

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.02.06

# 大视场双通道 Micro-LED 晶圆缺陷 光学检测系统设计

张义博, 贺文俊\*, 洪惠敏

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为满足微型发光二极管(Micro Light Emitting Diode, Micro-LED)芯片制造过程中多种晶圆缺陷的高精度自动检测需求, 设计了一种大视场偏振双通道 Micro-LED 晶圆缺陷自动光学检测系统。该系统将显微成像技术与偏振成像技术相结合, 增强 Micro-LED 晶圆缺陷图像的对比度, 提升检测准确性; 通过无限共轭显微镜和筒镜的组合使用, 扩大单次曝光中采集到的晶圆样品图像面积, 提高检测效率。开展实验验证大视场双通道 Micro-LED 晶圆缺陷光学检测系统的性能, 结果表明: 该系统放大倍率为 20, 照明均匀性可达 91.6%, 最大像方视场为 33 mm; 该系统的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)曲线在奈奎斯特频率 31 lp/mm 处接近衍射极限, 可满足 0.8  $\mu\text{m}$  的物方分辨力; 该系统测量得到的偏振度图像的信息熵、边缘强度、标准差和平均梯度相较传统灰度图像的平均提升率分别为 25.6%、24.9%、33%、173.3%。大视场双通道 Micro-LED 晶圆缺陷光学检测系统可实时捕获不同类型缺陷的特征信息, 具有识别效率高、漏检率低等优势, 为 Micro-LED 晶圆生产质量高精度检测提供了有力支撑。

**关键词:** 微型发光二极管; 缺陷检测; 光学设计; 偏振

中图分类号: TB96; TN247; O43 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2025) 02-0056-12

## Design of a dual-channel optical inspection system with large field of view for Micro-LED wafer defects

ZHANG Yibo, HE Wenjun\*, HONG Huimin

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to meet the demand for high-precision automatic detection of multiple wafer defects during the manufacturing process of micro light emitting diode (Micro-LED) chips, a large-field-of-view polarisation dual-channel Micro-LED wafer defects automatic optical inspection system has been designed. The system integrates microscopic imaging technology with polarisation imaging technology, thereby enhancing the contrast of Micro-LED wafer defect images and enhancing the detection accuracy. The system utilises infinite conjugate microscopic objectives and barrel lenses, which expand the image area of wafer samples captured in a single exposure and improve the detection efficiency. Experiments have been conducted to verify the performance of the large-field-of-view dual-channel Micro-LED wafer defect optical in-

收稿日期: 2024-12-23; 修回日期: 2025-01-15

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20240101341JC)

引用格式: 张义博, 贺文俊, 洪惠敏. 大视场双通道 Micro-LED 晶圆缺陷光学检测系统设计[J]. 计测技术, 2025, 45(2): 56-67.

**Citation:** ZHANG Y B, HE W J, HONG H M. Design of a dual-channel optical inspection system with large field of view for Micro-LED wafer defects[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(2): 56-67.



spection system, and the results demonstrate that: the system's magnification is 20, the illumination uniformity is up to 91.6%, and the maximum image field-of-view is 33 mm; The modulation transfer function (MTF) curve of the system is close to the diffraction limit at the Nyquist frequency of 31 lp/mm, which can satisfy the object resolving power of 0.8  $\mu\text{m}$ . The system has been shown to enhance the information entropy, edge intensity, standard deviation and average gradient of polarimetric images in comparison to traditional grey-scale images by 25.6%, 24.9%, 33% and 173.3%, respectively. The large-field-of-view dual-channel Micro-LED wafer defect optical inspection system has been demonstrated to capture the characteristic information of different types of defects in real time, with high recognition efficiency, low missed detection rate and other advantages, providing a strong support for the high-precision inspection of Micro-LED wafer production quality.

**Key words:** Micro-LED; defect detection; optical design; polarization

## 0 引言

Micro-LED作为一种新型显示元件,具备高分辨力、低功耗、长寿命等优势,在近眼显示和大尺寸高清显示市场展现出巨大潜力<sup>[1-2]</sup>。实现Micro-LED晶圆缺陷高精度检测对于保障显示屏应用性能符合要求至关重要<sup>[3-4]</sup>。目前Micro-LED晶圆缺陷检测系统主要包括接触型检测系统、无接触型检测系统以及自动光学(Automated Optical Inspection, AOI)检测系统<sup>[5]</sup>。

接触型检测系统使用特殊工具直接接触晶圆电极,根据晶圆电极的发光情况判定其是否存在缺陷。接触型检测系统中,具有代表性的检测原理为电致发光检测,即通过微型探针接触Micro-LED晶圆的2个电极,使晶圆发生电致发光现象,测量Micro-LED的亮度、波长等工作参数,根据这些参数分析晶圆性能是否合格。2018年,ZHENG L L等人提出了一种测量Micro-LED晶圆表面亮度的方法<sup>[6]</sup>,该方法利用特殊电极结构,通过高分辨力显微镜对晶圆图像进行检测,并筛选出亮度不正常的芯片。该方法可精确表征LED芯片段的高度均匀性,缺点是制作电极成本高,检测后期还需去除过渡电极。2019年,REMES K等人提出了一种检测LED芯片发光特性的新方法<sup>[7]</sup>,使用涡流加热的方式使感应电流点亮芯片,并通过同步热成像获得芯片的发光情况。该方法的不足之处在于芯片之间的温度差异会导致热成像的强度分布图无法完全表征晶圆芯片是否有缺陷,因为芯片之间的温度差异会使得缺陷区域的温度变化不明显,导致热成像图像中的缺陷特征不突出,使缺陷识别产生纰漏。

无接触型检测系统不直接接触晶圆表面,而是通过光束激发晶圆量子阶层实现发光,根据发光情况可判断晶圆电极是否存在缺陷。2021年,BEHRMAN K等人基于荧光成像方法实现了Micro-LED晶圆的无接触型缺陷检测<sup>[8]</sup>,实验结果表明:71.75%的晶圆像素能被点亮,且检测效果不受(因LED像素刻蚀导致)短路的影响,但该方法检测精度较低。SZARVAS T等人提出了一种基于低角度照明的非接触式缺陷检测方法<sup>[9]</sup>,通过在标准光散射(Light Scattering, LS)系统中加入低角度照明单元的方式将样品表面进行切割,使光线可以聚焦到晶圆中,实现图形化Micro-LED晶圆缺陷检测。实验结果表明:该方法的检测结果与标准光散射照明系统的检测结果具有良好的相关性。但该方法仅使用了一个低角度照明单元和一个标准的光散射断层扫描系统,光学通道较少,这限制了该方法同时检测多个缺陷类型以及在不同角度下检测缺陷的能力。

