

白皮书

MicroLED显示器均匀性测量和校正

如何测量亚像素的亮度和色度以进行校正 (Demura) 和质量控制



A Konica Minolta Company

MicroLED显示器均匀性测量和校正

如何测量亚像素的亮度和色度以进行校正 (Demura) 和质量控制

引言

MicroLED（也称为micro-LED、mLED或 μ LED）显示器的性能优点很突出，开辟了新一代背光和直显照明技术。MicroLED显示器通常由微小的LED（发光二极管）阵列组成，这些LED构成显示器的单个像素和亚像素元件。相比其他显示器技术，这种无机发光技术具有许多优点，包括高亮度和高对比度、宽色域、超长寿命和高像素密度，可以改进各种环境光线条件（从完全黑暗到全日光）和多种视角下的视觉性能。

这些特性使得microLED特别适用于智能手机和手表、增强现实和混合现实（AR/MR）设备、车载显示面板和数字标牌等应用。MicroLED的优点正在推动业界大量投资于这项技术，并推高市场预测。据预计，microLED显示器销量到2025年将达到3.3亿台。¹

然而，在实现具有可行性的量产和市场商业化之前，制造商们必须解决制造高质量的microLED面板所面临的挑战。终端消费者期望能够以可承受的价格获得高水平的视觉质量和性能。为了将组件和生产成本控制较低的水平，制造商们需要采用质量控制解决方案，以减少生产浪费，同时提高产品良率。

不同于传统LCD显示器依赖于均匀的背光光源，microLED本身就是独立的发光器，通常在像素层面呈现出亮度和色度变化性。这种变化性使得制造商必须单独对每个microLED进行测量和调整，以确保整个显示器的视觉均匀性。用于microLED制造应用的测量和校正系统必须能够精确量化每个发光元件（单个LED或亚像素）的输出。同时，该系统必须具有非常短的节拍时间，能够快速校正单个显示器中的大量发光器，以支持量产流程，并维持低浪费水平。

本白皮书探讨了制造商们如何能够使用成像色度计并结合应用独特的设备规格、标定和软件功能来满足microLED的测量和校正需求。我们将通过测试数据和现实世界中的应用来证明各种测量和校正方法的优缺点。

MicroLED显示器均匀性方面的挑战

实现一致、均匀的外观一直是microLED显示器开发、生产和商业化过程中所面临的重大挑战。作为独立的发光元件，microLED可以独立驱动，并可能在亮度（图1）和色度（图2）方面呈现出高度的变化性。除非进行校正以改进外观，否则，这种变化性会导致microLED显示器无法使用。

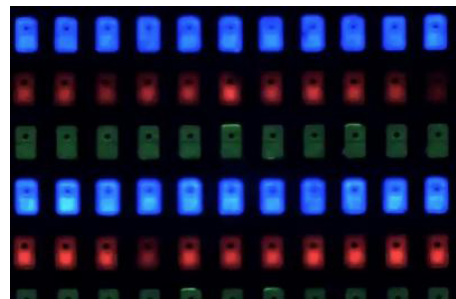


图 © PlayNitride

MicroLED亚像素阵列，其在背板上的矩阵中使用非常小的 (<100 μ m) 红光、绿光和蓝光LED芯片。

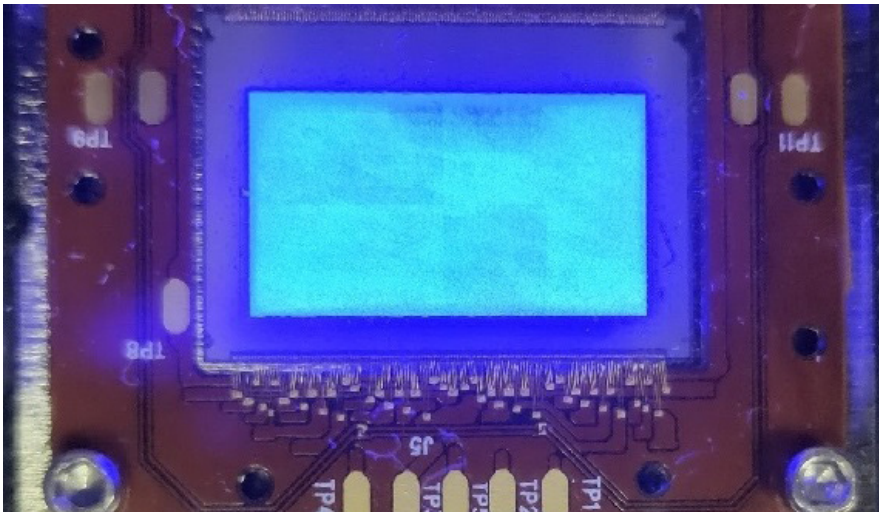


图 1 - 这张microLED面板近景图片展示了由于显示器上像素输出的变化所引起的潜在亮度和色度均匀性问题。

自发光显示屏示例

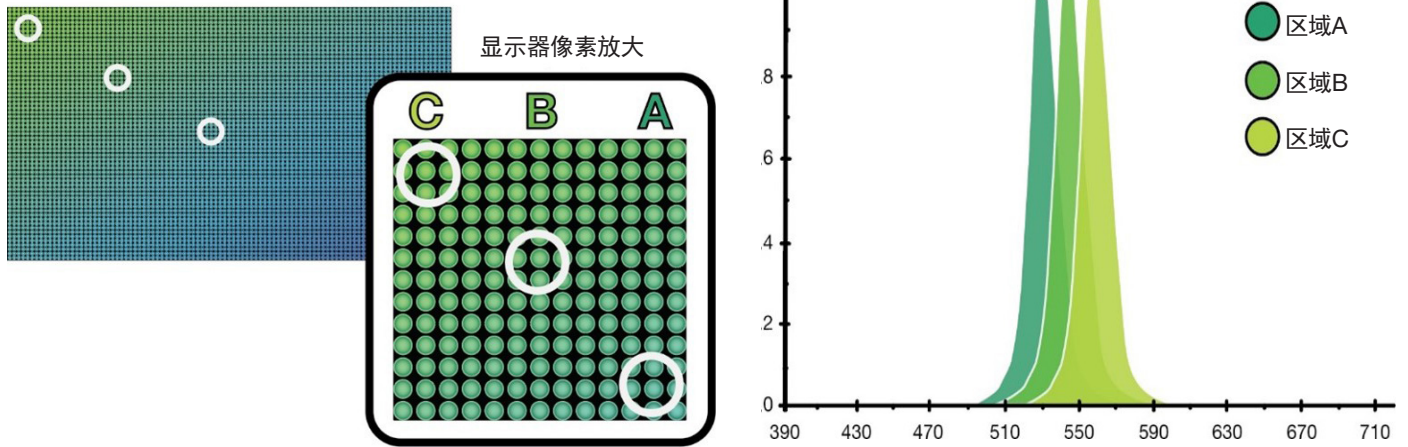


图 2 - 具有色度变化的自发光显示屏图示（最左侧），其中放大了显示器（显示器像素）上亮度有所不同的区域A、区域B和区域C（左中）；区域A、区域B和区域C的示例光谱数据（右）。

由于每个microLED通常为单色亚像素（红光、绿光和蓝光），其输出与其他亚像素组合在一起，以产生单个显示器像素的整体亮度和色度，这导致microLED显示器的亮度和色度变化性更加复杂化。亚像素和像素层面的这种变化性表现为整个显示器的外观不均匀，导致可接受显示器的良率较低、成本昂贵的组件被剔除或者需要进行代价高昂的返工（图3）。

制造商必须对microLED的亚像素（通常为红光、绿光和蓝光）进行测量，以量化、评估和潜在地校正显示器输出。然而，由于在亮度和色度、尺寸、接近性（像素间距/密度较小）及每台显示器包含的microLED发光器数量方面存在变化性，因此制造商在精确测量microLED方面一直面临挑战。这使得microLED的校正同样具有挑战性，尤其是在支持商业化量产所需的速度方面。

