

文章编号:1007-2780(2017)11-0868-09

防眩显示屏闪耀点的研究进展

王海风^{1,2*}, 沈怡宁¹, 潘纪情¹

(1. 东华大学 材料科学与工程学院, 上海 201620;

2. 东华大学 先进玻璃制造技术教育部工程研究中心, 上海 201620)

摘要: 闪耀点 (Sparkle) 是影响防眩屏幕显示效果的重要因素之一, 为满足人们对显示屏分辨率日益提高的要求, 闪耀点越来越受到关注。但目前对闪耀点的确切定义, 产生原因, 表征手段及评价指标等尚无统一的认识和标准。本文从闪耀点现象入手, 介绍了目前闪耀点主要的研究表征方法, 例如 Gollier 和 Becker 各自提出了表征闪耀点的评价测试体系并给出了一系列相关参数; Evans 等人在 Gollier 和 Becker 工作的基础上进行了一系列心理物理学实验来评价闪耀点现象的实际效果等等。本文就闪耀点的研究现状进行了详尽的综述, 为后续屏幕闪耀点研究, 建立统一的评价方法与标准提供了宝贵的参考资料。

关键词: 防眩玻璃; 闪耀点; 平板显示; 表征

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173211.0868

Research progress of sparkle on anti-glare display

WANG Hai-feng^{1,2*}, SHEN Yi-ning¹, PAN Ji-qing¹

(1. College of Material Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Engineering Research Center of Advanced Glass Manufacturing Technology,
Ministry of Education, Shanghai 201620, China)

Abstract: Sparkle is one of the main factors which have a significant influence on anti-glare display. As the requirements of display resolution continue to improve, more and more attention has been focused on the sparkle. But up to now, there is no uniform knowledge and standards on the exact definition, the cause, the characterization methods and evaluation indicators of sparkle. The Sparkling phenomenon and definition are introduced in this paper. According to measurement, sparkle's current representation methods are divided into two categories: artificial identification and objective analysis, and the main research methods are summarized in this paper. For example, Gollier and Becker presented the evaluation systems of the sparkle and give the related parameters respectively. Other researchers like Evans did some psychophysical experiments to evaluate the effect of the sparkle based on the work of Gollier and Becker. The research progress of sparkle on anti-glare display are reviewed systematically in this article. It will provide a valuable reference for further study on the sparkle and help to set standardized evaluation methods and criterion in the future.

收稿日期: 2017-03-30; **修订日期:** 2017-05-15.

基金项目: 先进微结构材料教育部重点实验室 (B 类) 开放课题

Supported by Open Subject Fund of Key Laboratory of Advanced MicroStructured Materials, Ministry of Education (B)

* 通信联系人, E-mail: whf2008@dhu.edu.cn

Key words: anti-glare glass; sparkle; panel display; characterization

1 引言

随着平板显示行业的飞速发展,人们除了从根本上提高和改善电子显示器件本身的发光性能^[1-6],还对显示屏玻璃的防眩处理进行了大量的研究工作。防眩玻璃(Anti-glare glass, AG glass),也称减反射玻璃,是将玻璃原片进行表面处理,使其表面镜面效果下降,但光透过率基本不发生改变的一种玻璃^[7-8]。AG 玻璃的制备方法主要分为机械法和化学法两大类。机械法包括喷砂法、磨砂法和喷吹法 3 种,常见于家用玻璃和装饰玻璃的制造;化学法主要有化学蚀刻法和表面镀膜法两种^[9-15]。

AG 玻璃广泛应用于手机盖板、电脑屏幕等日用电子设备,其表征参数主要包括粗糙度、雾度、透过率、反射率、最大翘曲度和反射图像清晰度(Distinctness-of-image, DOI)等^[16-18]。但在实际使用过程中,防眩玻璃中的部分区域会出现闪耀点(Sparkle)的现象,影响屏幕的显示效果,尤其是在环境照明强度高的条件下,会大大降低显示屏的可视性。随着显示屏分辨率越来越高,闪耀点越来越多地受到关注,但目前对该问题的认知和研究较少,本文就目前的主要研究进展进行了总结。

2 闪耀点概述

20 世纪 90 年代初,Zenith Electronics Corp. 发表了一系列包含对阴极射线显示管(CRT)闪耀点的起因和抑制研究的专利。1989 年,Robert Adler 等人^[19]首次提出“Sparkle”这一术语,认为闪耀点是点或条纹图案的空间频率与相近空间频率之间的相互干扰,这种干扰会在像素级尺寸范围出现明暗点或者彩色点,影响对屏幕的观测效果。且其分布区域与强度会随观察者移动而变化,从而引起使用者视觉不适的现象。