AOI检测系统目前应用较为普遍,其原理为:使用光学系统采集Micro-LED晶圆图像后,结合不同的图像进行分析处理,实现缺陷自动分类和识别。2018年,史峥等人利用ZFNet卷积神经网络对Micro-LED晶圆缺陷进行分类<sup>[10]</sup>,通过改进的快速区域卷积神经网络(Faster Region-based Convolutional Network, Faster RCNN),分类器提高检测速率与准确率,最终可以实现9种缺陷类型的筛选,耗时仅为传统局部区域检测算法(Patch-based)的5%。2021年,SHU Y等人提出了一种用于LED芯片表面质量检测的并行深度卷积模型<sup>[11]</sup>,该模型在保证图片清晰度的同时,能够在单幅图片中容

纳更多数量的LED芯片，检测速率与检测精度明显提升，但该深度学习模型在处理复杂背景和微小缺陷时可能存在分辨力不足的问题，容易发生漏检。2023年，邓泉等人提出了一种晶圆金属表面纳米颗粒暗场检测方法<sup>[12]</sup>，通过调控入射光的偏振态与入射角，使得膜层表面颗粒散射光产生偏振特性差异，利用散射光滤除图像处理方法以提高颗粒信号信噪比，最终实现了61 nm的晶圆颗粒形貌探测，单次曝光时间为150 μs，显著提高了检测效率，但该方法受单个暗场检测通道的限制，同时检测多种缺陷类型的能力有待提升。同年，彭星等人设计了一款焦距为50 mm，*F*数(系统焦距与入瞳直径之比)为2，工作距离为300 mm的高反射抑制偏振探测系统<sup>[13]</sup>，该系统利用Q-type非球面设计校正系统像差，同时结合斯托克斯矢量法提取高反射缺陷图像的偏振信息，有效提升了缺陷图像对比度，凸显了缺陷的轮廓信息，但该系统仅实现了偏振单通道检测，只能针对特定缺陷进行识别。

Micro-LED晶圆缺陷的传统AOI检测系统大多采用商业化的显微物镜，由于视场小和光学通道少，检测效率和识别精度均受到限制，容易发生漏检或误判等现象<sup>[14-15]</sup>。针对上述问题，本文提出一种大视场偏振双通道Micro-LED晶圆缺陷光学检测系统，将大视场平场复消色差显微物镜与成像筒镜匹配使用，扩大单次曝光中相机采集到的晶圆样品待检区域；通过偏振通道准确获取Micro-LED晶圆缺陷的偏振信息，提高Micro-LED晶圆缺陷图像的对比度。利用大视场偏振双通道Micro-LED晶圆缺陷光学检测系统开展实验，验证该系统的应用效果。

## 1 光学系统设计

### 1.1 系统组成及工作原理

大视场双通道Micro-LED晶圆缺陷光学检测系统主要由照明系统、照明分光片、自动对焦分光片、自动对焦模块、显微成像系统、分光棱镜、大面阵(Wide Field Of View, WFOV)主检相机及复检偏振相机等部分组成，如图1所示。

照明系统主要由亮度可调的照明光源、准直透镜、平面反射镜组成，为Micro-LED晶圆样品提

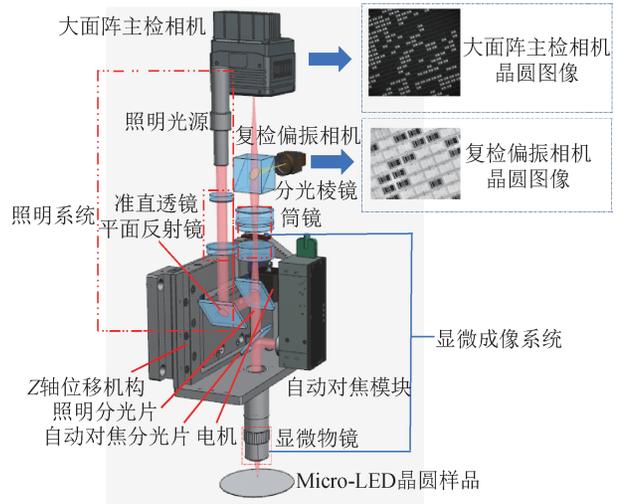


图1 Micro-LED晶圆缺陷检测系统

Fig.1 Inspection system for Micro-LED wafer defects

供均匀、亮度可调的明场照明，以适配不同类型晶圆样品表面的不同光学反射特性。照明系统发出的光线依次经过照明分光片、自动对焦分光片后入射到显微成像系统中的显微物镜，照射在晶圆样品上。随后样品反射光再依次经过显微物镜、自动对焦分光片、照明分光片到达显微成像系统中的筒镜。样品反射光被筒镜会聚，到达分光比为8:2的分光棱镜，会聚光线经分光棱镜分光，之后在大面阵主检相机和复检偏振相机的焦平面上进行成像。自动对焦模块发出780 nm的激光，经自动对焦分光片和显微物镜照射在晶圆样品表面。样品反射光再次经过显微物镜和自动对焦分光片重新到达自动对焦模块，自动对焦模块捕获其离焦信息，随即向电机发送精确的位移指令。电机依据接收到的指令，调控Z轴位移机构，驱动显微物镜沿Z轴上下移动，实现自动对焦功能，确保成像清晰度符合要求。

### 1.2 偏振测量原理

采用斯托克斯矢量法提取Micro-LED晶圆缺陷的偏振信息，具体计算方法如式(1)所示。

$$S(x, y) = \begin{bmatrix} S_0(x, y) \\ S_1(x, y) \\ S_2(x, y) \\ S_3(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0(x, y) + I_{90}(x, y) \\ I_0(x, y) - I_{90}(x, y) \\ I_{45}(x, y) - I_{135}(x, y) \\ I_R(x, y) - I_L(x, y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $S(x, y)$ 为斯托克斯矢量，其由列向量 $S_0(x, y)$ 、 $S_1(x, y)$ 、 $S_2(x, y)$ 、 $S_3(x, y)$ 构成， $(x, y)$ 为

对应的空间坐标;  $S_0(x, y)$ 为入射光强, 由 $0^\circ$ 方向线偏振光的光强 $I_0(x, y)$ 与 $90^\circ$ 方向线偏振光的光强 $I_{90}(x, y)$ 组成;  $S_1(x, y)$ 为 $0^\circ$ 方向线偏振光的光强 $I_0(x, y)$ 与 $90^\circ$ 方向线偏振光的光强 $I_{90}(x, y)$ 之差;  $S_2(x, y)$ 为 $45^\circ$ 方向线偏振光的光强 $I_{45}(x, y)$ 与 $135^\circ$ 方向线偏振光的光强 $I_{135}(x, y)$ 之差;  $S_3(x, y)$ 为右旋圆偏振光的光强 $I_R(x, y)$ 与左旋圆偏振光的光强 $I_L(x, y)$ 之差。

