 用以往的常规检测手段, 往往显示出极大的局限性, 难以满足现代检测技术的要求。因此, 人们仍致力于各种先进检测手段的研究和开发。

光学检测技术具有非破坏性, 高灵敏度、对缺陷的高识别性、可直观图示等特点, 而且其设备简单、使用方便。近年来, 一种新型的光学检测技术——“魔镜”检测方法已引起人们的普遍关注。由于这种方法可直接用于观测硅片表面结构缺陷而更受半导体厂家和客户的青睐。这一技术是由日本人 S. Kato<sup>[1]</sup> 首次提出, 但其基本原理来源于我国古代的一项发现——“魔

镜”。本文介绍了“魔镜”检测的基本原理以及我们用“魔镜”方法 (MM) 检测硅外延片表面缺陷以及晶体内部缺陷的最新成果。“魔镜”方法作为一种古老技术和现代科技的结合, 焕发出新的光彩, 在现代检测技术中将开辟一个全新的应用领域。

## 一、“魔镜”和“魔镜”检测原理

“魔镜”是中国西汉时期 (公元前 206 年至公元 25 年) 发明的一种特殊青铜镜。这种青铜镜外形和普通铜镜没有什么不同, 但在阳光下, 镜面反射光照在墙上, 从反射图象中可以看到被铸在镜背面的花纹图案, 见图 1(a, b)。就好像阳光透过镜面从背后反射回来一样, 故古人又称之为“透光镜”<sup>[2]</sup>。这种铸镜工艺自宋代

1) 天津市自然科学基本资助项目。

以后失传，直到 19 世纪末，日本人首次仿制出这种青铜镜，当时引起了世界范围的瞩目。1976 年，我国科学家亦发掘了这一古老技术，彻底揭开了这一中华瑰宝的奥秘。1992 年 6 月，首批赴台学者华中一先生赠送给台湾一高僧的礼物就是一面隐有“佛”字样的“魔镜”。

“魔镜”制作技术被发掘出后，人们热衷于复制各种“魔镜”工艺品。与此同时，科学家们亦在探讨这一古老技术在现代科技领域的新用途。1977 年，S. Kato 受“魔镜”成像原理启发，开发了“魔镜”检测装置，成功地应用于硅片表面的检测，随后，K. H. Yang<sup>[3]</sup>，K. Kugimiya<sup>[4]</sup> 等人也相继报道了他们用“魔镜”方法检测 Si 片、光盘、液晶玻璃等的应用成果。目前，日本已推出商用的硅表面“魔镜”检测系统，如 Yamashita Denso. Co. Ltd. 的 YLS-150 型及 Matsushita Ind. Equip. Co. Ltd. 的 ZX-5100 型等。

“魔镜”检测原理并不复杂。简单地讲，如果任一镜状表面并非完全平整，而是存在肉眼看不见的微小起伏，在均匀光照下，这些起伏凹凸将光线会聚或发散，照射到屏上产生明暗条

纹，如图 2 所示。按几何光学原理可得到下列关系：

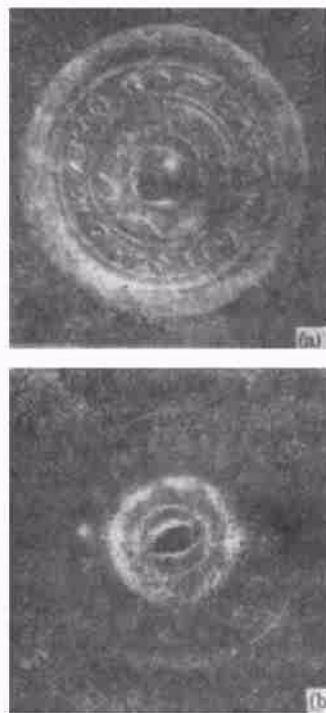


图 1 西汉“见日之光”青铜镜背面 (a) 与反射光图像 (b)