对于自发光显示器，一些新测量方法可以检测和量化单个像素和亚像素发光元件的输

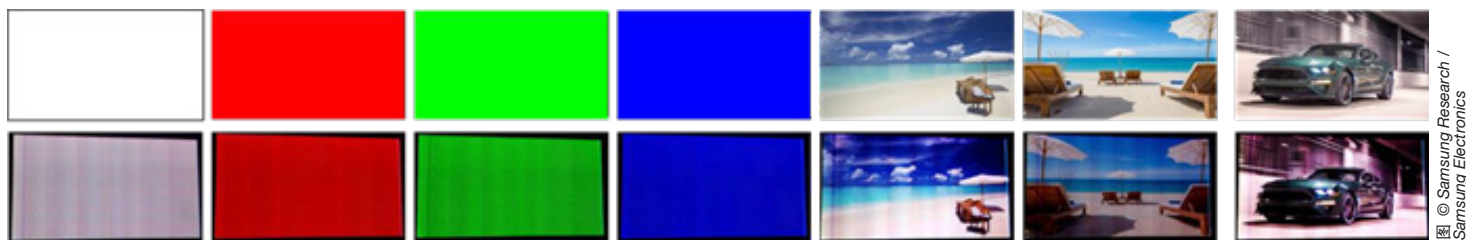


图 3 - 相比microLED显示器输出（第2行），DCP-P3（D65）的目标色域输入信号（第1行），其中主要的垂直非均匀图案和分块压印标记清晰可见。²

图 © Samsung Research / Samsung Electronics

出，从而能够实现显示器均匀性校正。现在，制造商可以测量和校正每个像素的亮度和色度输出，从而生产出具有均匀外观的显示器。此过程（称为像素均匀性校正或“Demura”）依赖于亚像素级亮度和色度测量的准确性，以计算每个microLED的准确校正因子。

校正自发光显示器以提高良率

随着显示器尺寸的缩小，良率急剧下降，而且每个组件的成本要高得多。在某种程度上，制造商可以进行校正（电子补偿或标定），以提高显示器图像的质量。这个概念很简单：通过修改自发光显示屏单个亚像素的输入，我们可以将暗像素调整到均匀的亮度水平，从而改进整个显示器上的亮度均匀性，并确保色度正确性。

要进行显示器像素均匀性校正，首先需要在显示器中内置一种电子设备，其能够控制单个亚像素的亮度，并基于计算出的每个亚像素的校正因子进行调整。其次，需要一种测量系统，其能够准确地量化单个亚像素的亮度和色度，并计算每个亚像素的特定校正因子。这种方法最初是为标定LED视频屏幕（例如，户外竞技场显示器）而开发的，现已使用Demura像素均匀性校正方法进行了调整，以满足当今小型高分辨率自发光显示屏（OLED和microLED）制造应用需求。

Demura

Demura方法采用以下三个不同的步骤：

1. 使用高分辨率成像色度计测量显示器中的每个亚像素，以计算每个像素坐标位置的亮度值。每个亚像素的准确测量值至关重要。测试图像显示在屏幕上，以瞄准每个颜色集的亚像素，从而能够测量每个颜色集并计算出校正因子。举例来说，我们可以显示绿色测试图像，以点亮所有绿色亚像素。成像色度计可以测量并记录每个单独的绿色亚像素的输出。然后，我们针对所有基色（通常为白色）重复此操作。
2. 将每个像素坐标位置的测量数据加载到校正因子计算器中。然后使用测试分析软件计算校正因子，该校正因子可用于归一化显示器中不同像素之间的亮度和色度差异。
3. 使用外部控制IC（集成电路）系统将校正因子应用于每个像素位置上的每个亚像素信号。

Demura: 一种提高显示器（比如OLED、microLED）生产良率的方法。首先，从被测设备人类用户视觉感知的角度测量显示器的不均匀性（Mura），并配准每个像素/亚像素。然后可以计算出校正系数，并将其应用于校正（从字面上来说，意为“Demura”）每个像素或亚像素的外观。经过校正后的显示器可供出售。

MicroLED测量需要考虑的因素

要测量和校正每个单独的microLED发光器，解决方案必须能够提供非常短的节拍时间，确保尽可能高效地测量和校正单个显示器中的大量独立发光器，以支持量产流程。

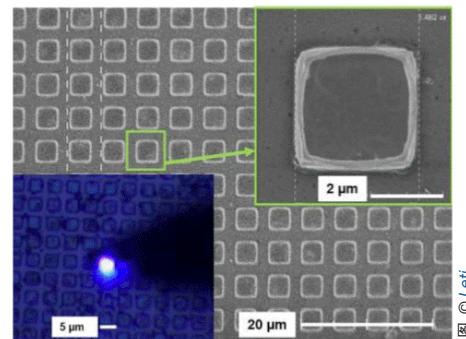
当用于解决microLED色度测量应用遇到的各种挑战时，不同的显示器测量系统各有优缺点。举例来说，分光辐射测量系统可以实现很高的色度测量精度，但缓慢的节拍时间导致该解决方案效率低下，无法快速、高效地测量够成整个microLED显示器的数百万个像素。

此外，分光辐射测量系统通常具有太大的光点尺寸，无法对单个microLED发光器执行最精确的测量。MicroLED的尺寸通常 <100 微米(μm)平方，尺寸 $<50\mu\text{m}$ 的microLED非常常见，有些甚至小至 $3\mu\text{m}$ 。因此，能够测量直径不小于 0.075mm 的显示器结构的测量系统可能并不足以区分和测量尺寸小于 $75\mu\text{m}$ 的单个microLED像素的特性。

为了满足生产节拍时间要求，有些自动化视觉检测系统经过专门设计，可提供高速测量，比如机器视觉相机。然而，这些系统并不具备量化亮度值和色度值的细微差异所需的亮度和色度测量精度，尤其是在像素层面。

如下文所述，经过标定的高分辨率成像色度计可提供生产级检测所需的精度和速度，从而为microLED的像素级测量提供有效的解决方案。能够满足商业化制造需求的最佳测量解决方案包含以下因素：

- **成像色度计。** 成像亮度计和色度计系统的优点包括高效率，即能够通过单个图像检测出整个显示器上所有富有含义的变化，从而一次性完成多种测量，包括：亮度、色度、均匀性、对比度、像素缺陷等。另一个优点在于测量范围，即能够从用户观看被测设备的角度，通过单个图像采集显示器的整个视场(FOV)。成像亮度计仅可测量亮度，进行色度测量则需要使用成像色度计。
- **高分辨率。** MicroLED测量系统必须具有高分辨率成像功能。高分辨率成像提供区别和分离每个像素和亚像素以进行测量所需的精度，并提供通过单个图像采集分辨率和像素密度越来越高的整个显示器中每个像素的测量值所需的高效率。
- **低噪声。** 此外还需要低噪声成像功能。图像噪声(可能包括读出噪声、散粒噪声或电子噪声)会干扰图像的清晰度。无论成像系统的分辨率(指传感器的百万像素(MP)数量)有多高，如果系统采集到大量噪声(因而产生较低的信噪比“SNR”)，那么其有效分辨率可能会显著降低。
- **标定。** 要根据CIE标准执行准确的测量，必须对测量设备进行仔细标定。一种常用方法是使用分光辐射计采集的参照数据来标定成像色度计的响应。增强色彩标定™(Enhanced Color Calibration, “ECC”)是一种基于算法的标定方法，实践表明该方法具有很高的准确性(有关详细信息，请参见下文标题为“增强色彩标定”的部分)。



采用直接键合方法制造的microLED阵列($3\mu\text{m}$ 尺寸/ $5\mu\text{m}$ 间距)的SEM显微照片。插图左下方为已开启的microLED的光学照片。

- **测试和分析工具。** 图像处理软件使制造商能够优化所采集的图像并在其上运行测试。理想情况下，用于显示器测量的分析软件包应当包括检测和量化亮度、色度、均匀性、对比度、像素缺陷和线缺陷、显示器Mura缺陷及其他质量特许所需的工具。

测量精度的重要性：亮度和色度

1931年，国际照明委员会（CIE）定义了一种标准，用于从人类观察者视觉感知的角度科学地量化色彩的物理特性，以实现对这些色彩的精确数学表示和再现（图4）。

为了确保质量，能够模拟人眼对光线和色彩反应的测量系统对于microLED显示器设备的准确测量和校正至关重要。我们可以根据CIE标准的数学公式对显示器像素进行量化，以在CIE色彩空间内提供色度坐标。⁴