当Micro-LED晶圆表面反射光进入复检偏振相机后, 其偏振态的改变可以用穆勒矩阵描述, 出射光的斯托克斯矢量变换 $S'(x, y)$ 如式(2)所示。

$$S'(x, y) = M \cdot S(x, y) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0(x, y) \\ S_1(x, y) \\ S_2(x, y) \\ S_3(x, y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $M$ 为 $4 \times 4$ 的穆勒矩阵, 不同下角标的 $M_{ij}$ 均为矩阵变换系数。

利用式(3)计算得到每个像素点的偏振度(Degree of Polarization, DOP), 形成偏振度图像。

$$D_{DOP} = \frac{\sqrt{(S_1')^2 + (S_2')^2 + (S_3')^2}}{S_0'} \quad (3)$$

式中:  $D_{DOP}$ 为偏振度;  $S_0'$ 为出射光的光强, 由 $0^\circ$ 方向线偏振出射光的光强与 $90^\circ$ 方向线偏振出射光的光强组成;  $S_1'$ 为 $0^\circ$ 方向线偏振出射光的光强与 $90^\circ$ 方向线偏振出射光的光强之差;  $S_2'$ 为 $45^\circ$ 方向线偏振出射光的光强与 $135^\circ$ 方向线偏振出射光的光强之差;  $S_3'$ 为右旋圆偏振光出射光强与左旋圆

偏振光出射光强之差。

### 1.3 光学系统参数设计

大视场双通道Micro-LED晶圆缺陷光学检测系统设计指标如表1所示。

#### 1) 物方分辨力计算

照明光源发出的光线工作波长范围为486 ~ 656 nm, 显微物镜数值孔径为0.45, 根据瑞利判据计算系统分辨力 $\sigma$ , 公式为

$$\sigma = \frac{0.61\lambda}{N} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$ 为照明光源中心波长,  $N$ 为显微物镜的数值孔径。计算得到光学系统物方分辨力最大值为 $0.9 \mu\text{m}$ 。

#### 2) 放大倍率计算

显微物镜适配的筒镜焦距为200 mm, 显微物镜焦距为10 mm。系统的放大倍率与筒镜焦距和显微物镜焦距有关。系统放大倍率 $\beta$ 计算公式为

$$\beta = \frac{f_1}{f_2} \quad (5)$$

式中:  $f_1$ 为筒镜焦距,  $f_2$ 为显微物镜焦距。计算得到系统放大倍率为20。

#### 3) 视场计算

选用的大面阵主检相机为海康威视生产的MV-CH250-21GC-F-NF型号, 复检偏振相机为LUCID生产的PHX050S-PC型号。相机主要参数如表2所示, 其中,  $H$ 为大面阵主检相机和复检偏振相机的靶面长度,  $V$ 为大面阵主检相机和复检偏振相机的靶面宽度。

根据两相机的靶面尺寸, 由式(6)计算得到大

表1 光学系统设计指标

Tab.1 Design specifications of the optical system

显微物镜 焦距/mm	显微物镜 数值孔径	筒镜焦距 /mm	物方分辨力 / $\mu\text{m}$	大面阵主检相机 视场/mm	复检偏振相机 视场/mm	工作波长 /nm
10	0.45	200	$\leq 0.9$	33	11	486 ~ 656

表2 相机主要参数

Tab.2 Primary specifications of the camera

相机型号	分辨力	像元尺寸/ $\mu\text{m}$	靶面尺寸/mm
MV-CH250-21GC-F-NF	5 120 × 5 120	4.5	23(H) × 23(V)
PHX050S-PC	2 448 × 2 048	3.45	8.45(H) × 7.07(V)

面阵主检相机的像方视场  $F_{FOV}$  为 33 mm，复检偏振相机的  $F_{FOV}$  为 11 mm。

$$F_{FOV} = \sqrt{(H)^2 + (V)^2} \quad (6)$$

### 1.4 显微物镜设计

不同像差会影响显微物镜对 Micro-LED 晶圆缺陷的识别效果。球差会显著降低整体图像的对比例，慧差和色差会影响成像的对称性，导致局部 Micro-LED 晶圆缺陷识别精度降低，场曲和畸变则会影响 Micro-LED 晶圆缺陷图像的几何形状和尺寸，可能导致不同类别的 Micro-LED 晶圆缺陷被误判或漏检。因此，在确定了显微物镜的焦距和数值孔径之后，还需要考虑像差的矫正。采用平场复消色差<sup>[13]</sup>的显微物镜设计形式，经过优化后得到的光学参数如表 3 所示。

显微物镜光学结构如图 2 所示。第一透镜组包含 2 个凸凹正透镜和 1 个双凹负透镜，用于矫正场曲和畸变；第二透镜组由 1 个三胶合透镜和 1 个双

胶合透镜组成，旨在实现复消色差；第三透镜组则由 1 个双凹负透镜和 2 个凸凹正透镜组成，用于校正系统产生的球差并提供所需的光焦度。第一透镜组和第二透镜组之间的间隔为 10.164 mm，第二透镜组和第三透镜组之间的间隔为 2.142 mm，镜片口径限制在 10 mm 以内。最终设计的系统总轴长度为 95 mm，焦距为 10 mm。

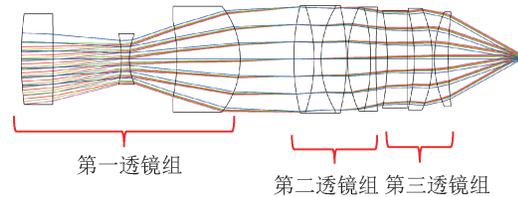


图2 显微物镜光学结构

Fig.2 Layout of the microscope objective

表3 显微物镜光学参数

Tab.3 Optical parameters of the microscope objective

表面序列	半径/mm	厚度/mm	材料
1	57.494	6.00	H-ZF73GT
2	-623.237	13.12	
3	-18.440	1.50	H-LAK59A
4	10.090	9.03	
5	-29.810	12.00	H-FK61
6	-13.674	10.16	
7	35.507	3.90	H-LAK59A
8	-25.991	1.30	H-ZLAF76
9	15.896	4.80	H-ZPK7
10	-35.470	0.21	
11	19.686	4.40	H-ZPK7
12	-32.338	1.00	H-ZF50
13	133.466	2.14	
14	-40.259	3.80	H-ZLAF66GT
15	-6 553.562	1.33	
16	-31.608	3.42	H-ZLAF56B
17	-20.404	0.40	
18	18.600	2.60	H-ZF73
19	57.131	14.00	

