

基于亮度衰减模型的硅基 OLED 微显示器寿命研究

季渊^{1,2*}, 龚淑萍¹, 穆廷洲², 陈文栋², 张凯文¹¹上海大学微电子研究与开发中心, 上海 200072;²上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072

摘要 为了研究硅基 OLED(Organic Light Emitting Diodes)微显示器的使用寿命,通过老化实验提出一种基于恢复模型的 OLED 亮度衰减模型,该亮度衰减模型融合传统延伸型指数衰减模型与 OLED 亮度恢复模型。使用亮度退化数据拟合衰减模型中的待定参数,得到初始亮度和占空比与 OLED 寿命之间的定性和定量关系,实现 OLED 的高精度亮度衰减预测。研究表明,对比所提模型的预测数据与实测亮度衰减数据可得,所提模型的预测误差小,拟合精度高达 99.22%,相同初始亮度驱动下 OLED 的寿命预测准确度可提高 79.1%。PWM(Pulse-Width Modulation)驱动下硅基 OLED 微显示器的寿命性能较传统电流/电压驱动型优越,在 12.5%~87.5%的占空比下,可延长 1.6~20.9 倍的硅基 OLED 微显示器寿命。

关键词 光学器件; 硅基 OLED 微显示器; 亮度衰减模型; 寿命预测; 老化; 占空比

中图分类号 TN873

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1923003

Lifetime of OLED-on-Silicon Microdisplay Based on Luminance Decay Model

Ji Yuan^{1,2*}, Gong Shuping¹, Mu Tingzhou², Chen Wendong², Zhang Kaiwen¹¹Microelectronic Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China;²School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract Through aging experiments, an organic light-emitting diode (OLED) luminance decay model based on a restoration model is proposed to study the lifetime of OLED-on-silicon microdisplays. The luminance decay model is a fusion of the traditional stretched exponential decay and OLED brightness restoration models. The brightness degradation data is used to fit the undetermined parameters in the attenuation model to obtain the qualitative and quantitative relationship between the initial brightness and duty cycle and the life of the OLED to realize the high-precision brightness attenuation prediction of the OLED. Comparing with the measured, it can be concluded that the prediction error of the proposed model is small, and the fitting accuracy is as high as 99.22%. Under the same initial brightness drive, the life prediction accuracy of OLED can be improved by 79.1%. The lifetime performance of OLED-on-silicon microdisplay driven by pulse-width modulation (PWM) is superior to that of traditional current/voltage driven types. At a duty ratio of 12.5%~87.5%, the lifetime of OLED-on-silicon microdisplays can be increased by 1.6~20.9 times.

Key words optical devices; OLED-on-silicon microdisplay; luminance decay model; lifetime prediction; aging; duty cycle

OCIS codes 230.3670; 230.3990; 130.3990; 350.4800

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-04-15; 录用日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61774101)

通信作者: *jiyuan@shu.edu.cn

1 引言

硅基 OLED(Organic Light-Emitting Diode)微显示器凭借其分辨率高、刷新率高、体积小以及质量轻等优点被广泛应用于 AR(Augmented Reality)和 VR(Virtual Reality)等近眼显示系统^[1-2]。文献^[3-4]指出目前国内硅基 OLED 的大规模量产技术处于初期阶段,硅基 OLED 的产业化存在器件寿命短的问题。OLED 器件的寿命主要由非本质老化(黑点)与本质老化(亮度衰退)决定,非本质老化需通过封装技术的提升来改善,本质老化是由器件结构和材料等造成的器件性能衰退^[5],已有文献^[5-7]指出 OLED 可能的本质老化机制,但可准确、全面地解释 OLED 本质老化现象的机制仍在研究当中。此外,进行 4000 h 以上的亮度衰减测试来研究 OLED 寿命短的解决方案,但这会消耗大量的人力资源与物力资源^[8-9]。因此,为了迅速得到 OLED 的寿命数据,众多学者采用亮度衰减曲线模型来量化 OLED 的亮度衰减状态。

经典的亮度衰减模型 SED (Stretched Exponential Decay)^[7]于 2005 年提出,该模型能够准确拟合各种 OLED 器件的亮度衰减数据。成贵学等^[10-13]将图分析法、双线性回归法、最小二乘法(LSM)与经典失效分析模型,即韦布尔分布函数结合,用来预测各种应力下的 OLED 寿命,其效果等同于将传统 SED 模型的初始亮度参量转化为各种应力,且研究过程中均采用应力加速实验以迅速获取前期衰减数据,而加速过程中有引入其他衰退因素的可能性^[14]。根据不同灰度等级的产生策略,硅基 OLED 微显示器的调制方式可分为模拟幅值调制和数字脉宽调制^[15]。模拟幅值调制通过数模转换器将数字视频源信号转换为模拟信号以表示像素灰度信息,该驱动方式分为电流驱动与电压驱动两种;数字脉宽调制通过调制脉冲宽度来实现灰度控制,也称 PWM(Pulse-Width Modulation)驱动^[16]。经分析可得,驱动方式会对 OLED 器件的发光亮度产生影响,而且伴随整个亮度衰减过程,因此 2015 年 Oh 等^[17]提出一种在传统 SED 模型的基础上引入占空比为影响因子的亮度衰减模型,然而该文献并未给出该衰减模型的实际拟合效果。