旋转滤光轮上的三色刺激（XYZ）滤色片可根据标准CIE色彩匹配函数和色度值进行色度测量。进入测量设备的光线穿过相应的滤色片，然后被传感器捕获（图5）。滤光片将会调节入射光，阻挡某些波长的光线（比如：人眼不可见的紫外线），以确保传感器采集的测量图像及测量值尽可能接近人眼所见。

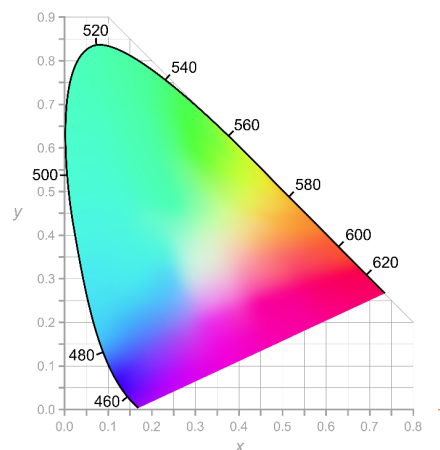


图 4 - CIE 1931 色彩空间的图形表示，量化了人眼可见的所有色彩。黑色数字表示可见光谱的波长，而人眼感知的色彩则以这些范围内的坐标点 (x和y) 表示。

三色刺激系统

最近的一项研究（Jensen、Piehl和Renner 2020）⁵证明了三色刺激系统在匹配人类色彩感知方面具有很高的准确度（有关详细信息，请参见下文标题为“测量精度研究：三色刺激系统”的部分）。

增强色彩标定™

成像系统需要利用分光仪或其他设备提供的标定数据，以确保测量精度。来自瑞淀光学系统的增强色彩标定（ECC）工具通过高级标定算法提供最高水平的色度测量精度。ECC方法创建一个包含12个元素的校正标定矩阵，以最大程度地提高色度测量系统容忍标定后的色度值（标定点；参见图6）变化性的能力（在CIE色彩空间的较大范围内提供准确的色度测量）。



图 5 - 与CIE匹配的三色刺激滤光轮系统（这里显示在ProMetric® I系列成像色度计内）使测量设备能够从人眼感知的角度采集亮度值和色度值。

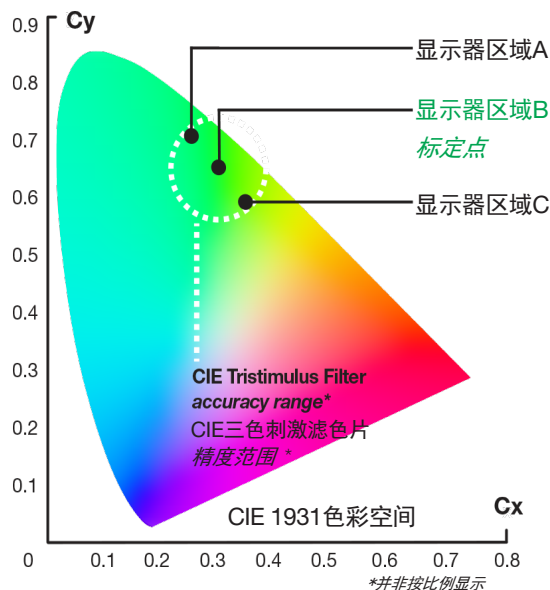


图 6 - 三色刺激滤色片系统与CIE色彩匹配函数之间存在固有接近的光谱响应，当与ECC工具结合使用时，即使光源光谱数据进一步偏离标定点，三色刺激成像色度计也能够继续提供高精度。该图表描绘了三色刺激成像色度计的预期精度限值（白色虚线圆圈内的区域），并标出了绘制自图2的A、B和C三个值。

测量精度研究：三色刺激系统

这项研究着眼于与参照测量仪（分光辐射度计）相比，使用ECC工具的CIE三色刺激滤色片成像色度计系统（瑞淀光学系统的ProMetric® I29成像色度计，2900万像素）可实现的色度测量精度。研究方法为分别使用参照测量仪和成像色度计测量彩光LED。

首先，基于每个LED的基本输出对成像色度计进行标定（使用ECC工具）。然后，成像系统在不同的电流输出水平下测量每个LED（通过提供不同的电流输出引入LED亮度和色度变化性）。成像色度计的精度取决于成像色度计与参照测量仪测量值相匹配的能力，因为LED输出的色度距离是从系统标定点开始增加的。

研究结果

表1中所示的以及图7和图8所绘制的表格测量数据表明，三色刺激系统可以在LED光源引入变化性的情况下提供准确的亮度值和色度值。如表1中的A部分和B部分所示，三色刺激系统可以精确地测量每个LED测试光源（在各种电流输出条件下）呈现出的几乎整个变化范

在所有测量值中（少数测量值除外），相比参照测量仪的测量值（ Δ Dom. Wv），三色刺激系统测量值中主波长仅显示出小于1nm的差异，这表明配备ECC工具三色刺激成像色度计具有很高的测量精度。这些结果表明，即使光源与标定点的差异很大，三色刺激系统也适用于对不同光色的LED进行精确的测量，在亮度和色度测量方面均可实现高精度。在这项研究中，大多数LED测试光源引入的变化性都超出了microLED的预期变化性。

有关该研究的完整详情及结果，您可以在由Jensen, J., Piehl, A.和Renner, W.在2020年1月举行的第34届年度电子显示器大会（34th Annual Electronic Displays Conference, “edC”）上发表的以下报告中找到：“基于CIE色彩匹配函数评估三色刺激系统和拜耳图案匹配系统进行色度测量的精度”。

建议使用三色刺激系统，以确保在光源变化较大或变化容忍度有限的情况下进行高效且准确的显示器校正。

研究结果还证明了三色刺激系统的可靠性，其能够精确地测量白光LED（表1，C部分）。这些结果表明，三色刺激成像色度计可以用于解决晶圆级检测、microLED显示器拾放应用以及彩光LED和白光LED的常规装箱操作（图7和图8）。