随着屏幕与观察者相对位置的移动,或者屏幕上附着水渍或油污等,闪耀点会发生颜色和强度的变化^[20-23],如图 1 所示^[24]。

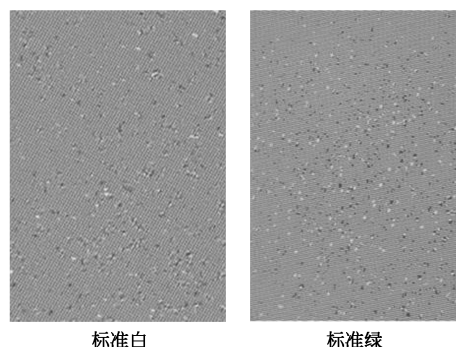


图 1 小水滴覆盖在 LCD 显示屏光滑表面上^[24]

Fig.1 Patterns obtained by mist of water sprayed on the glossy surface of an LCD screen^[24]

3 闪耀点研究方法

目前,闪耀点的表征方法有人工主观识别和客观分析两大类,研究人员不断地通过努力提高客观评价与实际效果的一致性及其精准度,主要研究及评价方法如下。

3.1 斑点对比评价法

Svelto 认为闪耀点是一束激光在一面墙体或一块透明滤镜传播时产生漫反射而形成的黑白交错、随机排列的可见点^[25],Cairns 等人在此基础上利用如图 2 所示装置对其进行了研究^[26]。

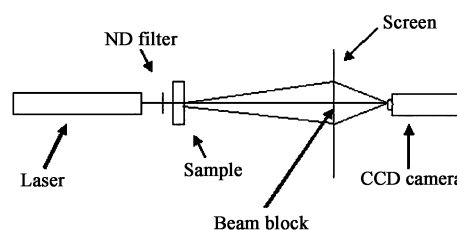


图 2 Cairns 等人实验装置示意图^[26]

Fig.2 Schematic diagram of setup in Cairns et.al experiment^[26]

光学实验台配备 5 mW 的 He-Ne 激光器,激光经过包含图像的玻璃样品照射到面板屏幕。图像由摄像机(Nikon D50)拍摄,并使用图像分析软件(MATLAB Image Analysis ToolPack)测量其强度分布。对于所得图像进行线性扫描,得到由标准偏差和平均强度决定的斑点对比值(SC)。

SC 通常由公式(1)来量化:

$$SC = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}, \quad (1)$$

其中: I 为入射光强; σ_I 入射光强的均方差。

Cairns 等人发现, SC 大小与表面特征尺寸 (Feature Size) 以及观察角度有关。SC 越大, 可见的闪耀点便越多^[25-26]。Cairns 等人还预期, 通过控制特征尺寸来减少斑点对于下一代防眩显示屏的研制非常关键。

Huckaby 等人系统研究了光泽度和观察距离与闪耀点程度的关系^[27]。研究结果表明, 观察者离图像成像中心距离越远, 斑点现象越明显, 如图 3 所示。由于粗糙的表面减少了相干散射, AG 玻璃光泽度越低, 斑点和闪耀点也越少。而闪耀点和 SC 值均与样品光泽度大致成线性关系^[27], 如图 4 所示, SC 是一个表征闪耀点十分有效的物理量。

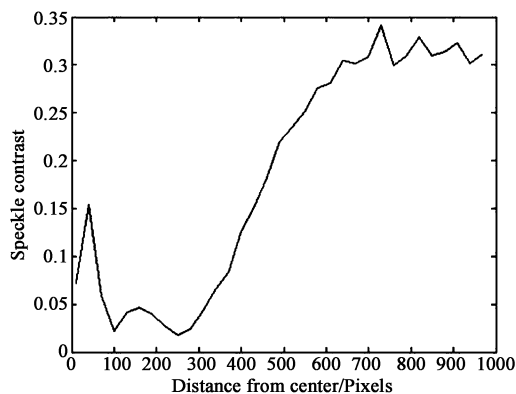


图 3 SC 与观察距离的关系图^[27]

Fig.3 Speckle contrast versus distance from center of speckle pattern^[27]

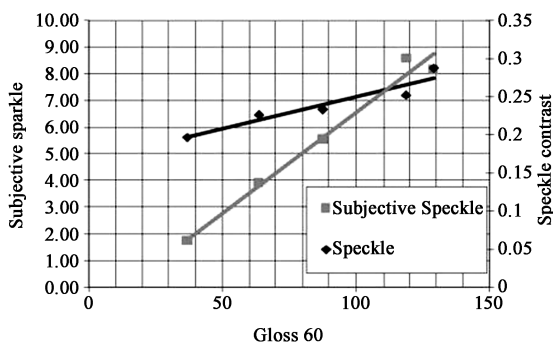


图 4 SC 和主观闪耀点与光泽度的关系图^[27]