因此,本文对硅基 OLED 微显示器的本质老化进行研究,分析比较两种驱动方式对硅基 OLED 寿命性能的影响,探索提高硅基 OLED 微显示器寿命的有效方法。首先开展三组老化实验以确定所提的

亮度衰减模型;其次利用方均根误差(Root Mean Squard Error, RMSE)和 R-squared 验证该衰减模型寿命预测的有效性,并与传统亮度衰减模型比较寿命预估效果;最后根据面向硅基 OLED 微显示器所构建的亮度衰减模型进行多方面的寿命性能分析,得到三个有效、可供提高硅基 OLED 微显示器寿命的结论。

2 亮度衰减模型的构建

针对硅基 OLED 微显示器提出一种亮度衰减模型,以量化其在老化过程中的亮度衰减数值,用来预估硅基 OLED 微显示器的寿命,该模型包括引入占空比为驱动变量的衰减(PSED)模型和量化 OLED 自发性亮度回升数值的恢复(DMBR)模型。

2.1 PSED 模型

传统 SED(TSED)模型^[18]常用来拟合和预估 OLED 器件的亮度衰减数值,其函数表达式为

$$L(t) = L_0 \exp[-(t/\tau)^\beta], \quad (1)$$

$$L_0^n t_{1/2} = C, \quad (2)$$

式中: $L(t)$ 为 t 时刻的亮度值; L_0 为初始亮度; $t_{1/2}$ 为 OLED 亮度衰减至初始亮度一半的点亮时长,即 OLED 器件的寿命; n 为与衰减速率有关的加速因子; C 和 β 分别为与 OLED 器件结构和材料有关的常量参数; τ 为特定的衰减时间刻度^[19]。同批次生产的 OLED 样片具有相同的 n 、 C 与 β 值。

同批次 OLED 样片在相同初始亮度、不同占空比的条件下点亮,样片之间的寿命差异明显,且占空比越大,亮度衰减速度越快,实测的衰减过程如图 1 所示。根据(2)式可知,TSED 中的 $t_{1/2}$ 仅由 L_0 决定,预估寿命值相同,该结论与上述实验结果相悖。因此,占空比应当作为寿命影响因子并引入亮度衰减模型中。

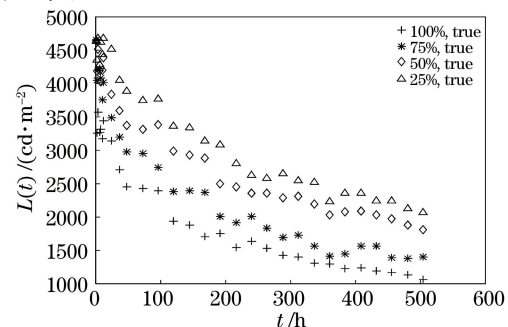


图 1 相同初始亮度、不同占空比下的实际衰减情况
Fig. 1 Actual decay under the same initial brightness and different duty cycle

根据 PWM 扫描算法的原理可知^[15],不同占空比下,显示亮度的差异在于点亮时间的长短。当 OLED 以占空比 D_{now} 运行,其实际的点亮时间 $t_{\text{real}} = t \cdot D_{\text{now}}$ 。因此,本研究提出一种 Pulse-SED 模型并将占空比引入衰减模型中,建立衰减亮度与占空比的联系,数学表达式为

$$L(t) = L_0 \exp \left[- \left(D_{\text{now}} \frac{t}{\tau_{\text{full}}} \right)^\beta \right], \quad (3)$$