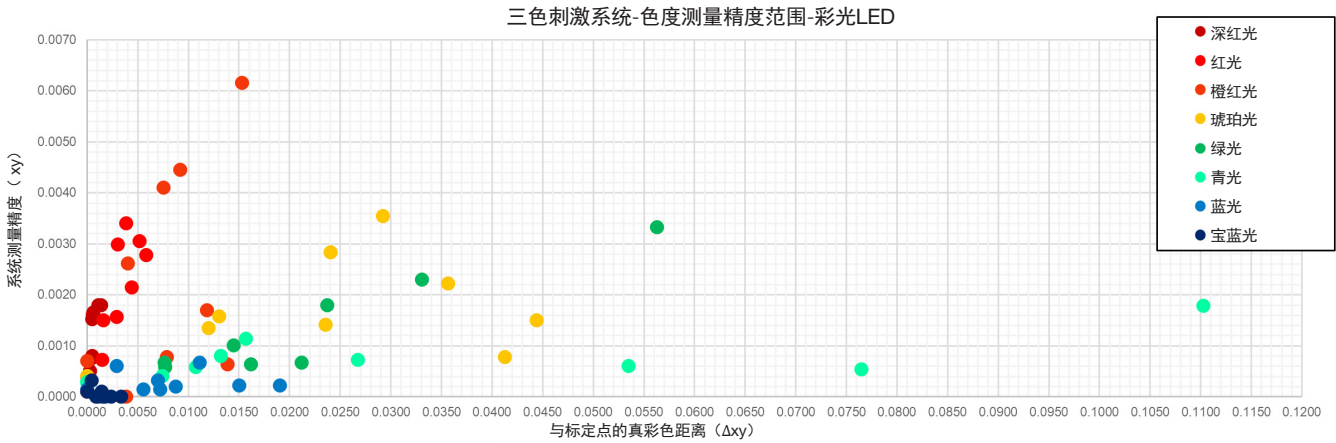


图 7 - 三色刺激系统 (ProMetric® I29成像色度计, 2900万像素) 针对彩光LED和白光LED测试光源色度变化的测量精度范围。

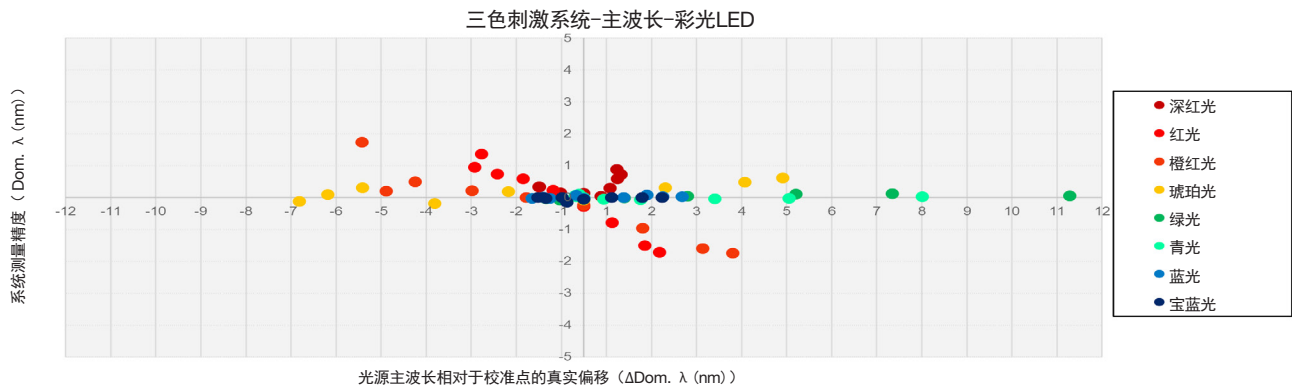


图 8 - 该绘图基于主从标定点的 x 轴到主波长的 $\pm nm$ 变化，显示了LED光源在各种电流水平下的真实变化（由参照分光辐射计测得）。该轴给出了针对每个LED所观察到的变化范围。三色刺激系统 (ProMetric I29) 的测量精度显示为针对每个LED光源在各种电流水平下与参照测量值之间的 $\pm nm$ 差值 (y 轴)。

表1, A部分 - 三色刺激成像色度计系统 (ProMetric I29) 与参照测量仪 (分光辐射度计) 采集的测量数据之比较。 单元格中的棕褐色行表示每种光源的标定条件。测试系统测得的值记录在“相机”下方的列中。参照测量仪测得的值 (在相同时间和相同条件下) 记录在“参照测量仪”下方的列中。测试系统与参照测量仪分别测得的主波长值之间的误差记录在“结果”下方的主波长 (nm)、Lv (%)、x, y, 和xy列中。

三色刺激系统与参照测量协议 (xy) 之比较															
LED	相机					参照测量仪					结果				
峰值波长 (nm)	主波长 (nm)	Lv	x	y	主波长 (nm)	Lv	x	y	与标定点之间的 Δxy	Δ主波长 (nm)	ΔLv (%)	Δx	Δy	Δxy	
深红光	658	643	3.7	0.721	0.279	642.3	3.7	0.719	0.279	0.001	0.7	-0.3	-0.002	0.001	0.002
	659	643.1	19	0.721	0.278	642.2	19.1	0.720	0.279	0.001	0.9	-0.5	-0.001	0.001	0.002
	660	642.8	36.9	0.721	0.279	642.2	37	0.720	0.279	0.001	0.6	-0.5	-0.001	0.001	0.002
	662	642.4	68.2	0.721	0.279	642.1	68.5	0.720	0.279	0.001	0.3	-0.4	-0.001	0.000	0.001
	664	641.9	93.8	0.720	0.279	641.9	94.2	0.719	0.280	0.000	0	-0.4	-0.001	0.000	0.001
	666	641.6	113.6	0.719	0.280	641.5	114.3	0.719	0.280	0.001	0.1	-0.6	0	0.000	0.000
	668	641.1	127.5	0.718	0.280	641	128.1	0.719	0.280	0.001	0.2	-0.5	0.001	0	0.001
	670	640.8	134.7	0.717	0.281	640.5	135.3	0.719	0.281	0.001	0.3	-0.5	0.002	0	0.002
	672	640.8	134.7	0.716	0.281	640.5	135.7	0.718	0.281	0.002	0.3	-0.7	0.002	0	0.002
红光	632	623.7	10.4	0.698	0.302	622.7	10.4	0.696	0.303	0.006	0.9	0	-0.002	0.002	0.003
	632	624.2	55.8	0.699	0.301	622.9	56	0.697	0.303	0.005	1.4	-0.4	-0.002	0.002	0.003
	633	624	110.7	0.699	0.301	623.2	110.9	0.697	0.302	0.004	0.7	-0.2	-0.002	0.001	0.002
	635	624.4	209.8	0.700	0.300	623.8	210.3	0.698	0.301	0.003	0.6	-0.2	-0.001	0.001	0.002
	636	624.7	291.7	0.700	0.300	624.5	292.5	0.699	0.300	0.001	0.2	-0.2	-0.001	0.000	0.001
	638	624.9	353	0.700	0.300	625.2	353.6	0.700	0.299	0.000	-0.3	-0.2	0	-0.000	0.000
	640	625	387.7	0.701	0.299	625.8	387.6	0.701	0.298	0.002	-0.8	0	0.001	-0.001	0.002
	643	625	391.2	0.701	0.299	626.5	388.3	0.703	0.297	0.003	-1.5	0.7	0.002	-0.002	0.003
	645	625.1	371.3	0.701	0.299	626.8	370.7	0.703	0.297	0.004	-1.7	0.2	0.002	-0.003	0.003
橙红光	621	616.4	10.8	0.683	0.316	614.7	11	0.679	0.321	0.016	1.7	-1	-0.004	0.004	0.006
	622	615.5	57.8	0.681	0.319	615.3	57.8	0.681	0.319	0.013	0.2	-0.1	-0.000	0.001	0.001
	623	616.4	110.8	0.683	0.316	615.9	111.1	0.682	0.318	0.011	0.5	-0.3	-0.001	0.001	0.002
	625	617.4	196.9	0.686	0.314	617.2	197.3	0.685	0.315	0.007	0.2	-0.2	-0.001	0.001	0.001
	627	618.4	252.3	0.688	0.312	618.4	252.5	0.688	0.312	0.003	0	-0.1	0	0	0
	630	619.4	273.4	0.690	0.310	619.6	274.1	0.690	0.309	0.001	-0.2	-0.2	0.001	-0.001	0.001
	633	620	266.7	0.691	0.308	620.9	264.8	0.693	0.307	0.005	-1	0.7	0.002	-0.002	0.003
	636	620.7	231.8	0.693	0.307	622.3	228.8	0.695	0.304	0.008	-1.6	1.3	0.003	-0.003	0.004
	638	621.2	204.7	0.694	0.306	623	202.9	0.697	0.303	0.010	-1.7	0.9	0.003	-0.003	0.005
琥珀色光	594	591.3	9.2	0.584	0.417	591.4	9.3	0.583	0.416	0.043	-0.1	-1.5	-0.001	-0.001	0.002
	594	592.2	50.1	0.587	0.412	592.1	51.4	0.587	0.412	0.038	0.1	-2.5	-0.001	0.001	0.001
	595	593.1	93.3	0.592	0.406	592.8	95.6	0.591	0.408	0.032	0.3	-2.4	-0.001	0.002	0.002
	597	594.2	152.6	0.599	0.400	594.4	154.1	0.600	0.399	0.020	-0.2	-0.9	0.001	-0.001	0.001
	599	596.3	183.1	0.609	0.390	596.1	178.2	0.608	0.391	0.008	0.2	2.7	-0.001	0.001	0.001
	602	597.7	178.2	0.616	0.383	597.7	178.4	0.616	0.383	0.004	-0.1	-0.1	0.000	-0.000	0.000
	604	599.9	163.2	0.625	0.373	599.6	161.3	0.625	0.375	0.016	0.3	1.2	-0.001	0.002	0.002
	607	601.8	138.7	0.635	0.365	601.3	139.3	0.633	0.367	0.027	0.5	-0.4	-0.002	0.002	0.003
	608	602.8	128.8	0.639	0.360	602.2	128.4	0.636	0.363	0.032	0.6	0.4	-0.002	0.003	0.004