Fig.4 Speckle contrast and subjective sparkle versus gloss for acid etched samples^[27]

3.2 傅里叶变换法

Becker 认为闪耀点是由像素显示屏和粗糙防眩表面产生的光干涉引起的, 光的折射、衍射和反射可能都参与并导致了可见闪耀点的形成^[24,28]。闪耀点尺寸大小总体上是大于像素尺寸, 但有时也小于像素尺寸。一般地, 像素密度越大, 观测孔径角度越小, 闪耀点越明显。闪耀点还与显示屏颜色有关, 纯绿像素显示下, 闪耀点会更明显^[24]。此外, 单眼模式和双眼模式观察闪耀点也存在很大差异^[28-29]。

基于上述研究, Becker 利用对于亮度调制的傅里叶变换加权值表征闪耀点^[30]。此方法对于显示亮度不均匀及闪耀点轻微区域的微小变化更为敏感。主要包括差异对比法 (Difference method) 和空间滤波法 (Spatial filtering) 两种方法^[28]。

差异对比法是通过移动盖在像素显示屏表面的防眩玻璃, 分别记录移动前后的闪耀点情况进行差异对比。然后将原始图像中同一个区域的平均灰度值除以在闪耀点所在区域的灰度值的标准偏差对闪耀点进行评估。空间滤波法是通过傅里叶空间得到所需滤波除以像素点矩阵的方法, 依旧用经过滤波后所选区域的灰度的标准偏差除以相同区域未经滤波前的平均灰度的商来表征闪耀点^[28]。两种方法测试结果的对比如图 5 所示。

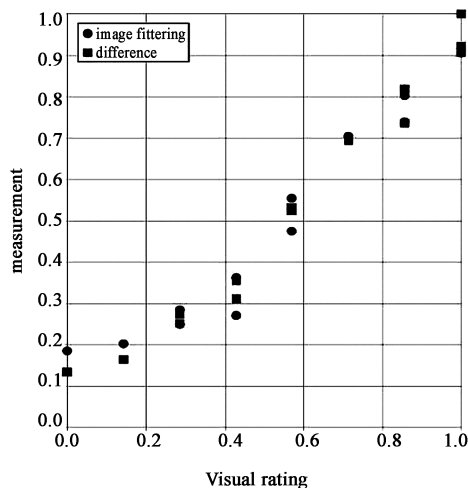


图 5 14 块样品通过差异法和滤波法得出的闪耀点值与专业观察者可视化评价的对比^[28]

Fig.5 Sparkle values (normalized) from difference and filter method for 14 samples compared to (normalized) visual ratings of expert observers (8 categories)^[28]

从图 5 可以看出,差异对比法的实验结果与人眼实验契合度很高,再现了观察者的评分体系;而空间滤波法在某些例子中与评分体系背道而驰。

3.3 像素显示功率法

Gollier 等人^[23]则认为闪耀点形成的基本原因包括光的干涉作用、瑞利散射(Rayleigh scattering)和米氏散射(Mie-type scattering)等。他们创立了一种表征闪耀点的方法及相应设备^[31](如图 6 及表 1 所示)。该仪器由模拟人眼的图像捕捉系统及相应的分析图像的电脑程序组成。

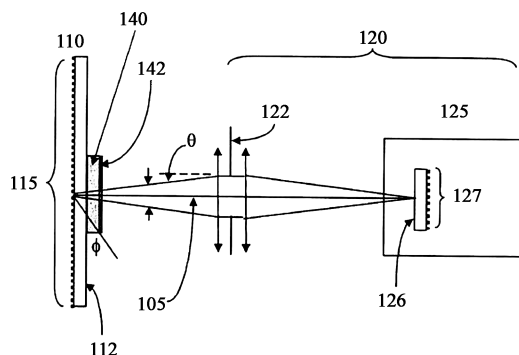


图 6 100 设备示意图^[31]

Fig.6 Schematic diagram of 100 apparatus^[31]

表 1 100 设备构成说明^[31]

Tab.1 Instructions of 100 apparatus^[31]

符号	描述
110	像素化源,如 LCD 或 OLED 显示器
115	图像的多个像素(源像素),包含在像素化源 110
120	图像显示系统
122	小孔
112	像素化源 110 的平面,夹角约 10 度
105	光路,基本上垂直于 112
140	透明样品,如玻璃等
142	防眩表面,且面对像素化源 110
125	具有比光源 110 更高像素密度的成像装置,包括 CCD 摄像机
127	像素敏感区域
φ	光路 105 与像素化源 110 的夹角,小于 90 度
θ	收集角,为全角度,约为 12 mrad