式中: τ_{full} 为 $D_{\text{now}} = 1$ 的 τ 值。

2.2 OLED 亮度恢复模型

Zou 等^[20]在研究反偏置装置对 OLED 器件寿命影响的过程中发现, OLED 器件具有自发性恢复亮度的特性,恢复程度主要与断电时间的长短有关,且该现象只发生在 OLED 衰减前期^[21]。PWM 驱动方式下,当正向电流的占空比小于 100% 时, OLED 将被反向截止一段时间,而恢复现象发生在 OLED 熄灭的时间段,表明占空比的大小将影响亮度恢复程度。为了量化所测硅基 OLED 微显示器出现的自发性亮度恢复现象,本研究提出一种恢复模型,数学表达式为

$$\begin{cases} \Delta\alpha = (a \cdot D_{\text{now}} - b) \left(\frac{T}{D_{\text{now}}} t - \frac{1}{2} t^2 \right), & t_{\text{real}} \leq T \\ \Delta\alpha = \frac{1}{2} (a \cdot D_{\text{now}} - b) \left(\frac{T}{D_{\text{now}}} \right)^2, & t_{\text{real}} > T \end{cases}, \quad (4)$$

式中: a 和 b 为待定参数; a 为衰减程度, $\alpha = L(t) \div L_0$; $\Delta\alpha$ 为衰减程度的恢复值; T 为 OLED 恢复行为停止时的实际点亮时间 t_{real} 。

2.3 寿命预测

为了确定衰减模型,需要进行 OLED 在驱动变量 S_i (变量的组数 $i = 1, 2, \dots, m$) 下的老化实验,记 S_i 下第 k 号 ($k = 1, 2, \dots, n_i$) 样片在时刻 t 的亮度为 $L_{ik}(t)$, 则 t 时刻 n_i 块样片的平均亮度 $L_i(t)$ 为

$$L_i(t) = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} L_{ik}(t). \quad (5)$$

由(5)式可得每组驱动变量下 OLED 样品的平均亮度衰减数据 $[t, L_i(t)]$ 。结合(3)式和(4)式,各驱动量下 $L_i(t)$ 随时间的变化关系可表示为

$$L_i(t) = L_0 \left\{ \exp \left[- \left(D_{\text{now}} \frac{t}{\tau_{\text{full}}} \right)^\beta \right] + \Delta\alpha \right\}. \quad (6)$$

(6)式中的待定参数可通过最小二乘法结合 $[t, L_i(t)]$ 来得到,从而确定寿命预测模型。根据 OLED 寿命的定义, $t_{1/2}$ 为(6)式中 $L_i(t)$ 衰减至 $0.5L_0$ 的运行时间 t 。

2.4 拟合度评价

为了评价亮度衰减模型的有效性,通过 RMSE (μ) 和 R-squared (R^2) 来评估拟合效果。 μ 值越小,衰减模型的准确性越好; R^2 在 0~1 之间取值,值越接近于 1,拟合度越高。

2.5 模型的建立与验证流程

首先采用(5)式对变量 S_i 下的亮度衰减数据 $[t, L_{ik}(t)]$ 进行处理,并采用最小二乘法拟合(6)式的待定系数来得到所提模型,用来预测硅基 OLED 任意时刻的亮度值。其次对所提模型和传统亮度衰减模型进行同一驱动条件下的亮度衰减拟合,并通过 RMSE 与 R^2 来验证拟合效果。最后比较各模型的预测效果,得到最优的亮度衰减模型。具体流程如图 2 所示。

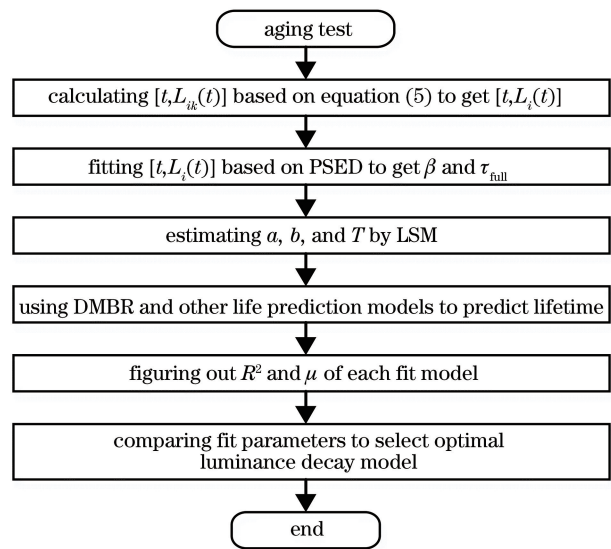


图 2 亮度衰减模型的建立与验证流程

Fig. 2 Establishment and verification process of luminance decay model

3 亮度衰减模型的实现

以硅基 OLED 微显示器为研究对象,在不同的驱动条件下进行亮度衰减实验,按照一定的时间间隔来检测亮度数据,并使用亮度衰减模型对实测数据进行处理,以预估研究对象的亮度衰减状态。