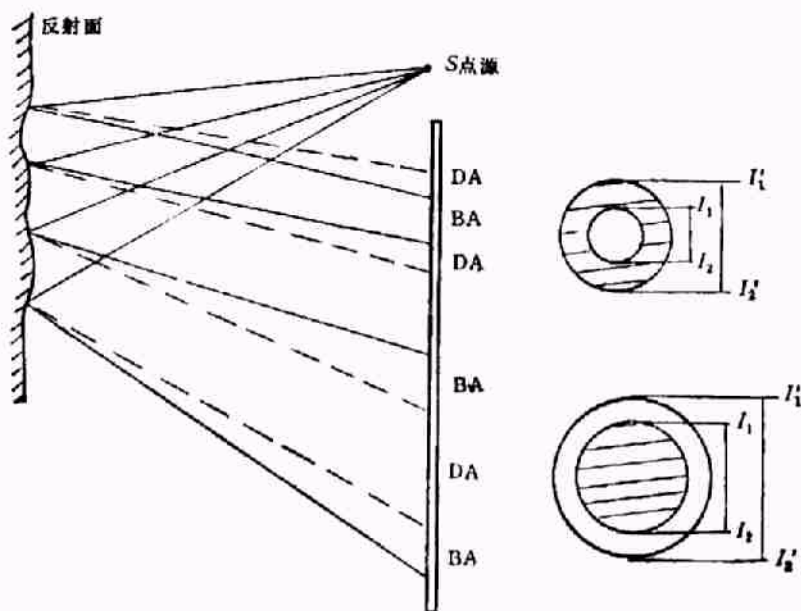


图 2 “魔镜”检测原理  
(DA 为暗区; BA 为亮区)

$$D = I_1 I_2 / (l + L),$$

$$R = 2LI_1 I_2 / [(I_1' I_2' - I_1 I_2)(l + L)],$$

$$h = 2I_1 I_2 (I_1' I_2' - I_1 I_2) / [16(l + L)L],$$

其中  $D, R, h$  分别为表面起伏的曲率半径、起伏跨度和起伏深度(或高度),  $l$  和  $L$  分别表示光源到反射表面和反射表面到屏之间的距离,  $I_1 I_2$  和  $I_1' I_2'$  分别是反射图象中中央暗区(或亮区)的直径和外圈亮环(或暗环)的外径。因此, 由  $l, L, I_1 I_2, I_1' I_2'$  值可估测表面起伏的跨度和深度。例如, 若  $l = 1\text{m}, L = 8\text{m}, I_1 I_2 = 2\text{mm}, I_1' I_2' = 5\text{mm}$ , 则可分辨表面起伏:  $D = 0.2\text{mm}, h = 5\text{nm}$ 。

以上是“魔镜”检测原理的简单的几何光学描述。实际上, 若入射光束具有理想的波面(球面或平行波面), 而反射平面上局域地存在微小起伏, 反射波面将发生相应的微小畸变。如果表面起伏比较大 ( $\gg \lambda$ ), 则仍可按上述的几何光学方法分析; 若表面起伏很小, 由于波面的自折叠效应, 在远场将产生相应的衍射图象, 并可用波动光学方法对此进行定量分析。同样, 当均匀光束入射一具有位相型缺陷的晶体时(如存在内部生长不均匀、杂质条纹等), 透射波面也将发生局部的畸变, 通过一定的位相显示方法, 如相衬法、纹影法等, 可直观地显示这些晶体缺陷的图象。“魔镜”检测方法提供了一种简便的晶体缺陷位相检测方法。

很明显, 获得一束波面理想的单色光束是“魔镜”检测方法的关键。我们采用 He-Ne 激光和空间滤波装置建立起两套“魔镜”检测装置, 分别用于表面缺陷检测(称为反射“魔镜”方法, R-MM)和晶体内部缺陷检测(称为透射“魔镜”方法, T-MM)。由于激光的单色性和空间相干性, 检测分辨率远远高于国外报道的分辨率, 其横向分辨率(波面畸变的跨度)达  $0.1\text{mm}$  量级, 纵向分辨率(波面起伏深度)达  $10\text{nm}$  量级。后者远小于半个波长, 这种分辨能力, 用常规的光学成象方法(如显微镜、光干涉法等)是很难达到的。

## 二、“魔镜”方法在晶体检测上的应用

### 1. 反射“魔镜”方法的应用

反射“魔镜”检测系统主要包括三个部分: 光源、样品台、图象接收器, 其中光源的选择和调节直接影响着系统的成象分辨能力。从文献来看, Kugimiya 等人的“魔镜”检测系统应用范围相当有限, 只能检测表面较大的缺陷, 如表面划痕、表面翘曲、大的研磨或腐蚀孔洞等; 他们的系统检测光路往往很长, 有时大于  $10\text{m}$ , 而且图象分辨率低, 对探测器要求高。其原因在于他们采用发光二极管(LED)作为系统光源, LED 很难作成理想的点光源, 而且只发出复色光, 其分辨能力比较低。