研究过程中,Gollier 等人创立了下列参数,像素显示功率(Pixel power deviation, PPD),表征有防眩层的闪耀点强度,而 PPD_r 则表示没有防眩层的闪耀点强度。通过人眼对比实验发现,PPD_r 值为 1~3% 时,人眼所能观察到的闪耀点最明显,PPD_r 处于 0.6~1.2% 时,人眼刚好可以观察到闪耀点。

Gollier 等人^[31]还认为闪耀点与观察者的生理参数(诸如瞳孔大小、视力水平)、观察者与像素显示屏的距离和观测者观察的角度等有关。此外,光透过的图像也会影响闪耀点,如果光源透过的图像是完全平整均匀且的,则不会有闪耀点现象。

Stillwell 等人^[20-21]利用心理物理学实验来量化玻璃表面防眩处理与人眼所观察的闪耀点之间的关系,由此验证 Gollier 等人研发仪器的有效性^[32]。他们研究了不同屏幕颜色、尺寸大小以及不同背景图片的情况下,可见闪耀点与 PPD_r 值之间的关系,如图 7~图 9 所示。

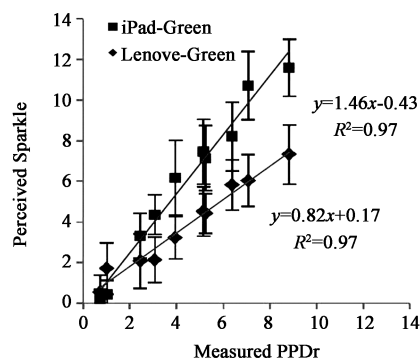


图 7 PPD_r 和可见闪耀点呈线性关系^[20]

Fig.7 Linear relationships between measured PPD_r and perceived sparkle.^[20]

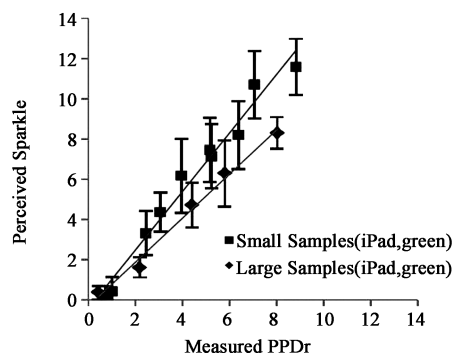


图 8 可见闪耀点与不同尺寸屏幕 PPD_r 的关系^[20]

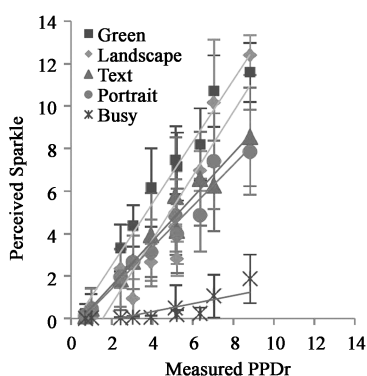
Fig.8 Sparkle measured using small samples is a conservative predictor of sparkle on display-sized samples.^[20]

从图 7~图 9 可以看出,PPDr 与人眼观测的闪耀点关系紧密。对于 PPD_r 值相同的玻璃样品,样品面积越小,闪耀点越明显;像素显示屏像素密度越高,闪耀点越明显;而且闪耀点出现与否和所显示的图像内容有关,无论何时绿色像素闪耀点现象都最明显^[20]。



(a) 图片逆时针方向依次为:绿色、文字、风景、忙碌场景、人物肖像

(a) Counterclockwise from top left: Green, Text, Landscape, Busy, Portrait



(b) PPD_r 和可见闪耀点的关系:除了风景照片外,其它照片 PPD_r 值比绿色的要低^[20]

(b) With the exception of the "Landscape" image at high PPD_r values, samples tested with real images show lower sparkle than those tested with a green screen.^[20]

图 9 不同背景图片 PPD_r 和可见闪耀点的关系
Fig.9 Relationship between images and sparkle

3.4 最大亮度均差法

Evans 等人^[33]认为闪耀点程度与屏幕亮度有关,且认为 Gollier 等人^[31]和 Becker 等人^[28]给出的 PPD 和 PPD_r 依赖于完全无闪耀点的参比情况并不科学,因为得到没有闪耀点的参比量常常是不大可能的。于是,Evans 等人提出最大亮度均差这样一个独立、无依赖性的参数作为闪耀点的表征参数,量化测试方法并建立相应的评价体系。

Evans 等人使用的 4.2 in 和 8.0 in 显示屏,拍摄两块防眩屏幕图像,一块有强烈闪耀点现象,而另一块则几乎没有,如图 10 所示^[33]。图 11 是图 10 所标出的点阵 AB 和 CD 的闪耀点强度分布。高闪耀点显示屏比低闪耀点有更大的最大亮度均差,由此计算出标准差 (Standard Deviation, SD)^[33]。