表1, B部分

三色刺激系统与参照测量协议 (xy) 之比较 (续)															
LED	相机				参照测量仪					结果					
峰值波长 (nm)	主波长 (nm)	Lv	x	y	主波长 (nm)	Lv	x	y	与标定点之间的 Δxy	Δ 主波长 (nm)	ΔLv (%)	Δx	Δy	Δxy	
绿光	534	541.7	39.2	0.247	0.721	541.6	42.7	0.248	0.717	0.056	0.1	-0.3	0.000	-0.003	0.003
	530	537.8	195.2	0.223	0.731	537.7	203.3	0.223	0.729	0.034	0.1	-0.4	0	-0.002	0.002
	528	535.6	358.3	0.211	0.733	535.5	370.1	0.211	0.732	0.024	0.1	-0.3	0	-0.002	0.002
	526	533.2	619.9	0.199	0.731	533.1	638	0.199	0.731	0.014	0	-0.4	0.000	-0.001	0.001
	525	531.7	821.9	0.194	0.725	531.7	845.6	0.193	0.726	0.007	0	-0.3	0.000	-0.001	0.001
	524	530.8	981.6	0.192	0.717	530.8	1003.8	0.192	0.718	0.001	0	-0.1	0.000	-0.000	0.000
	524	530.2	1104.7	0.192	0.709	530.3	1132	0.192	0.710	0.009	-0.1	0	0.001	-0.000	0.001
	525	530	1201.7	0.194	0.701	530	1228.2	0.193	0.702	0.018	0	0.3	0.000	-0.001	0.001
	525	529.9	1238.7	0.196	0.696	529.9	1263.3	0.195	0.697	0.023	0	0.4	0.000	-0.001	0.001
青光	510	513.4	37.1	0.093	0.701	513.4	38	0.094	0.699	0.110	0	-0.9	0.001	-0.002	0.002
	508	510.4	150	0.084	0.666	510.5	153	0.084	0.666	0.076	0	-0.7	0.001	-0.000	0.001
	506	508.8	255.4	0.081	0.643	508.8	260.3	0.081	0.643	0.054	0	-0.6	0.001	0	0.001
	505	507.1	418.2	0.080	0.615	507.2	425.2	0.080	0.616	0.027	-0.1	-0.4	0.001	0.000	0.001
	505	506.3	544.8	0.083	0.600	506.3	554.2	0.082	0.600	0.011	-0.1	-0.3	0.001	0.000	0.001
	505	505.9	649.4	0.086	0.590	505.9	659.5	0.085	0.589	0.001	0	-0.1	0.000	-0.000	0.000
	505	505.8	735.7	0.090	0.584	505.7	747.7	0.089	0.583	0.008	0	-0.2	-0.000	-0.000	0.000
	506	505.8	811.1	0.094	0.579	505.7	823.1	0.093	0.578	0.014	0.1	-0.1	-0.000	-0.001	0.001
	506	505.9	843	0.097	0.578	505.8	856.1	0.095	0.577	0.016	0.1	-0.2	-0.001	-0.001	0.001
蓝光	473	475.5	12.6	0.116	0.099	475.4	12.5	0.116	0.099	0.011	0.1	1.2	0.000	-0.001	0.001
	471	473.9	56.6	0.121	0.088	473.8	56.6	0.121	0.087	0.003	0.1	0.6	0	-0.001	0.001
	470	473.1	102.6	0.123	0.083	473.1	103.1	0.123	0.083	0.007	0	0.1	-0.000	-0.000	0.000
	470	472.8	185.2	0.124	0.082	472.8	186.1	0.124	0.081	0.008	0	-0.4	-0.000	0	0.000
	471	473.2	264.9	0.124	0.085	473.2	266.5	0.124	0.084	0.004	0	-0.6	-0.000	0.000	0.000
	472	474	346.4	0.122	0.091	474	347.9	0.123	0.090	0.001	0	-0.3	-0.000	0.000	0.000
	473	474.9	427.3	0.120	0.098	474.9	429.8	0.121	0.097	0.009	0	-0.3	0.000	0.000	0.000
	474	475.8	504.3	0.119	0.105	475.7	507.6	0.119	0.104	0.016	0	0	0.000	-0.000	0.000
	474	476.2	539.7	0.118	0.109	476.2	543.2	0.118	0.108	0.020	0	0	0.000	-0.000	0.000
宝蓝光	451	454.1	4.1	0.153	0.024	454.2	4.2	0.153	0.024	0.001	-0.1	-1.4	-0.000	0.000	0.000
	451	453.8	21.6	0.154	0.023	453.8	21.8	0.154	0.023	0.001	0	-0.6	0	0.000	0.000
	450	453.6	42.2	0.154	0.023	453.6	42.5	0.154	0.023	0.002	0	-0.5	0	0	0
	450	453.7	81.2	0.154	0.024	453.7	81.7	0.154	0.023	0.001	0	-0.6	0	0	0
	451	454.1	118.4	0.153	0.024	454.1	119.1	0.154	0.024	0.001	0	-0.6	0	0	0
	451	454.6	154.2	0.153	0.025	454.6	155.1	0.153	0.025	0.000	-0.1	-0.3	-0.000	0	0.000
	452	455.2	187.9	0.152	0.026	455.2	189.1	0.153	0.026	0.001	0	-0.3	0	0	0
	452	455.9	220	0.152	0.027	455.9	221.5	0.152	0.027	0.003	0	-0.1	0	0	0
	453	456.4	235.3	0.151	0.028	456.4	237.1	0.151	0.028	0.004	0	-0.1	0	0	0

表1, C部分

三色刺激系统与参照测量协议 (xy) 之比较 (续)											
	相机			参照测量仪				结果			
	Lv	x	y	Lv	x	y	与标定点之间的 Δxy	ΔLv (%)	Δx	Δy	Δxy
白光 (2700K)	29.4	0.462	0.411	29.2	0.460	0.412	0.067	0.5	-0.002	0.001	0.002
	149.3	0.462	0.414	148.5	0.46	0.414	0.068	0.6	-0.002	0.000	0.002
	287.2	0.460	0.414	285.7	0.459	0.415	0.067	0.5	-0.002	0.001	0.002
	534	0.457	0.414	530.9	0.456	0.414	0.064	0.6	-0.001	0.000	0.002
	747.6	0.454	0.413	743	0.453	0.413	0.061	0.6	-0.001	0.000	0.001
	930.9	0.451	0.411	924.3	0.450	0.411	0.057	0.7	-0.001	0.000	0.001
	1078.6	0.448	0.410	1071	0.447	0.410	0.054	0.7	-0.001	0.000	0.001
	1191.7	0.445	0.408	1182	0.444	0.408	0.050	0.8	-0.001	0.000	0.001
	1230.4	0.443	0.407	1220.1	0.442	0.407	0.048	0.8	-0.001	0	0.001
	1253.6	0.441	0.407	1243.1	0.440	0.407	0.047	0.8	-0.001	-0.000	0.001
白光 (3500K)	33.4	0.412	0.404	33.1	0.410	0.405	0.020	1	-0.001	0.000	0.001
	162.6	0.410	0.402	161.1	0.408	0.403	0.017	0.9	-0.001	0.000	0.001
	307.7	0.408	0.400	304.9	0.406	0.401	0.014	0.9	-0.001	0.000	0.001
	562.2	0.404	0.397	556.9	0.403	0.397	0.009	0.9	-0.001	0.000	0.001
	777.1	0.400	0.394	769.6	0.399	0.394	0.004	1	-0.001	0.000	0.001
	955.1	0.397	0.390	945.1	0.396	0.391	0.001	1.1	-0.001	0.000	0.001
	1091.3	0.393	0.388	1079.8	0.393	0.388	0.005	1.1	-0.001	0	0.001
	1185.4	0.390	0.385	1172.2	0.389	0.384	0.010	1.1	-0.001	-0.000	0.001
	1213.8	0.387	0.383	1200.1	0.387	0.383	0.013	1.1	-0.000	-0.000	0.000
	1228.7	0.385	0.382	1214.7	0.385	0.381	0.015	1.2	-0.000	-0.000	0.000
白光 (5700K)	37.9	0.336	0.357	37.3	0.334	0.356	0.071	1.7	-0.002	-0.000	0.002
	187.1	0.335	0.353	184.2	0.333	0.353	0.074	1.6	-0.002	-0.000	0.002
	357.8	0.334	0.351	352.4	0.331	0.350	0.077	1.5	-0.003	-0.000	0.003
	664.4	0.331	0.347	654.3	0.328	0.346	0.082	1.5	-0.003	-0.000	0.003
	930.6	0.328	0.344	916.2	0.325	0.343	0.086	1.6	-0.002	-0.001	0.003
	1158.6	0.325	0.340	1139.4	0.322	0.340	0.09	1.7	-0.002	-0.001	0.003
	1341	0.321	0.337	1319.1	0.319	0.337	0.095	1.7	-0.002	-0.001	0.002
	1476.7	0.317	0.334	1451.7	0.315	0.333	0.100	1.7	-0.002	-0.001	0.002
	1523.3	0.314	0.332	1497.4	0.312	0.331	0.103	1.7	-0.002	-0.001	0.002
	1551.7	0.312	0.330	1525	0.310	0.329	0.106	1.7	-0.002	-0.001	0.002