图 3 是我们研制的反射“魔镜”装置。光源是  $632.8\text{nm}$  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, 样品的反射光由一显示屏或一 CCD 摄像机接收。

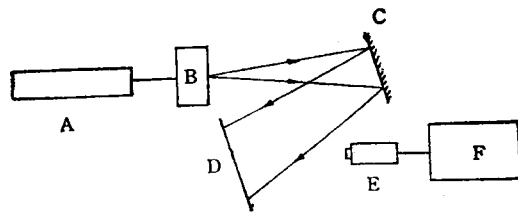


图 3 反射“魔镜”检测法实验装置

A——He-Ne 激光器; B——空间滤波器; C——硅外延片; D——屏; E——CCD 摄像机; F——监视器

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, 这些样品来源于国内外不同厂家(西门子公司、冶金工业部有色金属研究院、天津半导体厂等), 片子直径  $30\text{mm}$  到  $80\text{mm}$  不等, 外延层厚度为  $2-50\mu\text{m}$ 。

一般情况下, 若片子表面质量完好, 将得到均匀的反射“魔镜”图象, 但实际上, 用“魔镜”检测, 这种“完美无缺”的片子极其少见, 总是不同程度地存在着一些缺陷, 这表明该方法对半导体表面缺陷具有很高的灵敏度。我们观测到几十种典型的硅表面缺陷图样, 通过金相腐蚀法等实验手段检验, 并参照国家标准《硅材料原生

缺陷图谱》，发现这些缺陷包括三类：硅单晶生长缺陷，如漩涡缺陷[又称微缺陷，见图 4(a)]、杂质条纹、管道、星型结构等；各种硅片加工缺陷，如刀痕、划痕、塌边、裂纹、凹坑、小丘、抛光痕迹、表面沾污等；硅外延缺陷，如滑移线、多晶点、云雾[见图 4(b)]、桔皮、沾污、麻坑等。其中一些缺陷，如漩涡缺陷，管道等，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。毫无疑问，反射“魔镜”方法为检测大多数硅(外延)片晶体缺陷提供了一方便、直观、无损的途径，可以替代一些常规的硅缺陷检测方法，并有极高的可信度。

我们还用反射“魔镜”方法检测了经过热氧化、离子注入等其他半导体器件工艺后的样片，图 4(c) 即是经光刻后一硅片的局部“魔镜”图样，可明显看到光刻不均匀、衬底有杂质条纹、抛磨不均等缺陷。结果表明，该方法通过对样品的实时观测，可及时发现生产各环节存在的问题，完全适用于器件各工艺流程的有效、实时的在线检验。

反射“魔镜”方法同样适用于其他反射表面质量的检测，如光盘、液晶显示玻璃、各种光栅、集成光学器件等。对表面的各种机械损伤、抛磨质量、生长均匀性等有极高的灵敏度。

总之，作为一种表面质量检测手段，特别是在硅(外延)片晶体缺陷的检测方面，反射“魔镜”方法具有无损、高分辨、高灵敏度、设备简单、可动态显示的特点，既可方便地应用于半导体厂家和客户之间的产品现场洽谈，又适用于器件生产各工艺的实时在线检测，对提高半导体工艺水平具有重要的应用价值。

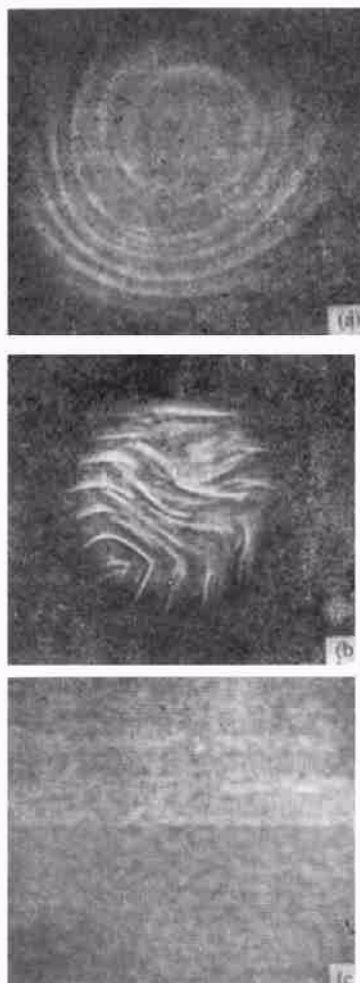


图 4 用反射“魔镜”方法检测半导体表面缺陷  
(a) 漩涡缺陷；(b) 云雾；(c) 光刻后硅片

## 2. 透射“魔镜”检测方法的应用

透射“魔镜”检测方法是我们在反射“魔镜”检测方法基础上发展起来的一种技术，用于晶体的内部均匀性、杂质分布、半导体界面性质等方面的检测。图 5 是透射“魔镜”装置的简单示