3.1 方案设计

本研究需开展三组老化实验,实验参数的设置如表 1 所示,其中 F 为固定驱动量, M 为检测量。(6)式待定系数所需的亮度衰减数据由实验 1 给出,实验 2 和 3 的检测数据作为评估衰减模型预测准确性的参考值。除实验 3 以外,驱动电压固定为 OLED 的正常工作电压,即 5 V。

表 1 实验参数的设置
Table 1 Setting of experimental parameters

Experimental	F	S_i	M
1	$U=5\text{ V}$	$D_{\text{now}}=12.5\%, 37.5\%, 62.5\%, 87.5\%, 100\%$	$L_{ik}(t)$
2	$U=5\text{ V}$	$D_{\text{now}}=25\%, 50\%, 75\%$ $U=6.38\text{ V}, D_{\text{now}}=25\%$	$L_{ik}(t)$
3	$L_0=4600\text{ cd/m}^2$	$U=5.93\text{ V}, D_{\text{now}}=50\%$ $U=5.19\text{ V}, D_{\text{now}}=75\%$	$L_{ik}(t)$

根据预备实验, OLED 的亮度衰减速度随着时间的增加呈下降趋势, 因此老化前期的采样点比老化后期密集。采样时间的间隔设为前期 4 h、中期 12 h 和后期 24 h, 测试终止时间固定为 500 h, 三组实验中每个 S_i 下的 OLED 样片数均为 20。

3.2 亮度衰减模型的确定

实测样片采用本课题组自研的硅基 OLED 微

显示器, 参数指标如表 2 所示, 其中 PPI 为像素密度。样片如图 3(a) 和图 3(b) 所示。亮度测量由专业的光谱彩色亮度计 (SRC-200M) 完成, 结果如图 3(c) 所示。每个 S_i 下的 20 组数据由 (5) 式计算可以得到平均亮度衰减数据 $[t, L_i(t)] (t \geq 0)$, 实验 1~3 的部分实测数据如表 3 所示。

表 2 硅基 OLED 微显示器的规格参数

Table 2 Specifications for OLED-on-silicon microdisplays

Resolution / (pixel × pixel)	Color	Chip size/cm	Single pixel size / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	PPI
1280 × 1024	Monochrome	1.651	10 × 10	2500

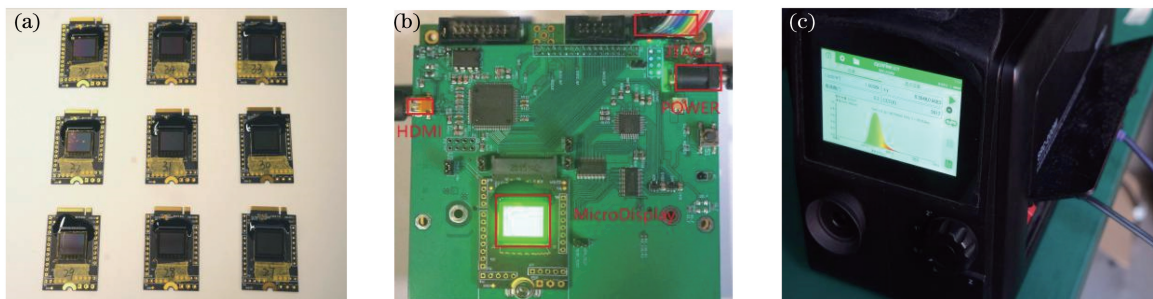


图 3 实验样品与测试仪器。(a) 样片; (b) 点亮的样片; (c) 亮度计

Fig. 3 Experimental samples and test instrument. (a) Sample pieces; (b) lighted sample piece; (c) luminance meter

表 3 部分实测数据

Table 3 Partial measured data

t/h	$L(t) / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$										
	Experimental 1				Experimental 2				Experimental 3		
	$D_{\text{now}} = 12.5\%$	$D_{\text{now}} = 37.5\%$	$D_{\text{now}} = 62.5\%$	$D_{\text{now}} = 87.5\%$	$D_{\text{now}} = 100\%$	$D_{\text{now}} = 25\%$	$D_{\text{now}} = 50\%$	$D_{\text{now}} = 75\%$	$D_{\text{now}} = 25\%$	$D_{\text{now}} = 50\%$	$D_{\text{now}} = 75\%$
0	508	1666	2787	4091	4670	1039	2138	3451	4627	4643	4656
24	474	1413	2216	3090	3396	918	1753	2671	4510	3840	3491
48	459	1311	1998	2720	2939	868	1602	2378	3891	3369	2975
72	447	1236	1841	2462	2624	830	1492	2171	3744	3316	2955
96	438	1175	1717	2260	2382	799	1405	2009	3770	3385	2743
120	430	1124	1614	2095	2185	773	1331	1874	3361	2993	2379
144	422	1079	1525	1955	2020	750	1268	1760	3336	2931	2390
168	416	1039	1448	1834	1878	729	1212	1660	3136	2888	2374