测量精度的重要性：像素级分辨率

如前所述，microLED的尺寸范围从小于100 μm 到小至3 μm （约为人类头发宽度的1/10）不等。⁶单个microLED较小区域内的测量精度依赖于成像系统的高分辨率。通过校正显示器来提高生产良率，测量系统必须能够精确地分离和测量每个单独发光的microLED，以确保能够校正给定microLED的缺陷和亮度值或色度值。高分辨率成像系统可以优化每个microLED上所应用的光敏元件（传感器像素）的数量，并提供足够的分辨率，以确保能够一次性测量显示器中的所有microLED，以在较短的节拍时间内完成校正过程。

MicroLED面板由数百万个芯片形式的像素组成，通常在4至8英寸的晶圆上生长。每个像素包含红色、绿色和/或蓝色亚像素的某种组合。要制造显示器，必须将每个microLED芯片（像素）转移到将单元阵列固定在适当位置的基板或背板（面板）上。检测通常发生在microLED生产期间的晶圆层面和面板层面。

显示器行业的通用视觉性能标准允许每台显示器存在10个以内的坏点，因此外延层的生产良率必须非常高。制造商必须对晶圆上的每个microLED进行测量，以确定均匀性，验证晶粒的单独分布，以及测量红光、绿光、蓝光和白光（偶尔出现）microLED的亮度。一旦将晶圆沉积到背板上，制造商则需要验证整个面板上亮度和色度分布的总体均匀性。

确保microLED显示器质量的第一步是在LED、芯片和晶圆阶段进行检测和测量，以减少死像素存在的可能性，并确保亮度和波长（色度）均匀性。

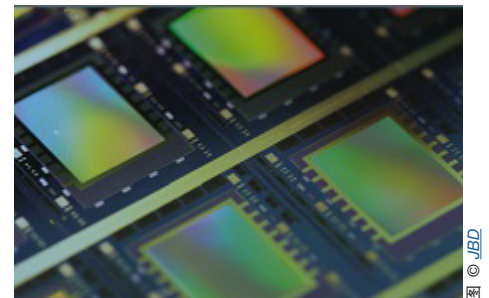
晶圆阶段的测量。为了检测microLED晶圆，制造商必须评估单个亚像素（microLED）的性能。配备标准镜头或显微镜头的高分辨率、低噪声成像色度计可用于此步骤。显微镜头可提供5倍或10倍变焦（将在设备测试视野内的成像有效放大5到10倍）功能以进行客观测量，从而能够对每个单独的发光元件进行详细测量（图9）。

当与高分辨率成像系统搭配使用时，显微镜头能够通过多个传感器像素采集每个显示器像素，以提高测量精度。这种类型的测量系统非常适用于评估显示器亚像素和表征单个microLED。

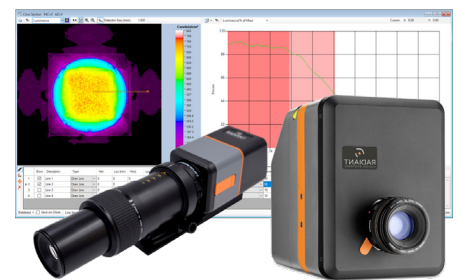
面板阶段的测量

在将单个microLED芯片转移到背板上之后，则可以使用配备标准镜头的成像色度计来测量整个面板上的亮度和色度均匀性。成像色度计的优点在于其能够通过单个图像采集较大区域，能快速、准确地检测和测量显示器的不均匀性，就像用户观看显示器一样。

高分辨率成像系统可以继续的面板层面提供像素级和亚像素级测量，以进行校正。为了在此阶段评估显示器的亮度、色度或均匀性，制造商们需要获取每个显示器像素坐标位置的准确数据，然后将这些数据下载到显示控制芯片内，以确定并应用校正因子来校正提高显示器均匀性。即使对于分辨率非常高的成像系统，此过程也增加了对面板层面成像精度的需求。配备三色滤光片的测量系统可以通过将多个图像（每个色度通道包含一个）组



MicroLED晶圆的近景图片。



瑞淀ProMetric成像亮度计或色度计、显微镜头（此处显示为安装在ProMetric Y亮度计上）和TrueTest™软件是有效的microLED测量解决方案的组成部分。

合在一起进行单次测量来实现最大化的分辨率，每个图像都具有完整的传感器分辨率（请参见上文的图5）。

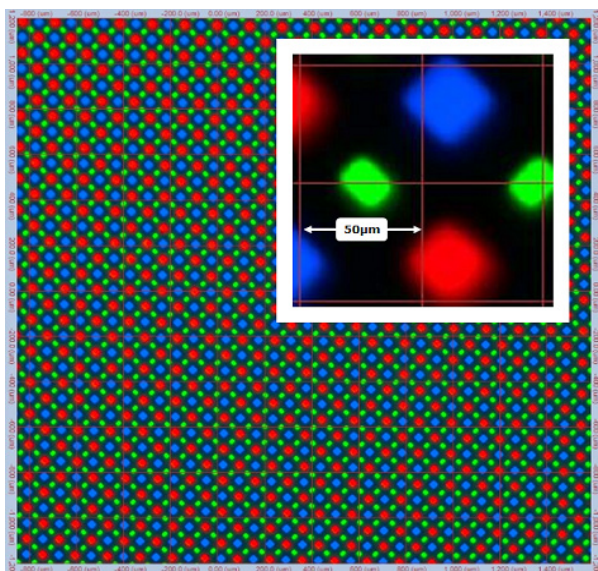


图 9 - 将瑞淀ProMetric成像色度计与瑞淀显微镜镜头搭配使用所采集的亚像素测量值（主图像）示例，以10倍变焦放大显示50µm的距离（插图）。

用于改进像素配准和测量的方法

世界各地的广泛量产实践已经证明，Demura方法可以有效确保数以百万计的OLED显示器的视觉质量。然而，microLED具有呈指数级提高显示器分辨率和像素间距的潜力，因此需要采用新方法来实现精确的测量（Demura方法第1步）和校正（第2步和第3步）。

精确的像素级测量依赖于测量系统充分分离每个像素并精确量化其输出值的能力。如上所述，成像系统的分辨率将决定可用于覆盖显示器件中每个单独像素的光敏元件（传感器像素）的数量。通过针对每个显示器像素应用更多的传感器像素，我们可以增加成像系统所采集数据的精度，以进行精确的像素配准和测量。随着显示器整体分辨率的提高，成像系统针对每个显示器像素应用足够的传感器像素的能力将会随之降低（与此同时，仍需要继续通过单个图像采集所有显示器像素的测量值以确保效率）。

精确的像素级测量依赖于测量系统充分分离每个像素并精确量化其输出值的能力。如上所述，成像系统的分辨率将决定可用于覆盖显示器件中每个单独像素的光敏元件（传感器像素）的数量。通过针对每个显示器像素应用更多的传感器像素，我们可以增加成像系统所采集数据的精度，以进行精确的像素配准和测量。随着显示器整体分辨率的提高，成像系统针对每个显示器像素应用足够的传感器像素的能力将会随之降低（与此同时，仍需要继续通过单个图像采集所有显示器像素的测量值以确保效率）。

间隔像素方法

间隔像素测量方法（美国专利号：9135851）一次只在一个显示像素子集上应用测量系统的总图像传感器分辨率来提高有效分辨率。对于此方法，测试软件采用显示屏上显示的一系列点矩阵测试图案作为测量序列的一部分。每个图案照亮显示器亚像素的一个子集，其余的像素则关闭（图10）。成像系统将测量每个图案“开启”像素的输出（亮度或色度）。随后的测试图像将调整矩阵以关闭首个像素集，然后开启下一个像素集进行测量。重复此操作过程，直到显示器中的所有像素都被测量为止。