胶合透镜像差如图 3 所示。图 3(a)为显微物镜点列图，在全视场范围下，系统的均方根(Root Mean Square, RMS)半径小于艾里斑半径，光斑能量集中，同时艾里斑半径数值为  $0.8 \mu\text{m}$ ，满足物方分辨力的设计指标。图 3(b)为显微物镜 MTF 曲线，通过显微物镜分辨力计算得出奈奎斯特频率为 625 lp/mm，在该频率下，MTF 曲线接近衍射极限，且光学传递函数(Optical Transfer Function, OTF)模值大于 0.4。图 3(c)为显微物镜场曲，图 3(d)为显微物镜畸变，全视场场曲值小于  $2 \mu\text{m}$ ，畸变值小于 0.5%，说明整个视场的清晰度变化较小，图像不失真。图 3(e)为显微物镜色焦移，在 486 ~ 656 nm 波长范围内，0.707 光瞳区域的最大色焦移仅为  $0.71 \mu\text{m}$ 。以上结果表明：显微物镜各像差得到了有效矫正，系统成像质量良好。

### 1.5 照明系统设计

进行照明系统光学设计时，在突出背景缺陷对比度的同时，需避免光源成像对样品成像的干扰。本系统采用科勒照明的方式进行设计，这样可以保证样品表面是光源频谱面，即使测试光强分布不均匀，也可以避免眩光和伪影的产生。照明系统中的参数关系如图 4 所示，光源端面直径为 4 mm， $N$  为 0.2，则物高  $y_1$  为 2 mm。显微物镜视场为 1.65 mm，则最终像高  $y_3$  为 0.825 mm。根据系统几何参数和拉赫不变量可知，系统孔径角  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$  满足以下关系<sup>[14]</sup>

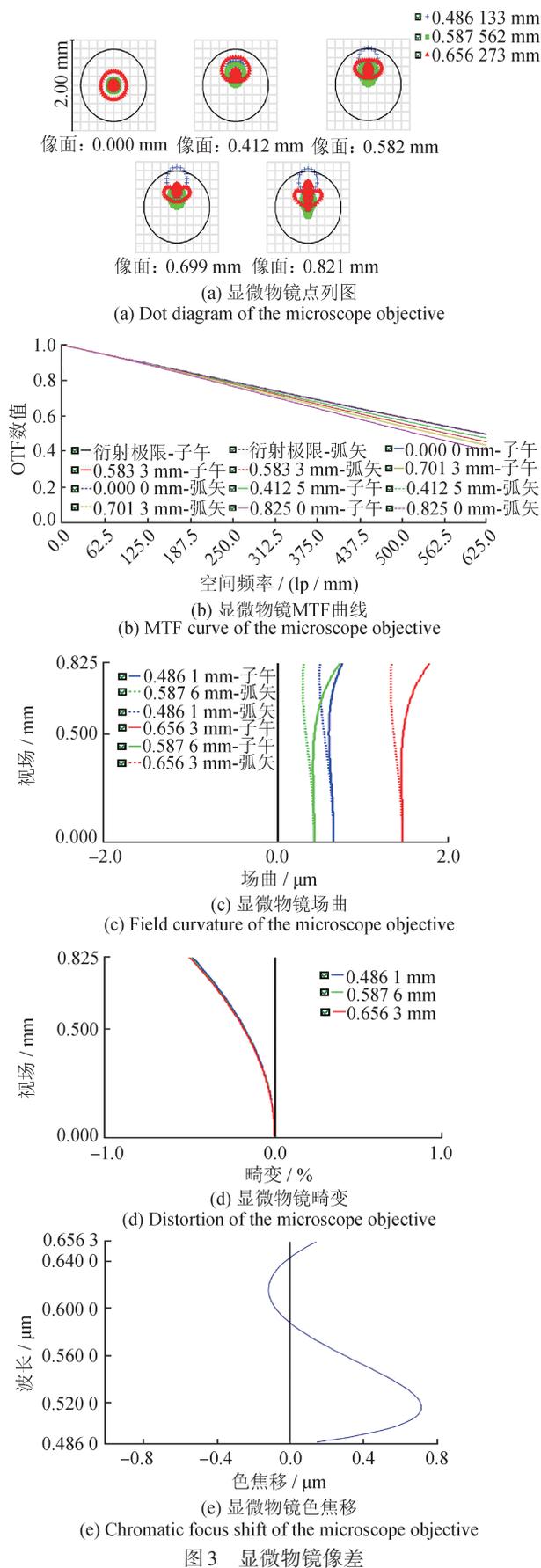


图3 显微物镜像差

Fig.3 Aberration of the microscope objective

$$\tan u_2 = \tan u_3 = \frac{y_3}{f'} \quad (7)$$

$$n_1 \cdot y_1 \cdot \sin u_1 = n_2 \cdot y_2 \cdot \sin u_2 \quad (8)$$

式中： $y_2$ 为光源像高， $n_1$ 、 $n_2$ 为介质折射率， $f$ 为焦距。因系统位于空气中，有 $n_1 = n_2 = 1$ ，则根据式(9)计算得到 $y_2$ 为4.87 mm。

$$y_1 \cdot N = y_2 \cdot \sin u_2 \quad (9)$$

照明光源发出的光束经准直透镜、平面反射镜、照明分光片、自动对焦分光片后，由显微镜成像于晶圆表面，形成均匀且无灯丝像的照明光斑。准直透镜采用双胶合镜组的方式进行设计，两透镜均由弯月形负透镜和双凸面透镜胶合而成，结合4种不同材料的色散特性补偿色差。在两准直透镜之间加入孔径光阑来调节光束孔径，改善成像效果。系统定义孔径类型为照明光源的数值孔径，通过Zemax软件优化设计，得到准直透镜的具体光学参数如表4所示，照明系统光学结构图如图5所示。

表4 准直透镜光学参数

Tab.4 Optical parameters of collimating lens

表面序列	半径/mm	厚度/mm	材料
1(光源面)	$\infty$	50.00	
2	-1 167.419	2.00	H-ZF7LA
3	55.369	8.50	H-ZBAF52
4	-33.529	30.12	
5(孔径光阑)	$\infty$	20.00	
6	102.999	6.00	H-ZK4
7	-34.5	20.00	H-ZLAF56B
8	-193.096	40.00	

对上述照明系统设计进行辐照度和照明均匀性研究，使用蒙特卡罗光线追迹法，生成1 000万条光线，得到辐照度分布如图6所示。分析图6可以得出：辐照面上光斑照度呈圆形均匀分布，光斑能量集中在直径约为1.65 mm的圆形范围内，在此区域内X方向最大辐照度为0.663 0 W/mm<sup>2</sup>，最小辐照度为0.607 1 W/mm<sup>2</sup>，Y方向最大辐照度为0.663 0 W/mm<sup>2</sup>，最小辐照度为0.607 2 W/mm<sup>2</sup>。照明均匀性U计算公式为