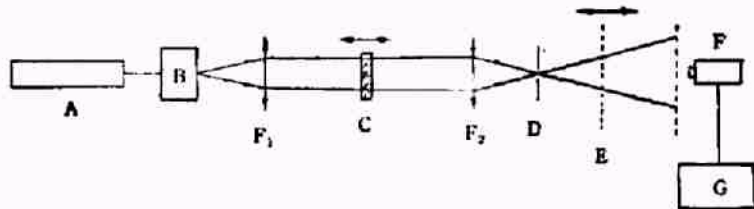


图 5 透射“魔镜”检测法实验装置  
A—激光；B—空间滤波；C—晶体样品；D—空间滤波；E—屏；F—CCD 摄像机；G—监视器； $F_1$ 、 $F_2$ —傅里叶透镜

意图。晶体样品放在一对傅里叶透镜  $F_1$  和  $F_2$  之间。一般地说，如果晶体是均匀的“理想”晶体，光束经  $F_1, F_2$  和晶体后，波面不发生畸变，出射光仍保持均匀。但是，如果晶体中存在缺陷，如生长不均匀，存在杂质条纹和光折变区等，将使透射光局部发生位相的变化，即使透射波面产生局域畸变，这种位相变化可以通过低频滤波，相衬等方法在  $F_2$  的像面上变换成振幅图象，从而实现晶体内部缺陷的显示。

我们选择  $X$  轴向的  $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$  晶片 ( $d = 1.1\text{mm}$ ) 作为观测样品，这一晶片曾被强激光束照射而留有一大小约  $50\mu\text{m}$  的光伤点。图 6 是样片用不同方法处理后在  $F_2$  的像面上的得到的图象。其中 (a) 是样片直接在像面上的图象，除了样片边缘，看不到明显的缺陷；(b) 是在  $F_2$  的后焦面上放置相位板（本实验以  $C$  轴向的  $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$  晶片作相位板）后得到的光伤点相衬图，直观地反应了光伤区域折射率的变化，图中规则的明暗条纹为晶体前后两表面引

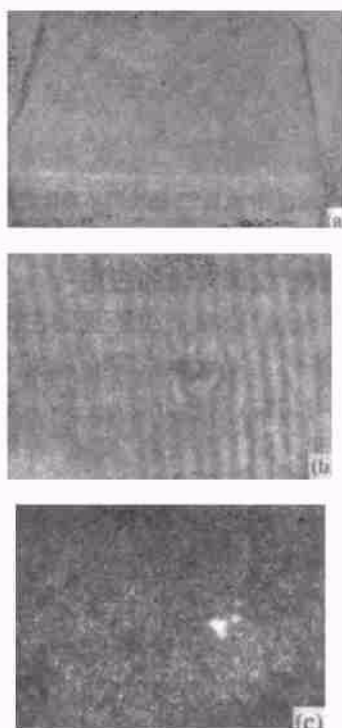


图 6 样片用不同方法处理后在  $F_2$  的像面上得到的图象

(a) 一般图象；(b) 相衬图象；(c) 暗场图象

起的干涉条纹；(c) 为同一光伤点的低频滤波（即暗场法）图象。

我们还用这一装置检测到晶体内部的生长不均匀区和杂质条纹等缺陷。这些结果初步表明，用透射“魔镜”方法检测晶体内部位相型缺陷是简便而有效的。严格地讲，该方法提供了一种位相观测的最基本实验配置，要获得位相变化的振幅图象，还必须借助于相衬法、暗场法等位相变换手段，但由于激光的运用，在此方法上发展起的位相显示方法将有更高的灵敏度、分辨率和实用价值。

### 三、应用前景

激光技术的应用和发展，促使传统的光学检测技术步入一个新的阶段，极大地拓宽了光学检测的应用领域。“魔镜”检测方法无论在原理、方法和应用等方面，都已不是一般意义下的“魔镜”技术，它在这一中国古老技术的基础上，融入现代激光技术，从而引发出一个全新的现代检测概念。随着研究的不断深入，除了上述的一系列应用之外，还可用于下列各个方面：