Evans 等人进行人眼观测实验,分别对闪耀

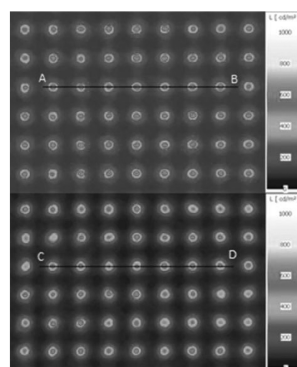


图 10 上部为低闪耀点结构,下部为高闪耀点结构^[33]

Fig.10 The top image shows low-sparkle configuration and the bottom image shows high-sparkle configuration.^[33]

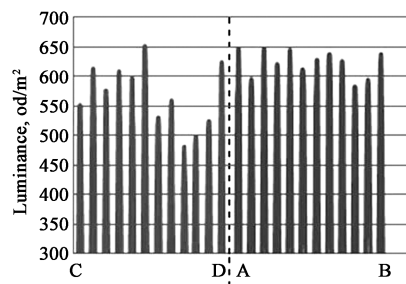


图 11 左为高闪耀点,右为低闪耀点^[33]

Fig.11 The left side has high sparkle and the right side, low sparkle^[33]

点程度打分。1~2 分为无可见闪耀点;3~5 分为可见但可接受的闪耀点;6~7 分为明显可见但仍能接受的闪耀点;8~10 分为不可接受的闪耀点,观测结果如图 12 所示^[33]。

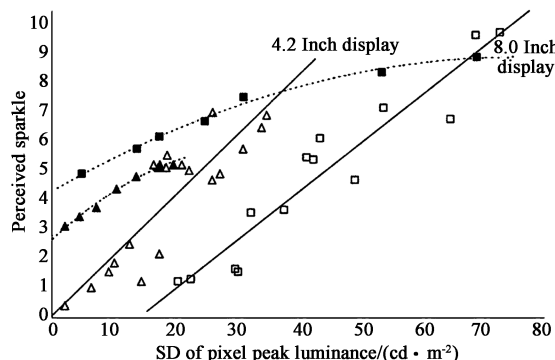


图 12 可见闪耀点与最大亮度标准差关系图(方块代表 8 in 显示屏,三角形代表 4.2 in 显示屏,实心标记代表高闪耀点样品在亮度降低情况下的结果)^[33]

Fig.12 Perceived sparkle against the SD of peak pixel luminance. The squares represent the 8-inch display and the triangles represent the 4.2-inch display. The filled-in icons represent one stack with high sparkle as the luminance is dimmed^[33]

可以看出,4.2 in(三角形图标)和 8 in(四方形图标)样品呈现的闪耀点程度与最大亮度标准差成线性关系。但当屏幕背景亮度降低(实心三角形与四方形图标),测试得到的闪耀点迅速降低,而可见的闪耀点只稍微下降。这表明当亮度对使用者保持不变,测量的标准差对可见闪耀点有线性关系。人眼在低亮度环境下对亮度的灵敏度比在高亮度环境下更敏感,因此在低亮度下人眼对单个像素亮度的偏差会比高亮度下更明显。

Evans 等人利用史蒂文斯定律(Stevens' Power Law)研究闪耀点与人眼观测亮度的敏感程度的关系^[33],研究结果如图 13 所示。

如图 13 所示,人眼对亮度的敏感程度(ΔL_s)与最大亮度标准差(SD)的乘积越大,Sparkle 越明显。当 $\Delta L_s \times SD$ 小于 0.6,人眼观测不到闪耀点; $\Delta L_s \times SD \in [0.6, 1.4]$,人眼可观察到闪耀点,但对显示效果影响不大;当 $\Delta L_s \times SD$ 大于 1.4,人眼可明显观察到闪耀点,且不可接受^[33]。

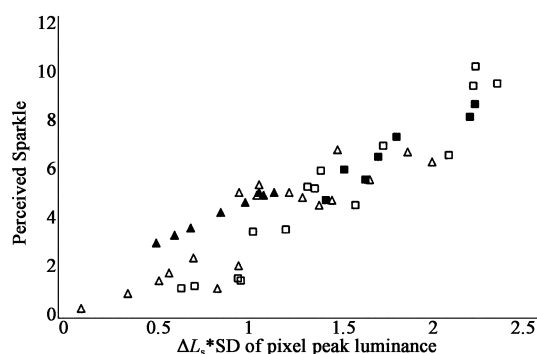


图 13 观察到的闪耀点与 $SD \times \Delta L_s$ 关系图,方块代表 8 in 显示屏,三角形代表 4.2 in 显示屏,实心标记代表高闪耀点样品在亮度降低情况下的结果^[33]