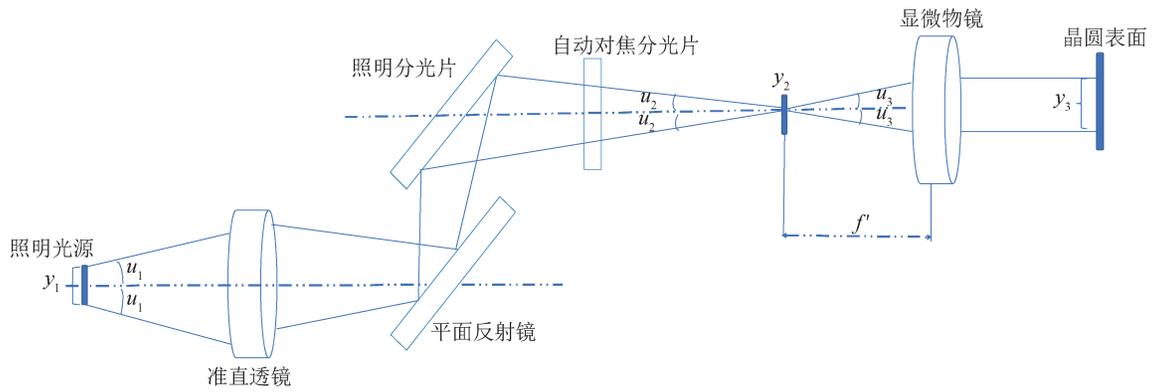


图4 照明系统中的参数关系  
Fig.4 Parameter relationships in lighting systems

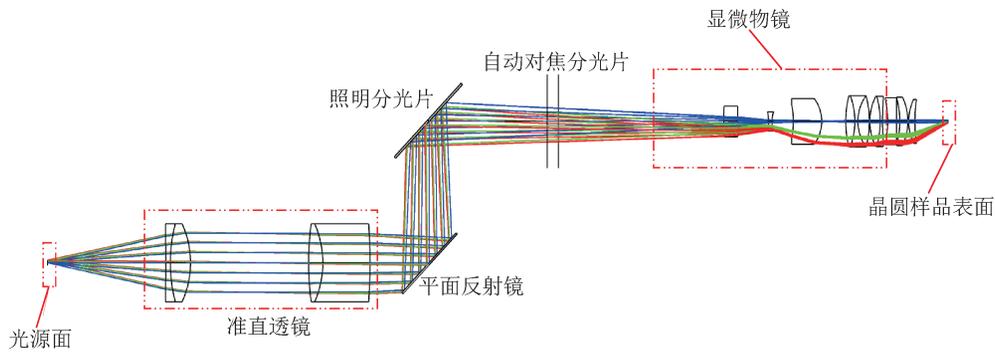


图5 照明系统光学结构  
Fig.5 Optical layout of the illumination system

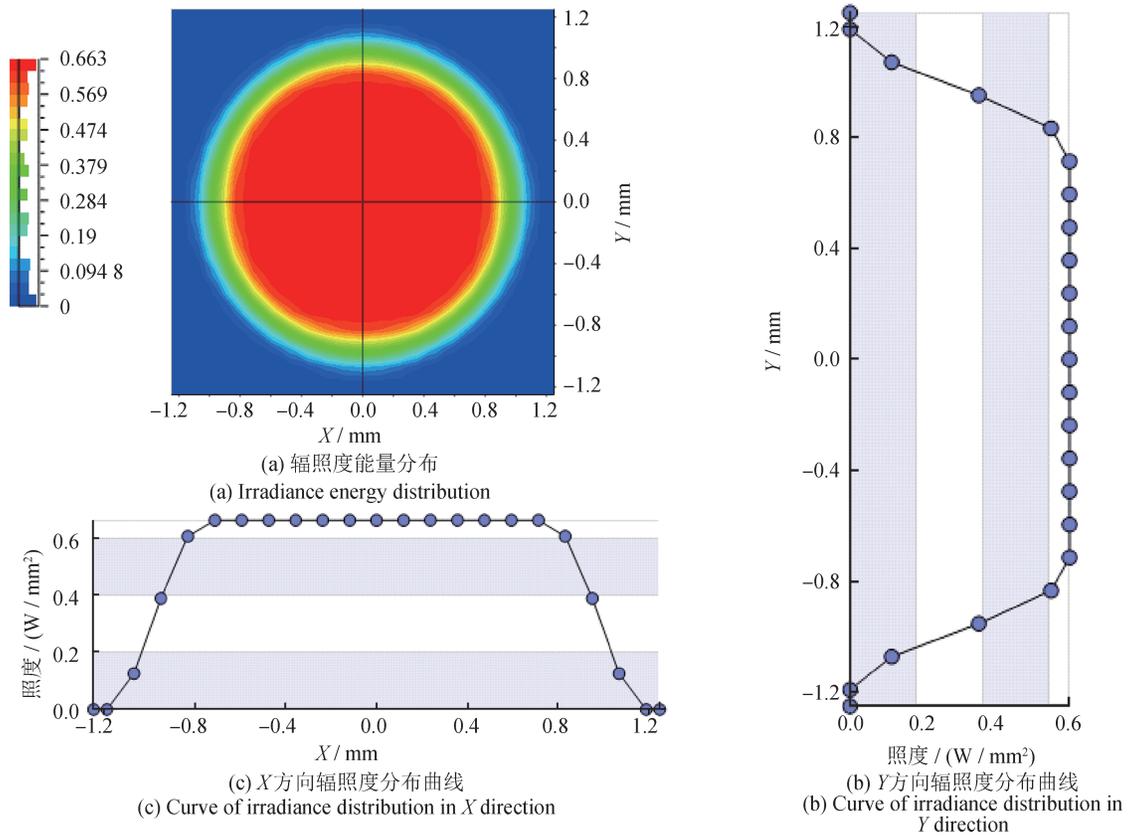


图6 辐照度分布  
Fig.6 Distribution of irradiance

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \quad (10)$$

式中： $E_{\min}$ 和 $E_{\max}$ 分别为光斑能量集中范围内的最小辐照度和最大辐照度。计算得到本系统的 $U$ 为91.6%。

### 1.6 显微成像系统设计

将晶圆表面作为系统物面，分别以大面阵主检相机和复检偏振相机靶面作为光学系统共轭像面进行设计。

显微物镜的物方分辨力为 $0.8 \mu\text{m}$ ，加入筒镜后的系统放大倍率为20，可以得到在大面阵主检相机和复检偏振相机的像面上，能被分辨的两物点之间最短距离 $\sigma_1$ 为 $16 \mu\text{m}$ 。根据式(11)所示的奈奎斯特采样定理，计算得到显微成像系统的奈奎斯特截止频率 $N_1$ 为 $31 \text{ lp/mm}$ 。

$$N_1 = \frac{1}{2\sigma_1} \quad (11)$$

筒镜结构参数如表5所示，显微成像系统光学结构模型如图7所示。

表5 筒镜结构参数

表面序列	曲率	厚度/mm	材料
1	1079.143	15.00	H-KF61
2	-32.481	8.00	H-BAK3
3	-2 326.274	14.85	
4	74.560	10.00	H-FK61
5	-139.762	3.18	
6	60.776	8.00	H-BAK3
7	37.395	28.00	