(1) 集成光学器件中光学波导质量的检测。波导层的均匀性及内界面的平整性是决定其质量的关键，用“魔镜”方法可直观显示界面的均匀性。

(2) 介质中声波或热波的传播实时检测。当声波或热波在介质中传播时，它引起折射率的变化，从而产生透射光相位的变化。

(3) 实时观测一些复杂的物理过程，例如光折变过程。显示出折变区折射率分布图形，甚至可显示出光折变过程中折变区图象的演变过程。

(4)  $\text{GaAs}$  或  $\text{Si}$  器件  $P-N$  结的均匀性、杂质分布、内界面平整性等检测。对  $P-N$  结的质量及内界面的平整性的观测和控制对器件的生产将有重要意义。

(5) 当介质表面有一不可见的红外或紫外图形时，必引起表面折射率的不均匀，用“魔镜”方法可将不可见图象转换为可见图象。

[1] 上海博物馆等,中国“透光”占铜镜的奥秘,上海科学技术出版社,(1982).  
 [2] S. Kato et al., *Inst. Elec. Commun. Eng. Japan SSD-77*, **81** (1977), 33.

[3] K. Kugimiya et al., *J. Cryst. Growth*, **103** (1990), 461.  
 [4] K. H. Yang et al., *J. Elect. Soc.*, **132** (1985), 1214.

## 一种新型的软 X 射线二极管

王红斌 刘忠礼

(西南核物理与化学研究所,成都 610003)

孙宗慈 徐德祺

(北京综合仪器厂,北京 100018)

介绍了用于激光等离子体发射的 X 射线量测量的一种新型的软 X 射线二极管(即 XRD)的结构、原理、性能、标定及其应用。该探测器具有体积小、响应快、使用方便等优点。1990 年和 1991 年已两次成功地用于“神光”装置上激光等离子体发射 X 射线测量。

在激光惯性约束聚变中,激光等离子体发射较强 X 射线辐射,其能谱主要集中于软 X 射线能区(即 0.1—1.5keV)。通过测量发射的软 X 射线可以得到有关激光等离子体相互作用的物理信息。

可以用于测量软 X 射线的探测器有光导探测器(如 InP·Fe 探测器和 GaAs 探测器等)、热电探测器(如 LiTaO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub> 探测器等)和真空 X 射线二极管等。这三种探测器共同之点是时间响应快(亚纳秒量级),且对软 X 射线都可以具有平响应特性。不同之处是光导探测器灵敏度高( $\sim 10^{-4}$ A/W),仅适用于低通量 X 射线测量;热释电探测器灵敏度很低( $\sim 10^{-7}$ A/W),且抗干扰能力差,它的主要优点是不需要加偏压,但仅用于高通量测量;而 X 射线二极管灵敏度介于两者之间( $\sim 10^{-5}$ A/W),既可以用于低通量 X 射线测量,又可以用于较高通量 X 射线量测量。

中国科学院上海光学精密机械研究所在 80 年代初已经研制出一种真空 X 射线二极管,但时间响应慢(几百皮秒),抗干扰能力差。80 年代中期我们研制了一种时间响应快的 X 射线二极管,但体积大,使用不方便。随着惯性约束聚变研究的发展,软 X 射线量测量显得越来越

重要。1990 年初,我们又研制了一种新型的软 X 射线二极管,它具有体积小、响应快、使用方便等优点。该探测器已多次用于激光等离子体发射的 X 射线测量。

### 一、结构、原理及性能

#### 1. XRD 结构、原理

软 X 射线二极管结构及电路图如图 1 所示。X 射线通过 Ni 网阳极入射到金属阴极上产生光电子,光电子在高达  $2.5 \times 10^6$ V/m 的电场作用下,迅速向阳极运动,在外电路中感应出电流脉冲。由于该电流脉冲携带的电荷量与 X 射线光子在阴极上沉积的能量成正比,所以只要测出该探头输出的总电荷量,即可求出 X 射线入射的总能量。

#### 2. 结构参数

探测器主要由阳极 Ni 网和金属阴极组成。Ni 网透过率为 85%,它与阴极表面的距离为 1.2mm,在阴极与阳极之间加有 3kV 的偏压,阴极有效面直径为  $\phi 10$ mm,圆锥形结构,以便于保持 50 $\Omega$  的特性阻抗,且阴极可以更换。

#### 3. 电性能参数

XRD 等效电路如图 1(b) 所示。