Fig.13 Perceived sparkle against $SD \times \Delta L_s$. The squares represent the 8-inch display and the triangles represent the 4.2-inch display. The filled-in icons represent one stack with high sparkle as the luminance is dimmed^[33]

3.5 电耦合摄像法

Chiang 等人研究了闪耀点与雾度之间的关系^[34-35]。他们选用雾度为 0.2%~52.3%的几种薄膜覆盖在显示器上,分别采用人眼观察法和电耦合摄像法(CCD 法)采集闪耀点数据并进行分析及曲线拟合,两种研究方法的对照结果如图 14 所示。

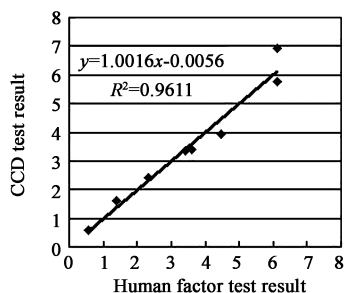


图 14 CCD 结果与人眼实验结果对比图^[35]

Fig.14 CCD test results versus human factor test results^[35]

图 14 表明,CCD 法与人眼实验结果契合度很高,相关度 R^2 达到 0.96。CCD 法标准差为 0.263,而人眼实验标准差为 0.903,说明 CCD 法对闪耀点强度分级相较于人眼观测法更为精密。同时,两种研究结果均表明闪耀程度与雾度不成比例。

Chiang 等人还研究了闪耀点与分辨率的关系^[35]。同样将薄膜覆盖于分辨率不同的屏幕上,分别利用人眼观测和 CCD 法采集不同分辨率屏幕的闪耀点数据,并进行对照分析。实验结果表明 CCD 法在不同分辨率下依旧和人眼观测结果相契合,而分辨率大小与闪耀程度的关系如图 15 所示。

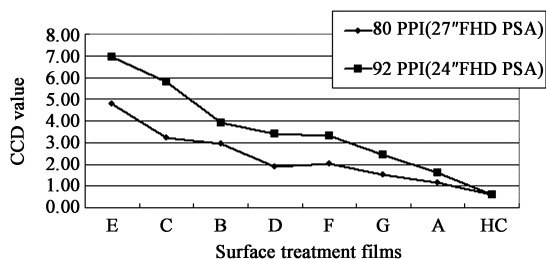


图 15 80、92 ppi 分辨率表面处理屏幕的 CCD 测试数据^[35]

Fig.15 CCD test result of surface treatment films on different cell with resolution of 80 and 92 PPI (pixel per inch)^[35]

从图中可以看出,像素密度(ppi)越高,闪耀点强度越大,可能是因为小的像素间隔产生了更加复杂的相干条件。

3.6 表面结构与特征尺寸评价法

Guilfoyle 等人^[22]认为平均特性最大特征尺寸(ALF, Average Characteristic Largest Feature Size)能有效度量具有不同表面形貌显示器上的闪耀点。最大特征是肉眼最容易看到的特征,包括凸起或隆起、凹陷等,且最大尺寸约小于 400 nm。ALF 是粗糙化表面上的视场中 20 个最大重复特征的平均截面线性尺寸,其标准偏差通常小于平均值的 40%,通常用光学显微镜来测量。ALF 和显示器闪耀点严重程度的目视等级之间

有密切关系,显示器面板的最小像素间距可大于 ALF。

Brian Hayden 等人^[36]提出随着防眩表面颗粒状结构尺寸(the size of the AG structures)减小,闪耀点数量会减少,显示效果也会变好。Weindorf 等人^[37]则认为像素尺寸与防眩表面结构相近时才会出现闪耀点,可以通过控制防眩表面结构尺寸来控制闪耀点。

4 结 论

防眩玻璃显示屏表面会出现像素级尺寸的闪耀点,使屏幕显示受到严重的干扰,尤其在环境照明强度高的条件下,更会大大降低显示屏的可视性,影响观测者的体验效果。

本文首次全面总结了目前研究和测试闪耀点的主要方法。但这些方法建立在对闪耀点的成因以及影响因素不同认识的基础上,均具有一定的局限性,不能完整评价闪耀点的特性。同时,目前各种测试方法多停留在定性分析闪耀点现象上,甚至借助主观统计和测评的基础上,而不能精确评估防眩显示屏闪耀点的程度,不利于显示屏质量的市场评价。

随着显示屏分辨率越来越高,闪耀点越来越多地受到关注,但目前对该问题的认知和研究较少。深入探讨闪耀点的形成原因,结合与屏幕间的距离,屏幕的光泽度,屏幕尺寸,环境亮度,屏幕透过率和雾度,甚至显示的图像类型等多种因素,开发定量评价闪耀点的方法和设备,并建立简便可行的测试方法与评价标准,是未来 Sparkle 精准测试的目标。本文将为这方面的研究提供丰富的素材和参考。