(3) 式中的 τ 和 β 由实验 1 的实测数据拟合, 可以分别代入以得到 $\tau_{\text{full}}=199.7, \beta=0.54$ 。将 $\tau_{\text{full}}, \beta, L_0$ 和 D_{now}

$$L(t) = L_0 \cdot \exp \left[- \left(D_{\text{now}} \frac{t}{199.7} \right)^{0.54} \right], \quad (7)$$

可得到不同驱动条件下的 Pulse-SED 模型。结合 (7) 式与实验 1 的实测数据, 可以计算得到占空比分别为 12.5%、37.5%、62.5% 和 87.5% 的亮度

恢复数值。同时, 由各占空比下恢复数值增长速度为 0 (恢复现象停止) 的运行时间 t 得出, 样片 T 在 [42, 48] 区域内取值。当 T 值为 48 h 时, 恢复模型的效果最优, 模型的数学表达式为

$$\begin{cases} \Delta\alpha = (1.542 \cdot 10^{-5} D_{\text{now}} - 1.624 \cdot 10^{-7}) \left(\frac{48}{D_{\text{now}}} t - \frac{1}{2} t^2 \right), & t_{\text{real}} \leq 48 \\ \Delta\alpha = \frac{1}{2} (1.542 \cdot 10^{-5} D_{\text{now}} - 1.624 \cdot 10^{-7}) \left(\frac{48}{D_{\text{now}}} \right)^2, & t_{\text{real}} > 48 \end{cases} \quad (8)$$

3.3 实验结果

3.3.1 一般驱动条件

根据 (6) 式可知, 组合 (7) 式和 (8) 式即可得到本文的研究对象, 即亮度衰减模型。将实验 2 的驱动参量代入具体模型中, 即可预估样片在电压为 5 V、占空比分别为 25%、50% 及 75% 条件下的亮度衰减数据。为了验证亮度衰减模型的准确性, 将所提模型与 DDDM (Degradation-Data-Driven

Method)^[22]、ALEM (Accelerated Life Extrapolation Model)^[13] 及 MSED (Modified Stretched Exponential Decay) 模型^[17] 进行对比, 同时在实验 2 的条件下进行亮度衰减预测, 拟合效果如图 4 所示。从图 4 可以看到, 实验 2 的实测数据随时间的增加呈非线性衰减, 且随着占空比的增大, 衰减幅度增加, 符合 OLED 的亮度衰减特征, 说明测试数据与测试方案具有有效性。

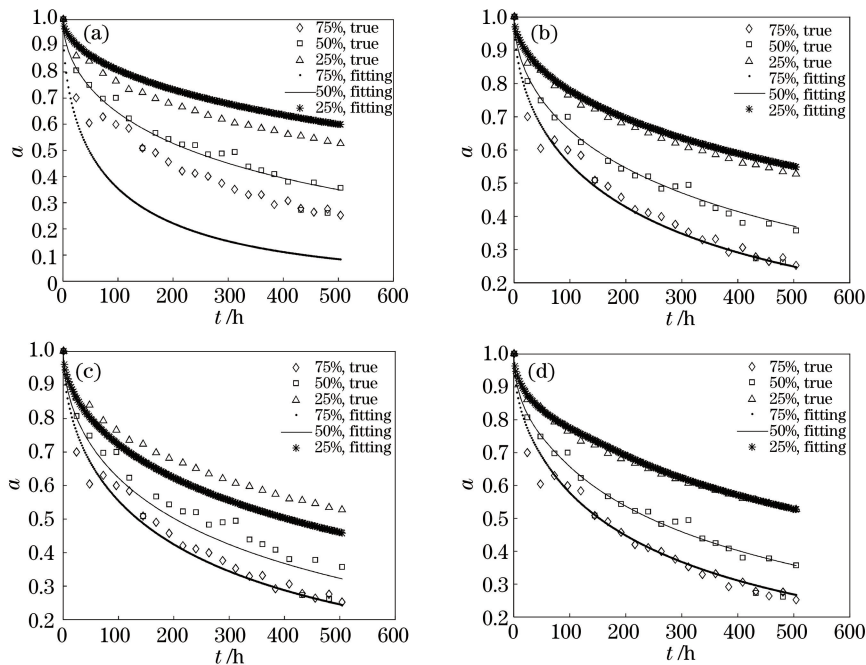


图 4 亮度衰减模型的拟合效果。(a) DDDM; (b) ALEM; (c) MSED; (d) 所提模型

Fig. 4 Fitting effect of luminance decay model. (a) DDDM; (b) ALEM; (c) MSED; (d) proposed model