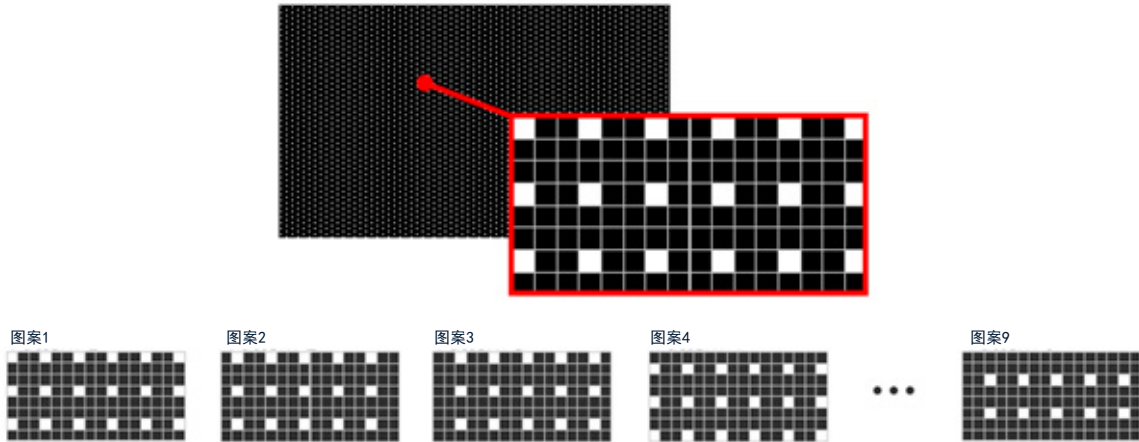


图 10 - 在间隔像素测量期间，一系列点矩阵图案会点亮像素组，直到获取显示器中所有像素的值为止。

此操作过程可提高每个显示器像素的有效测量分辨率，从而确保每个像素输出的隔离，并确保任意分辨率的显示器上测量计算的准确性。来自间隔像素测量方法的图像将被合并为单个合成图像以进行分析，该图像将比较每个像素的x, y坐标位置的值，以确定均匀性。然后，我们可以使用测试软件计算每个显示器像素所需的校正因子，并在每个像素的坐标位置应用校正以调整像素值，直到显示器变得均匀为止。

间隔像素方法减少了为提高测量精度对基于图像的系统的测量分辨率的依赖。然而，由于此方法需要多张图像，因此节拍时间也会增加。相比之下，像素分割计算方法（详见下文介绍）不仅可以提高测量精度，而且不会增加节拍时间。举例来说，使用像素分割计算方法仅需一张图像即可测量标准智能手机显示屏。因此，在许多生产级测试和校正应用中，在需要较短节拍时间的情况下，像素分割计算方法具有显著的优点。

像素分割计算方法

像素分割计算方法（美国专利号：10971044）解决了可应用于每个显示器像素的成像传感器分辨率有限的测量场景，使得具有标准分辨率的测量系统也可在整个显示器的单张图像测量中继续准确地测量和校正当今的高分辨率显示器。

首先，像素分割计算方法可以优化像素配准。像素配准是一种可在测量图像中动态定位和设置每个像素周围的关注区域（ROI）的方法。在传统的测量方法中，ROI通常与成像系统的传感器像素阵列对位。然而，随着显示器分辨率相对于测量系统分辨率不断提高，显示器像素的中心很可能不会与传感器像素的中心对位，从而降低了ROI精确覆盖和隔离每个显示器像素的能力。这种对位不准可能会导致测量误差。相比之下，像素分割计算方法利用浮点设置每个显示器像素周围的配准区域，并根据整个像素上测得的最高亮度将此ROI与显示器像素的中心对位。

其次，像素分割计算方法可以优化像素测量。像素分割计算方法基于ROI中包含的每个传感器像素的分割区域来计算像素值（请参见图11，右图）。相比传统的“完整像素”方法，这提高了测量值的精度。传统的“完整像素”方法是从部分包含在ROI中的传感器像素整个区域中来提取值（请参见图11，左图）。像素分割计算方法可以确保超高分辨率自发光显示器的像素级测量精度，超过了以前使用单个图像采集所能达到的精度。通过使用像素分割计算方法，具有有限分辨率（相对于显示器分辨率）的成像系统可以继续通过单张图像有效地测量整个显示器上的像素级值，从而加快了节拍时间，并且不会降低测量精度。

首先，像素分割计算方法可以优化像素配准。然后，其可以优化像素测量，从而确保相比以前使用的单张图像采集方法，能够对具有更高分辨率的自发光显示器进行更精确的像素级测量，并且可以加快节拍时间。

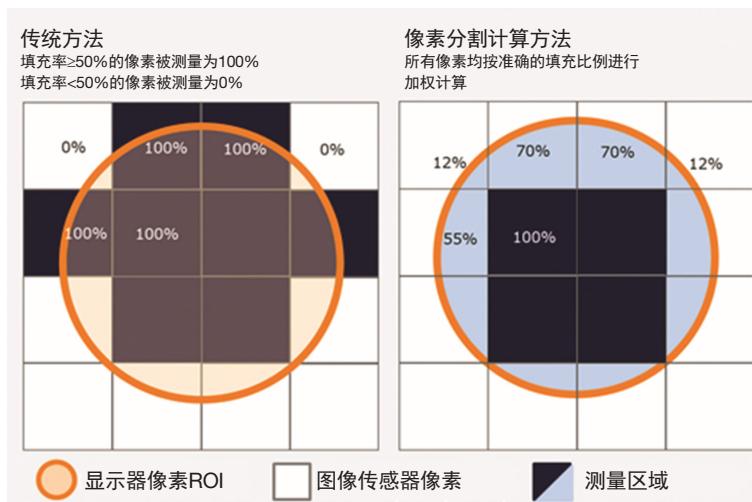


图 11 - 传统的整体像素测量方法与像素分割计算方法之比较图示。在传统方法中（左），通常使用来自ROI内面积大于50%的传感器像素的100%数据以及来自ROI内面积小于50%的传感器像素的0%数据来测量显示器像素。在像素分割计算像素分割计算方法中（右），通常使用基于ROI内传感器像素面积百分比的数据百分比来测量显示器像素。

测量精度研究：像素分割计算方法

在由Pedeville、Rouse和Kreysar（2020）发表的一项研究中，像素分割计算方法的准确性得到了证明。图12绘制了来自该研究的单图像测量数据，对像素分割计算测量方法、完整像素测量方法和超高分辨率参照测量方法的像素级测量精度进行了比较。像素分割计算数据与参照测量数据保持高度一致，而完整像素测量值则在多个点上与参照测量数据存在偏差。图13显示了使用4300万像素的ProMetric成像亮度计系统进行实际Demura应用之前和之后的结果对比，其中分别采用间隔像素方法和像素分割计算方法来校正microLED微型显示面板。

有关像素分割计算测量和校正方法研究的详情，请参见Pedeville, G.、Rouse, J.和Kreysar, D.的以下研究报告：“可用于改进高分辨率显示器像素级测量和校正（Demura）的像素分割计算方法”，发表于信息显示学会（Society for Information Display, “SID”）2020年显示周活动（Display Week 2020）摘要，2020年8月，第二册。