参 考 文 献:

- [1] 王丽,吴晓明,华玉林,等.插入电荷控制层对蓝色 OLED 发光性能的提高[J].发光学报,2014,35(1):84-89.
WANG L, WU X M, HUA Y L, *et al.* Improvement of performance of a blue organic light-emitting diode by inserting charge control layers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(1): 84-89. (in Chinese)
- [2] 孙军,张玉祥,赵卫华,等.基于 7-(9H-carbazol-9-yl)-N,N-diphenyl-9,9'-spirobi[fluoren]-2-amine 主体材料的高效红色电致磷光器件[J].发光学报,2014,35(3):327-331.
SUN J, ZHANG Y X, ZHAO W H, *et al.* Highly efficient red electrophosphorescent devices based on 7-(9H-carbazol-9-yl)-N, N-diphenyl-9, 9'-spirobi[fluoren]-2-amine host material [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(3): 327-331. (in Chinese)

- [3] 穆晓岭,曲加伟,郭永林,等.基于载流子平衡的效率及亮度提高的有机蓝光器件[J].发光学报,2015,36(8): 917-922.
MU X L, QU J W, GUO Y L, *et al.* Blue organic light-emitting device with improved efficiency and luminance based on carriers balance [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(8): 917-922. (in Chinese)
- [4] 徐瑞霞,陈子楷,赵铭杰,等.使用铜源漏电极的非晶氧化铜锌薄膜晶体管的研究[J].发光学报,2015,36(8): 935-940.
XU R X, CHEN Z K, ZHAO M J, *et al.* Amorphous indium-zinc-oxide thin-film transistors with copper source/drain electrodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(8): 935-940. (in Chinese)
- [5] 郭永林,梁续旭,胡守成,等. Al_2O_3 薄层修饰 SiN_x 绝缘层的 IGZO-TFTs 器件的性能研究[J].发光学报,2015,36(8):947-952.
GUO Y L, LIANG X X, HU S C, *et al.* Improvement of IGZO-TFTs performance with SiN_x gate insulator modified by Al_2O_3 film [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(8): 947-952. (in Chinese)
- [6] 陆红波,张超,吴少君,等.发光液晶材料的合成及发光特性研究[J].发光学报,2015,36(11):1227-1232.
LU H B, ZHANG C, WU S J, *et al.* Synthesis and photoluminescence property of luminescent liquid crystal material [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(11): 1227-1232. (in Chinese)
- [7] 经验.减反射玻璃的应用[C]//电子玻璃技术交流会论文集.北京:中国硅酸盐学会电子玻璃分会,2006:91-93.
JING Y. The application of anti-glare glass [C]//*Proceedings of the 2006 Conference on Electronic Glass Technology*. Beijing: The Chinese Ceramic Society Electronic Glass Branch, 2006: 91-93. (in Chinese)
- [8] 邴江东.减反射玻璃的制造方法[J].广东建材,1995(1):41-45.
LI J D. The method of anti-glare glass production [J]. *Guangdong Building Materials*, 1995(1): 41-45. (in Chinese)
- [9] 吕天,陈光,刘金锁.林林总总的深加工玻璃(连载一)[J].玻璃,2007,34(2):48-52,57.
LV T, CHEN G, LIU J S. Multifarious post processed glass (serial, part 1) [J]. *Glass*, 2007, 34(2): 48-52, 57. (in Chinese)
- [10] 王承遇,陶瑛.化学蒙砂玻璃(一)[J].玻璃与搪瓷,1999,27(1):55-59.
WANG C Y, TAO Y. Chemically frosting glass (1) [J]. *Glass & Enamel*, 1999, 27(1): 55-59. (in Chinese)
- [11] 王承遇,陶瑛.化学蒙砂玻璃(二)[J].玻璃与搪瓷,1999,27(2):59-63.
WANG C Y, TAO Y. Chemically frosting glass (2) [J]. *Glass & Enamel*, 1999, 27(2): 59-63. (in Chinese)
- [12] 王璧.防眩光膜材料的制备及性能研究[D].北京:北京化工大学,2006.
WANG B. The preparation and performance study of antiglare film [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006. (in Chinese)
- [13] 沈军,王珏,吴广明,等.化学法制备光学薄膜及其应用[J].原子能科学技术,2002,36(4/5):305-308.
SHEN J, WANG J, WU G M, *et al.* Techniques and applications of sol-gel derived coatings [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2002, 36(4/5): 305-308. (in Chinese)
- [14] DEY T, NAUGHTON D. Cleaning and anti-reflective (AR) hydrophobic coating of glass surface: a review from materials science perspective [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2016, 77(1): 1-27.
- [15] 高天荣,刘剑虹,李景天.玻璃蚀刻机理研究[J].化学世界,2000,41(11):610-611.
GAO T R, LIU J H, LI J T. Research on mechanism of etching glass [J]. *Chemical World*, 2000, 41(11): 610-611. (in Chinese)
- [16] 黄华义.蚀刻与酸抛光对玻璃表面反射光的改变[C]//2008年中国玻璃行业年会暨技术研讨会论文集.广州:中国建筑玻璃与工业玻璃协会,2008:285-289.
HUANG H Y. Influence of etching and acid polishing on glass surface reflected light [C]. *Proceedings of the 2008 China Glass Annual Conference and Technical Seminar*. Guangzhou: China Architectural and Industrial Glass Association, 2008: 285-289. (in Chinese)
- [17] 罗春炼.高透过防眩玻璃的制备与性能研究[D].上海:东华大学,2009.
LUOC L. Studies on preparation and capability of high transmittance anti-glare glass [D]. Shanghai: Donghua University, 2009. (in Chinese)