各衰减模型的预测效果如表 4 所示。从表 4 可以看到, 4 种衰减模型的拟合系数最高均可达到 0.94, 其中 DDDM 模型与 MSED 模型的预测效果不均匀, 不同占空比下的拟合度相差较大, ALEM 模型与本模型在不同占空比下的拟合度均在 0.90 以上, 表明这两种模型预测效果的均匀性较好。比

较拟合效果的评估参数, 按照从小到大的顺序进行排列, 即 $\mu_{\text{DMBR}} < \mu_{\text{ALEM}} < \mu_{\text{MSED}} < \mu_{\text{DDDM}}, R_{\text{DDDM}}^2 < R_{\text{MSED}}^2 < R_{\text{ALEM}}^2 < R_{\text{DMBR}}^2$ 。实验结果表明, 本模型的拟合效果优于其他三种模型, 预测准确度在 94.53%~99.22%, 误差较小。

表 4 一般驱动条件下亮度衰减模型的预测效果

Table 4 Predicting effect of luminance decay model under general driving conditions

Parameter	DDDM			ALEM			MSED			Proposed model		
	$D_{\text{now}} = 25\%$	$D_{\text{now}} = 50\%$	$D_{\text{now}} = 75\%$	$D_{\text{now}} = 25\%$	$D_{\text{now}} = 50\%$	$D_{\text{now}} = 75\%$	$D_{\text{now}} = 25\%$	$D_{\text{now}} = 50\%$	$D_{\text{now}} = 75\%$	$D_{\text{now}} = 25\%$	$D_{\text{now}} = 50\%$	$D_{\text{now}} = 75\%$
μ	0.0575	0.0396	0.1974	0.0198	0.0445	0.0290	0.0540	0.0451	0.0304	0.0106	0.0407	0.0285
R^2	0.7697	0.9482	-0.2345	0.9726	0.9346	0.9734	0.7971	0.9329	0.9708	0.9922	0.9453	0.9743

3.3.2 相同初始亮度

通过调节驱动电压将不同占空比下的 OLED 样片设置在相同的初始亮度,在此条件下进行对比测试,具体的驱动参数设置如表 1 所示(实验 1 ($D_{\text{now}} = 100\%$)和实验 3)。此外,在小范围内调高电压以补偿亮度将会加速 OLED 器件的亮度衰退,相比之下占空比的减小所带来的寿命延长效果更为明显,因此在该对比测试中仅考虑占空比对寿命的影响。

实验 1 中,在 $L_0 = 4670 \text{ cd/m}^2$ 、 $D_{\text{now}} = 100\%$ 的条件下,样片的平均寿命为 101 h。与之相比,实验 3 的初始亮度较 4670 cd/m^2 最大相差 43 cd/m^2 ,可忽略不计,在 25%、50%和 75%的占空比下寿命分别为 393.5, 294.9, 149.8 h。以实验 1 ($D_{\text{now}} = 100\%$)的实测寿命为准,将上述两种情况的实测寿命进行比较,寿命差值如表 5 所示。实验结果表明,相同的初始亮度下,由不同占空比驱动的样片寿命差值可达 292.5 h。

表 5 相同初始亮度下亮度衰减模型的预测效果

Table 5 Prediction effect of luminance decay model with the same initial brightness

Parameter	Measurement			TSED			Proposed model		
	$D_{\text{now}} = 25\%$	$D_{\text{now}} = 50\%$	$D_{\text{now}} = 75\%$	$D_{\text{now}} = 25\%$	$D_{\text{now}} = 50\%$	$D_{\text{now}} = 75\%$	$D_{\text{now}} = 25\%$	$D_{\text{now}} = 50\%$	$D_{\text{now}} = 75\%$
Lifetime difference /h	292.5	193.9	48.8	7.1	7.5	7.9	481.5	142.1	51.1
Relative error /%				97.6	96.1	83.8	64.6	26.7	4.7

在实验 3 的驱动条件下,对本模型与 TSED 模型进行寿命的预估效果比较。TSED 模型在 25%、50%和 75%占空比下的样片预测寿命分别为 93.9, 93.5, 93.1 h, 本模型的预测寿命依次为 582.5, 243.1, 152.1 h。将上述两种模型的预测结果分别与实验 1 ($D_{\text{now}} = 100\%$)的实测寿命进行比较,寿命差值如表 5 所示。从表 5 可以看到, TSED 模型在不同占空比下的预测结果相似,且均与实际寿命有较大偏差,表明该模型不适合在相同初始亮度下的寿命预测;与之相比,本模型的预测误差率均比 TSED 模型低,且误差率最低仅为 4.7%,准确率相对提高 79.1%。因此,在相同初始亮度、不同驱动变量的条件下,本模型对硅基 OLED 微显示器的寿命预估效果较好,比 TSED 模型具有更高的可靠性。