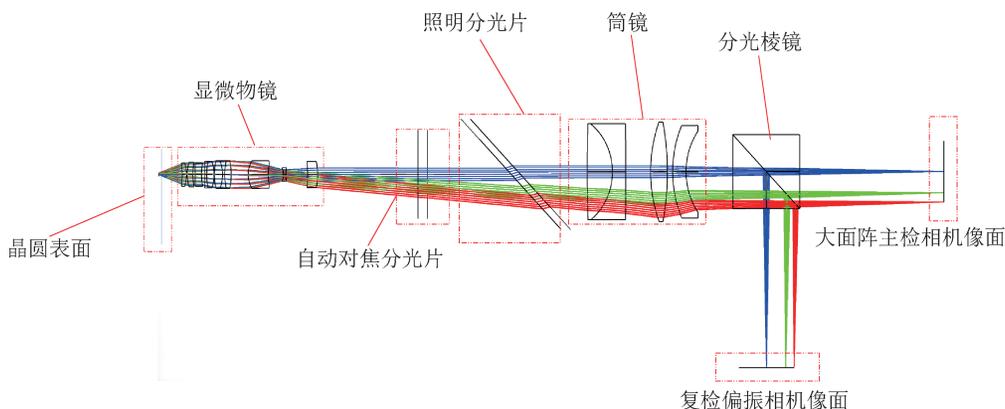


图7 显微成像系统光学结构

Fig.7 Optical layout of the microscopic imaging system

显微成像系统像差曲线如图8所示。图8(a)为显微成像系统点列图，不同视场下的RMS半径分别为 $2.180$ 、 $1.366$ 、 $3.098 \mu\text{m}$ ，均在艾里斑范围之内，且小于大面阵主检相机和复检偏振相机的像元尺寸 $4.5 \mu\text{m}$ 和 $3.45 \mu\text{m}$ ，光斑能量集中。图8(b)为显微成像系统MTF曲线，该曲线在 $31 \text{ lp/mm}$ 处接近理论上的衍射极限，OTF模值大于0.5；图8(c)为显微成像系统场曲，在最大视场范围内，弧矢场曲为 $0.2115 \text{ mm}$ ，子午场曲为 $0.1069 \text{ mm}$ ，同时在不同工作波段下的场曲线间距很小，这表明系统的像散较小；图8(d)为显微成像系统畸变，在大面阵主检相机和复检偏振相机中接收的图像具有较高的清晰度，最大畸变仅为

$0.4831\%$ 。上述指标说明显微成像系统的整体成像性能良好，满足设计要求。

## 2 实验

为验证大视场双通道Micro-LED晶圆缺陷光学检测系统的实际应用效果，搭建如图9所示的实验平台并开展实验。

Micro-LED晶圆样本成像效果如图10所示，其中，图10(a)为20倍显微物镜下观察到的Micro-LED晶圆样本大面阵主检相机成像效果；图10(b)为偏振角度为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 时复检偏振相机的成像效果；图10(c)为计算得到的偏振度图像；图10(d)为缺陷放大图像。实验结果表明：大面阵主检相机在晶圆样本检测数量方面具有显著优势，