- [18] CARLSON K L, HART S D, NGUYEN K, *et al.* Glass and display having anti-glare properties; US, US20110062849A1 [P]. 2011-03-17.
- [20] STILLWELL A, FERWERDA J A, HOVAGIMIAN H, *et al.* P.29: *Distinguished Poster*: perception of sparkle in anti-glare display screens [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 1093-1095.
- [21] FERWERDA J A, STILLWELL A, HOVAGIMIAN H, *et al.* Perception of sparkle in anti-glare display screens [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2014, 22(2): 129-136.
- [22] GUILFOYLE D K, KOHLI J T, NGUYEN K, *et al.* Anti-glare surface treatment method and articles thereof; US, US9085484B2 [P]. 2015-07-21.
- [23] GOLLIER J, HART S D, NGUYEN K, *et al.* Glass having antiglare surface with low display sparkle; US, US20120218640A1 [P]. 2012-08-30.
- [24] BECKER M E. Sparkle measurement revisited; a closer look at the details [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2015, 23(10): 472-485.
- [19] ADLER R, TONG H S. Sparkle suppression displays; US, US4972117A [P]. 1990-11-20.
- [25] SVELTO O. *Principles of Lasers* [M]. 3rd ed. New York: Plenum Press, 1989.
- [26] CAIRNS D R, EVANS P. P-58: laser speckle of textured surfaces: towards high performance anti-glare surfaces [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2007, 38(1): 407-409.
- [27] HUCKABY D K P, CAIRNS D R. 36.2: quantifying “sparkle” of anti-glare surfaces [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 511-513.
- [28] BECKER M E, NEUMEIER J. 70.4: optical characterization of scattering anti-glare layers [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 1038-1041.
- [29] JULESZ B. Stereopsis and binocular rivalry of contours [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, 53(8): 994-999.
- [30] BECKER M E. 65-5L: *Late-News Paper*: sparkle evaluation with visual weighting [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 896-898.
- [31] GOLLIER J, HART S D, PIECH G A, *et al.* Apparatus and method for determining sparkle; US, US20120221264A1 [P]. 2012-08-30.
- [32] GOLLIER J, PIECH G A, HART S D, *et al.* 24.4: display sparkle measurement and human response [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 295-297.
- [33] EVANS C R, SKIBINSKI M, GULLICK D. Method of measuring and quantifying the amount of sparkle in display-touch panel stacks [J]. *Journal of Information Display*, 2014, 15(4): 191-194.
- [34] HSU T W, CHIANG Y H, CHEN C W. Novel evaluation method of sparkle for LCDs with different anti-glare films [C]//*Proceedings of the 21st international display workshops*. Niigata, Japan: Society of Information Display, 2014.
- [35] CHIANG Y H, HSU T W, LIN S C, *et al.* P-70: novel sparkling quantification method on TFT LCD [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 1400-1402.
- [36] HAYDEN B, BELKE R, WEINDORF P, *et al.* Anti-glare film sparkle optical modeling and prediction method [EB/OL]. [2015-10-26]. http://www.visteon.com/products/documents/anti_glare_film_sparkle_optical_modeling_and_prediction_method.pdf.
- [37] WEINDORF P, HAYDEN B. Anti-glare sharpness measurement investigations [C]//*SID Vehicle Displays & Interfaces*. Dearborn, MI: University of Michigan, 2012.

作者简介:王海风(1972—),女,山西大同人,博士,东华大学材料科学与工程学院,副研究员,从事特种玻璃(电子封接玻璃,防眩玻璃,玻璃的化学增强,低熔点无铅玻璃等),军工航天用功能无机材料,无机粉体/高分子复合材料等的研究。E-mail: whf2008@dhru.edu.cn