4 基于亮度衰减模型的分析

根据本亮度衰减模型的特征可知,占空比对 OLED 器件的寿命具有较大影响。首先当 t 值相同时, D_{now} 值越小, t_{real} 值越小。其次占空比影响 OLED 器件的自发性亮度恢复程度, D_{now} 值越小, $\Delta\alpha$ 值越大,效果如图 5 所示。经上述分析可得,驱

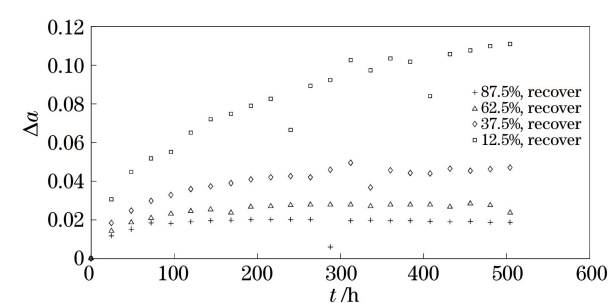


图 5 各占空比下硅基 OLED 器件的恢复效果

Fig. 5 Recovery effect of OLED-on-silicon devices under different duty cycles

动占空比的越小, OLED 器件的寿命越长。

通过相同初始亮度下的衰减测试发现,在 0.19~1.38 V 的电压范围内,增加驱动电压对寿命性能并无明显影响。因此,可通过上调电压并降低占空比来得到目标亮度值,这有利于延长 OLED 器件的寿命,寿命延长效果如表 5 所示。实验结果表明,该方案可将 OLED 器件的寿命延长 48.8~292.5 h,可取性较高。

在电压/电流驱动的方式下, $t_{\text{real}} = t$, 相当于 PWM 驱动方式下的 $D_{\text{now}} = 100\%$, 即没有自发性亮度恢复现象的发生。两种驱动方式下的样片实测寿

命如表 6 所示。从表 6 可以看到,相同驱动电压的条件下,在占空比范围为 12.5%~87.5%,PWM 驱动方式可延长 1.6~20.9 倍 OLED 器件的寿命。实验结果表明,PWM 驱动方式下硅基 OLED 微显示器的寿命性能优于传统电压/电流驱动方式。

表 6 PWM 驱动与模拟驱动下硅基 OLED 器件的寿命

Table 6 Lifetime of OLED-on-silicon devices under PWM and analog drive

Parameter	Analog drive		PWM drive		
$D_{\text{now}}/\%$		87.5	62.5	37.5	12.5
Lifetime/h	80.0	128.1	186.7	342.7	1671.5

5 结 论

本文基于三组硅基 OLED 微显示器在不同驱动条件下的亮度测试,建立一种基于恢复模型的硅基 OLED 亮度衰减模型,并将该模型作为分析比较驱动方式对硅基 OLED 微显示器寿命性能的影响,以及讨论延长硅基 OLED 微显示器寿命的基础。实验结果表明,所提的亮度衰减模型的预估准确度可达 99.22%,且实测老化数据均匀分布在该模型拟合曲线的上下,表明该模型可精准拟合硅基 OLED 微显示器的亮度衰减,且精确度高于传统 OLED 寿命预测模型。此外,本文从理论上论证 TSED 模型不适合预估在相同初始亮度、不同驱动条件下的硅基 OLED 寿命,并通过实测进行验证,针对该情况进行改善,误差率可减小至 4.7%,然而预测效果的均匀性较差,需要持续研究改进。最后基于所提模型的特征,对硅基 OLED 器件的寿命性能进行分析,结果表明 PWM 驱动方式下硅基 OLED 微显示器的寿命性能优于传统电压/电流驱动方式,而且在 PWM 的驱动下,驱动的占空比越小,硅基 OLED 微显示器的寿命越长。

参 考 文 献

- [1] Huang Z X, Huang R, Zhao B H, et al. Gamma correction with adjustable segmentation for OLED-on-silicon microdisplay[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2020, 35(8): 825-830.
黄振兴, 黄苒, 赵博华, 等. 应用于硅基 OLED 微显示器的分段可调伽马校正[J]. 液晶与显示, 2020, 35(8): 825-830.
- [2] Asaki R, Yokoyama S, Kitagawa H, et al. A 0.23-in. high-resolution OLED microdisplay for wearable displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2014, 45(1): 219-222.
- [3] Zhao Y, Wen X J. Accelerate the application of

OLED-on-silicon display in the field of virtual reality [EB/OL]. (2020-08-04) [2021-03-22]. <https://www.fx361.com/page/2020/0804/6922208.shtml>.