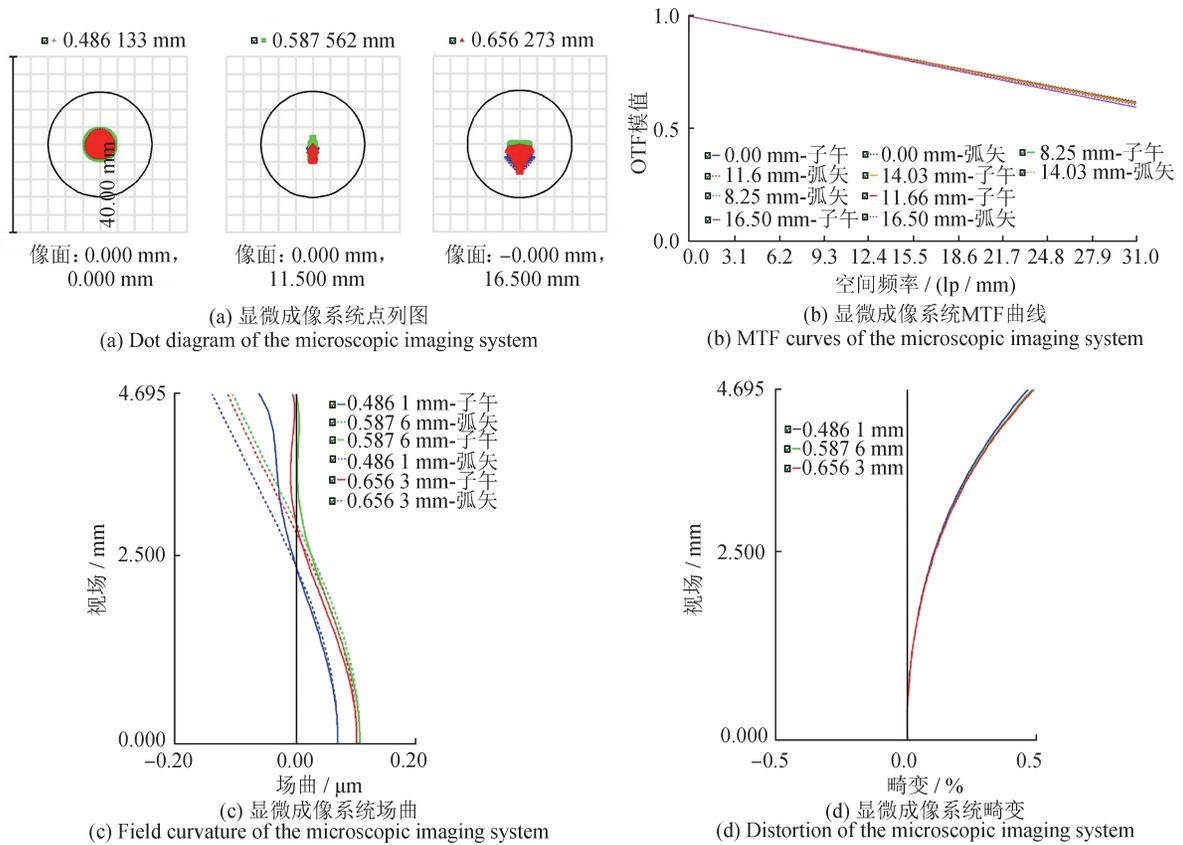


图8 显微成像系统像差

Fig.8 Aberration of the microscopic imaging system

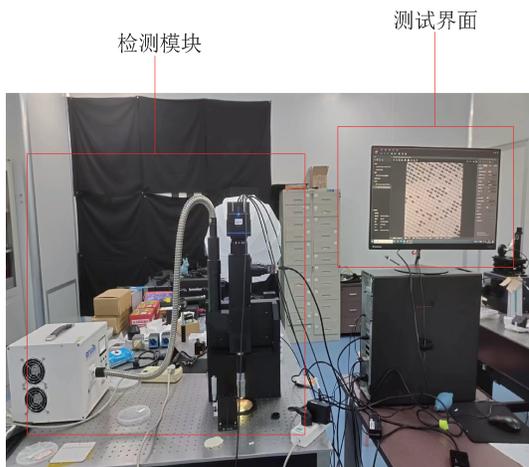


图9 实验装置图

Fig.9 Schematic diagram of experimental setup

可显著提高晶圆的检测效率；DOP图像具有更均匀的灰度分布，图中标记的晶圆表面划痕和坏点的缺陷信息边缘轮廓更加明显，说明DOP图像不仅提升了缺陷与背景区域的对比度，同时直观反映了缺陷的特征信息。

为了客观评估DOP图像的质量，将其与大面

阵主检相机图像进行性能指标对比。采用信息熵、边缘强度(Edge Intensity, EI)、标准差(Standard deviation, SD)、平均梯度(Average Gradient, AG)<sup>[15]</sup>对图像质量进行评估。信息熵是一种图像特征的统计形式，反映了图像中平均信息量的多少，图像信息熵越大，说明图像包含的信息量越多。信息熵*E*的计算公式为

$$E = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (12)$$

式中： $p_i$ 为灰度值等于*i*的像素个数与图像总像素个数之比，*n*为灰度级总数。

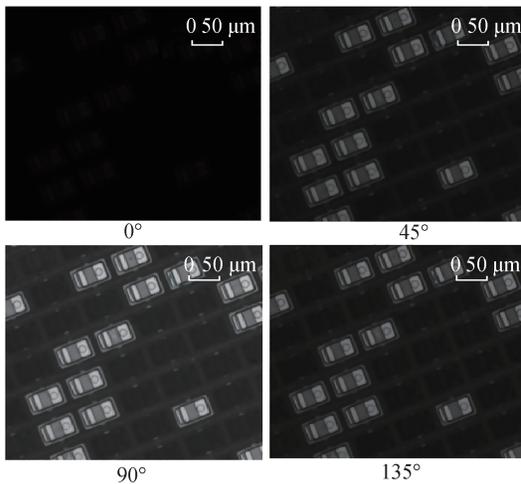
边缘强度实质上是边缘点梯度的幅值，反映了图像边缘的明显程度，是图像边缘检测的重要参数。边缘强度 $E_{EI}$ 的计算公式为

$$E_{EI} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_0} \sum_{j=1}^{N_0} s_x(i,j)^2 + s_y(i,j)^2}}{M_0 \cdot N_0} \quad (13)$$

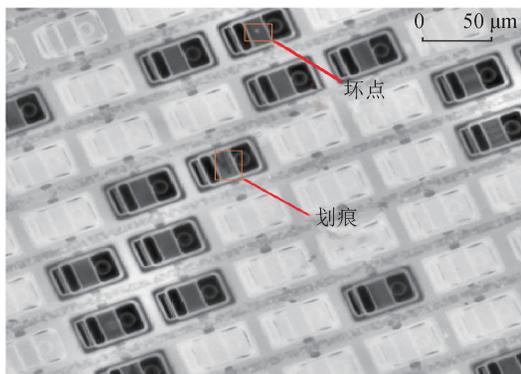
式中： $s_x(i, j)$ 和 $s_y(i, j)$ 为Sobel算子在坐标(*i, j*)处的卷积结果， $M_0$ 为图像的宽度， $N_0$ 为图像的高度。



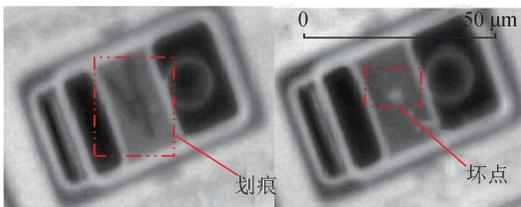
(a) 大面阵主检相机晶圆图像  
(a) Wafer image of the large-area primary inspection camera



(b) 不同偏振角度条件下的偏振图像  
(b) Polarimetric images acquired at distinct polarization angles



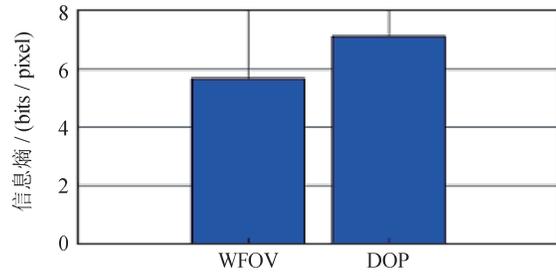
(c) 偏振度图像  
(c) Imagery depicting the degree of polarization



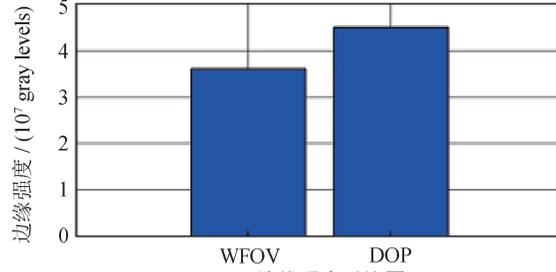
(d) 缺陷放大图像  
(d) Image of magnified defects

图10 Micro-LED晶圆样本成像图

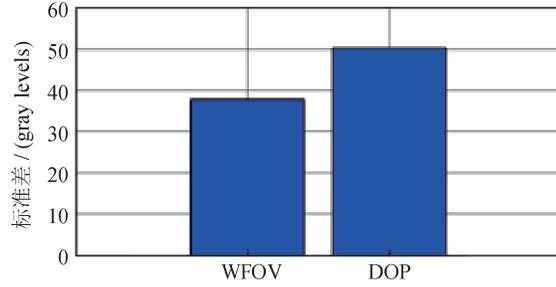
Fig.10 Imaging of Micro-LED wafer specimens