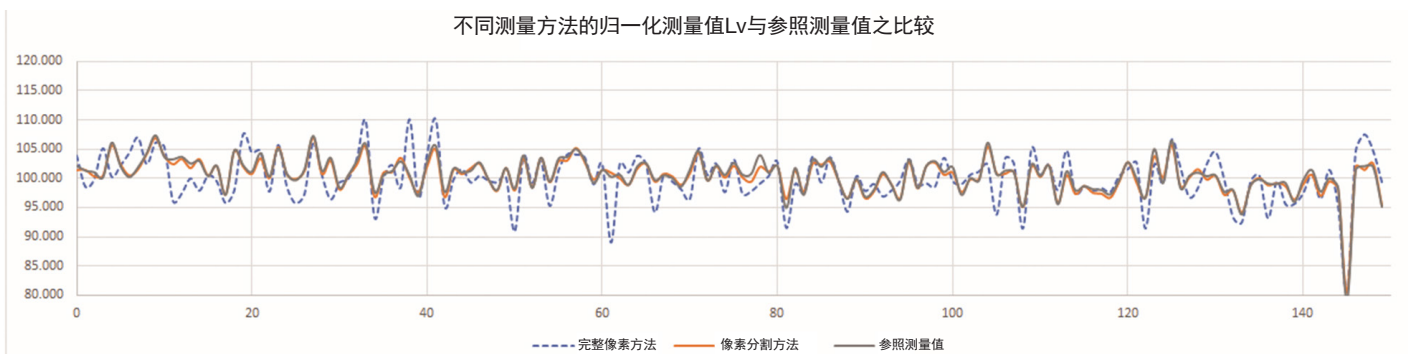


图 12 - 使用完整像素测量方法和像素分割计算测量方法（每个显示器像素实现3.2 x 3.2传感器像素）测得的标准化亮度值（Lv）与参照亮度值（每个显示器像素实现30 x 30传感器像素）之比较，针对同一行显示器像素。

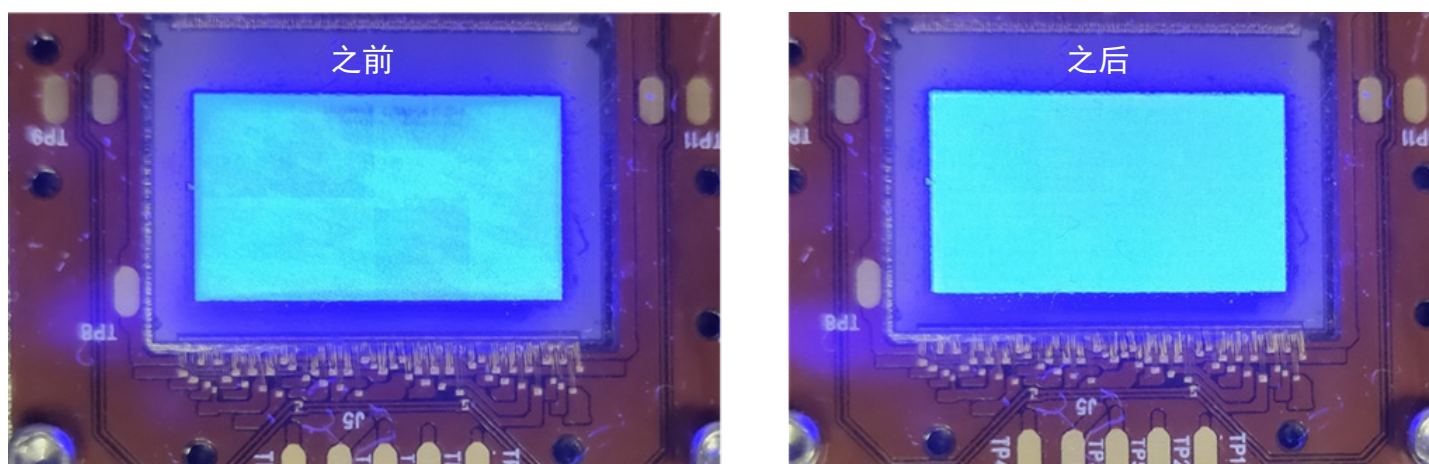


图 13 - 图中所示的是进行Demura校正之前（左）和之后（右）的microLED微型显示面板。所示面板尺寸为0.7英寸，全高清，分辨率为1920 x 1080像素，LED尺寸/间距为2 μ m/8 μ m。使用配备显微镜镜头的ProMetric Y29成像亮度计和TrueTest™软件进行测量和校正。

结论

在竞争激烈的消费类设备市场上，microLED显示器迅速占据了一席之地。开发人员正在竞相寻找生产级解决方案，以确保满足显示器性能要求和超越终端消费者的期望，同时维持具有成本效益的生产流程和高良率。

缺陷、色度或亮度变化及其他异常可能会迅速导致购买者的满意度降低，损害品牌声誉并侵蚀市场份额。如果制造商无法在组件层面解决和纠正这些问题，那么低良率和高生产成本将会阻碍microLED显示器技术应用于量产和市场商业化的可行性。

高分辨率三色刺激成像色度计系统提供高效的质量控制解决方案，可支持microLED显示器的生产基准。这些系统依靠滤色片方法、标定和亚像素测量功能来确保在像素和亚像素层面采集准确的数据，以实现显示器校正，进而提高良率并保护制造资源。

近期关于显示器测量系统和方法的研究表明，高分辨率三色刺激成像系统（与复杂算法搭配使用，用于标定、配准和测量）可以有效解决microLED显示器亮度和色度均匀性挑战，并支持microLED技术应用于显示器设备市场的可行性。

通过使用成像色度计和新型的校正方法，microLED晶圆、面板和设备制造商可以获得有效的解决方案，在提高生产效率的同时，确保产品质量、减少生产浪费并继续进行各种类型、尺寸和应用的高性能显示器创新。

参考文献

1. Yole Développement. MicroLED显示器，2017年2月。（检索自：http://www.yole.fr/MicroLEDDisplays_Market.aspx）
2. Kim, K.、Lim, T.、Kim, C.、Park, S.、Park, C.等人，“基于Micro-LED 4D变换的高精度色彩均匀性”。《国际光学工程学会（SPIE）学报》第11302卷。2020年2月。
3. Lapedus, M.，“MicroLED：显示器行业的下一次革命？”《半导体工程》（Semiconductor Engineering），2019年5月。（检索自：<https://semiengineering.com/microleds-the-next-revolution-in-displays/>）
4. Carter, E.、Schanda, J.、Hirschler, R.、Jost, S.、Luo, M.、Melgosa, M.、... Wold, J.，CIE 015: 2018色度测量法，第4版，2018。DOI: [10.25039/tr.015.2018](https://doi.org/10.25039/tr.015.2018)
5. Jensen, J.、Piehl, A.和Renner, W.，“基于CIE色彩匹配函数评估三色刺激系统和拜耳图案匹配系统进行色度测量的精度”，该报告发表于第34届年度电子显示器大会（edC），2020年1月。
6. Lapedus，《半导体工程》（Semiconductor Engineering），2019年5月。
7. Pedeville, G.、Rouse, J.和Kreysar, D.，“用于改进高分辨率显示器像素级测量和校正（Demura）的像素分割计算方法”，信息显示学会（Society for Information Display，“SID”）2020年显示周（Display Week 2020）活动摘要，第二册，2020年8月。



OLED、microLED等类型的自发光显示器提供视觉吸引力和高性能。然而，这些显示器中的单个发光源可能会呈现出亮度和色度变化性，从而导致不均匀的外观。本白皮书介绍了用于microLED显示器精确测量和校正的解决方案，这些解决方案可以帮助制造商们改进视觉质量，并提高生产良率。

立即联系我们

Radiant在北美，中国和韩国设有直接销售，工程和支持办事处以及人员。在世界其他地区，Radiant则由柯尼卡美能达公司（Konica Minolta）传感事业部当地办事处提供销售和支持。

美洲

全球总部

Radiant Vision Systems
18640 NE 67th Ct.
Redmond, WA 98052 USA
+1 425 844-0152
Info@RadiantVS.com

区域办事处

加利福尼亚库比蒂诺
密歇根州诺维

亚洲

中国总部

中国上海

区域办事处

中国深圳
中国苏州

日本

日本东京

韩国

韩国城南

台湾

台湾竹北

越南

越南海防市

亚太

新加坡

欧洲

欧洲总部

荷兰Nieuwegein

区域办事处

比利时迪海姆
法国巴黎
德国慕尼黑
意大利米兰
波兰弗罗茨瓦夫
瑞典Vastra Frolunda
瑞士Dietikon
土耳其伊斯坦布尔
英国沃灵顿



A Konica Minolta Company

请通过www.RadiantVisionSystems.com与您当地的Radiant办公室联系。

版权所有 © 2021, Radiant Vision Systems LLC. 保留所有权利。规格如有变更、恕不另行通知。Radiant, Radiant Vision Systems, ProMetric, ProSourc, VisionCAL和Source Imaging Goniometer 是 Radiant Vision Systems LLC 的注册商标。 2021/09/12