赵燕, 温晓君. 加快推进硅基 OLED 显示在虚拟现实领域的应用 [EB/OL]. (2020-08-04) [2021-03-22]. <https://www.fx361.com/page/2020/0804/6922208.shtml>.

- [4] Lin L, Li B H. Application progress of light-emitting diode for photodynamic therapy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 150001.
林立, 李步洪. 发光二极管在光动力疗法中的应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 150001.
- [5] Schmidbauer S, Hohenleutner A, König B. Chemical degradation in organic light-emitting devices: mechanisms and implications for the design of new materials[J]. Advanced Materials, 2013, 25(15): 2114-2129.
- [6] Shen J, Wang D, Langlois E, et al. Degradation mechanisms in organic light emitting diodes [J]. Synthetic Metals, 2000, 111/112: 233-236.
- [7] Féry C, Racine B, Vaufrey D, et al. Physical mechanism responsible for the stretched exponential decay behavior of aging organic light-emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(21): 213502.
- [8] Zhang W, Wu Z, Liang S, et al. Study on scalable coulombic degradation for estimating the lifetime of organic light-emitting devices [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(15): 773-780.
- [9] Yoshioka T, Sugimoto K, Ohata H, et al. P-129: comprehensive analysis of luminous decay curves for accelerated lifetime testing of OLEDs [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2015, 46(1): 1650-1653.
- [10] Cheng G X, Jiang X F, Tang Y Q, et al. Life prediction of white OLED under Weibull distribution based on MAM [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(1): 26-29.
成贵学, 蒋晓锋, 汤勇奇, 等. Weibull 分布下基于 MAM 的白光 OLED 寿命预测 [J]. 半导体光电, 2012, 33(1): 26-29.
- [11] Zhang J P, Wu L, Cheng G L, et al. Constant-step stress accelerated life tests of white OLED by BRM [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(2): 187-192.
张建平, 吴亮, 成国梁, 等. 基于 BRM 的白光 OLED 恒定与步进应力加速寿命试验研究 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(2): 187-192.
- [12] Zhang J P, Wang C, Chen X, et al. Experimental test and life estimation of the OLED at normal

- working stress based on the luminance degradation model[J]. *Luminescence*, 2015, 30(4): 371-375.
- [13] Zhang J P, Zong Y, Zhu W Q, et al. A novel model of life prediction for photoelectric products and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0223001.
张建平, 宗雨, 朱文清, 等. 光电产品的新型寿命预测模型及其应用[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0223001.
- [14] Lan X Y, Yang X, Su S C, et al. Effects of current and temperature stress on reliability of LED bulbs [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 082301.
蓝栩砚, 杨欣, 宿世臣, 等. 电流和温度应力对 LED 球泡灯可靠性的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 082301.
- [15] Chen W D, Ji Y, Mu T Z, et al. Atomized scan method for high-definition silicon-based OLED microdisplays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(10): 4293-4299.
- [16] Mu T Z, Ji Y, Chen W D, et al. Organic-light-emitting-diode-on-silicon microdisplay based on double-frame digital-analog-hybrid scanning strategy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 092302.
穆廷洲, 季渊, 陈文栋, 等. 基于双帧数模融合扫描的硅基有机发光二极管微显示器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 092302.
- [17] Oh K, Hong S K, Kwon O K. Lifetime extension method for active matrix organic light-emitting diode displays using a modified stretched exponential decay model[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(3): 277-279.
- [18] Fan R, Zhang X N, Tu Z T. Luminance compensation and optimization to delay OLED degradation based on equivalent lifetime detection[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2020, 8: 626-634.
- [19] Yoshioka T, Sugimoto K, Katagi K, et al. An improved method for lifetime prediction based on decoupling of the joule self-heating effect from coulombic degradation in accelerated aging tests of OLEDs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, 45(1): 642-645.
- [20] Zou D C, Yahiro M, Tsutsui T. Spontaneous and reverse-bias induced recovery behavior in organic electroluminescent diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(19): 2484-2486.
- [21] Liu X L, Liu H H, Zheng X R, et al. Driving circuit design of OLED matrix displays and relative OLED characteristics[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(2): 140-144.
刘小灵, 刘汉华, 郑学仁, 等. OLED 点阵驱动电路设计及 OLED 驱动特性研究 [J]. *液晶与显示*, 2005, 20(2): 140-144.
- [22] Fan J J, Yung K C, Pecht M. Lifetime estimation of high-power white LED using degradation-data-driven method [J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2012, 12(2): 470-477.