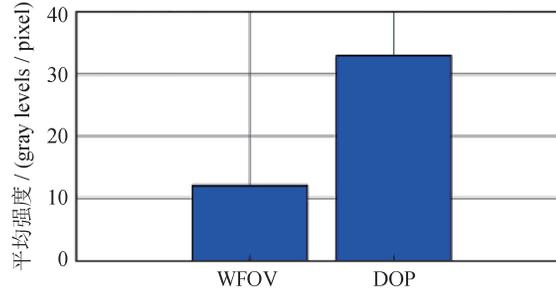
(a) 信息熵对比图  
(a) Comparative diagram of information entropy



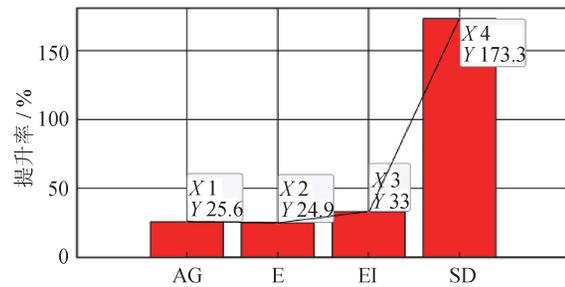
(b) 边缘强度对比图  
(b) Comparative diagram of edge intensity



(c) 标准差对比图  
(c) Comparative diagram of standard deviation



(d) 平均梯度对比图  
(d) Comparative diagram of average gradient



(e) 4种指标提升率图  
(e) Graphical representation of the enhancement ratios for four metrics

图11 偏振度图像质量评估

Fig.11 Assessment of image quality based on polarization degree

标准差是衡量图像灰度值分布离散程度的统计量，能够反映图像灰度值的波动范围。标准差 $S_{SD}$ 的计算公式为

$$S_{SD} = \sqrt{\frac{1}{M_0 \cdot N_0} \sum_{i=1}^{M_0} \sum_{j=1}^{N_0} (I(i,j) - \mu)^2} \quad (14)$$

$$A_{AG} = \frac{\sum_{i=1}^{M_0-1} \sum_{j=1}^{N_0-1} (|I(i+1,j) - I(i,j)| + |I(i,j+1) - I(i,j)|)}{2M_0 \cdot N_0} \quad (15)$$

偏振度图像质量评估结果如图11所示。相较于WFOV图像，DOP图像信息熵、边缘强度、标准差和平均梯度的平均提升率分别为25.6%、24.9%、33%、173.3%。说明DOP图像能够提供更丰富的缺陷信息，且DOP图像中缺陷对比度更高，可完整显示缺陷的边缘轮廓信息。

### 3 结论

针对Micro-LED晶圆缺陷的检测需求，设计了一款大视场双通道Micro-LED晶圆缺陷光学检测系统。大面阵主检相机检测通道基于无限共轭显微物镜和筒镜的组合设计，将最大像方视场提升到33 mm，显著提高了晶圆的检测范围。将复检偏振相机检测通道计算得到的DOP图像与大面阵主检相机采集的传统灰度图像进行对比，结果表明：DOP图像能够更清晰地反映缺陷特征信息。大视场双通道Micro-LED晶圆缺陷光学检测系统有效提高了晶圆缺陷的识别效率和检测准确性，为显示器件生产质量管控提供了重要保障，具有技术借鉴价值。

#### 参考文献

- [1] LI S B, SONG B F, PETERSON T, et al. MicroLED chromatic confocal microscope[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2722-2725.
- [2] DICKSON G. Aledia touts MicroLED chip progress[J]. *Information Display*, 2021, 37(2). DOI: 10.1002/msid.1189.
- [3] 徐峰. MicroLED显示技术发展概述[J]. *数字通信世界*, 2021(5): 45-46.  
XU F. Overview of MicroLED display technology [J]. *World of Digital Communications*, 2021(5): 45-46. (in Chinese)
- [4] CHAJI R, SIBOBI H Z, FATHI E. Large-area low-cost MicroLED TV displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2022, 53(51): 208-211.
- [5] 苏昊, 李文豪, 李俊龙. 晶圆级 Micro-LED 芯片检测技术研究进展[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(5): 582-594.  
SU H, LI W H, LI J L. Research progress of wafer-level Micro-LED chip detection technology [J]. *LCD and Display*, 2023, 38(5): 582-594. (in Chinese)
- [6] ZHENG L L, GUO Z Q, WEI Y, et al. Research on a camera-based microscopic imaging system to inspect the surface luminance of the micro-LED array [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 51329-51336.
- [7] REMES K, FABRITIUS T. Non-contact characterization of flexible hybrid electronics by synchronized thermography [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 69(5): 2390-2397.
- [8] BEHRMAN K, FOUILLOUX J, IRELAND T, et al. Early defect identification for micro light-emitting diode displays via photoluminescent and cathodoluminescent imaging [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(4): 264-274.
- [9] SZARVAS T, MOLNAR G, NADUDVARI G, et al. Bulk micro-defect detection with low-angle illumination [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(4). DOI: 10.1063/5.0027147.
- [10] 邢鑫, 史峥. 基于卷积神经网络的晶圆缺陷检测与分类算法[J]. *计算机工程*, 2018, 44(8): 218-223.  
FANG X, SHI Z. Wafer defect detection and classification algorithm based on convolutional neural network [J]. *Computer Engineering*, 2018, 44(8): 218-223. (in Chinese)
- [11] SHU Y, LI B, LIN H. Quality safety monitoring of LED chips using deep learning-based vision inspection methods [J]. *Measurement*, 2021, 168(4). DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108123.
- [12] 邓泉, 赵泽宇, 林鹤. 晶圆金属表面纳米颗粒暗场检测

系统设计[J]. 中国激光, 2023, 50(22): 98-108.

DENG Q, ZHAO Z Y, LIN H. Design of dark field detection system for nanoparticles on wafer metal surface [J]. China Laser, 2023, 50(22): 98-108. (in Chinese)

- [13] 彭星, 翟德德, 石峰. 高反射工件表面缺陷偏振检测光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 365-378.

PENG X, ZHAI D D, SHI F. Design of polarization detection optical system for surface defects of high reflective workpiece [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(6): 365-378. (in Chinese)

- [14] 薛金来, 巩岩, 李佃蒙. N. A. 0.75平场复消色差显微物镜光学设计[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 957-963.

XUEJ L, GONGY, LIR M. N. A. 0.75 Optical design of flat-field achromatic microscope objective [J]. China Optics, 2015, 8(6): 957-963. (in Chinese)

- [15] 陈鲁, 李志强. 面板检测用显微镜光学系统设计[J]. 光学仪器, 2021, 43(1): 42-48.

CHEN L, LI Z Q. Optical system design of microscope for panel detection [J]. Optical Instruments, 2021, 43(1):

42-48. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨, 米若鑫)



**第一作者:** 张义博(2000—), 男, 硕士, 主要研究方向为现代光学测试理论与技术。



**通信作者:** 贺文俊(1987—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为先进光学成像技术。