

文章编号:1004-4213(2010)s1-0034-5

用于微显示的顶发射 OLED 的 SPICE 仿真模型研究

宗绍鑫,李传南,吕晨怀,谢国华,赵毅,刘式墉

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区,长春 130012)

摘 要:常用的 EDA 软件如 HSPICE 中没有顶发射有机发光器件的仿真模型,导致设计硅基有机发光器件微显示像素驱动电路时存在困难.为此,本文研究了用于微显示的顶发射有机发光器件的 SPICE 仿真模型,分别讨论了二极管连接的 MOS 管模型、单个二极管以及双二极管并联模型等方案,分析了其等效电路,同时根据顶发射有机发光器件的实验数据拟合了对应的电路参量,最后用 HSPICE 软件对三种模型的等效电路进行仿真和结果比较.比较发现采用二极管连接的 MOS 管模型得到的拟合误差最小,但仿真误差最大;采用单个二极管模型得到的拟合与仿真误差都较大;采用双二极管并联模型得到的拟合与仿真误差均较小且满足驱动电路设计的要求.结果表明双二极管并联模型可作为用于硅基有机发光器件微显示电路设计中的顶发射有机发光器件的 SPICE 仿真模型.

关键词:微显示;顶发射 OLED;SPICE;仿真模型

中图分类号: TN873.3

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb201039s1.0034

0 引言

有机发光器件(Organic Light-Emitting Device, OLED)具有主动发光、响应时间短、工作温度范围大、视角宽等优点,极有可能取代液晶显示器而成为新一代主流显示技术^[1-2].硅基有机发光显示屏(OLED-on-Silicon)是一种新型微显示技术,它利用了 OLED 的上述优点,将顶发射 OLED(Top-Emitting OLED, TOLED)直接集成于单晶硅驱动电路之上,且在衬底芯片上可集成像素驱动电路、行列控制电路等外围驱动电路模块,这些电路模块与 CMOS 工艺兼容,从而有效提高显示器的性能,拓展 OLED-on-Silicon 微显示器在诸如头盔显示器、摄像机、娱乐设备等需要近眼显示的装置中的应用.它具有显示屏面积小、图像分辨率高、便于携带等优点^[1-4].

微显示中由于微显示像素面积小, OLED 像素的驱动电流也小,因此对 TOLED 的器件性能要求与传统 OLED 也不尽相同,比如 $I-V$ 关系曲线.并且 OLED-on-Silicon 衬底在流片之前需要利用 EDA 软件进行模拟仿真设计,而常用的 EDA 软件如 HSPICE 中没有 OLED 或 TOLED 仿真模型,导致设计 OLED-on-Silicon 像素驱动电路时存在困

难.

为了解决这一问题,本文设计了一种用于 TOLED 仿真设计的双二极管并联模型,仿真数据与实验数据相比较,仿真误差均小于 8%,满足驱动电路设计的要求.

1 TOLED 的结构

在 OLED-on-Silicon 微显示中, OLED 显示器件制作在硅衬底芯片之上,其结构如图 1,每个 OLED 像素点的发光器件的阳极通过过孔金属与驱动电路连接.

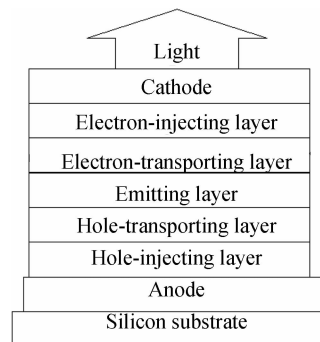


图 1 OLED-on-Silicon 结构

Fig. 1 Structure of OLED-on-Silicon

TOLED 的结构从上往下依次是透明阴极、电

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(No. 2010CB327701)和吉林省科技厅支撑计划重点项目(No. 20093056)资助

第一作者:宗绍鑫(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为 OLED 驱动电路设计. Email: zsxin87@126.com

导师(通讯作者):李传南(1969-),男,教授,主要研究方向为高性能 OLED 器件制备和 OLED 驱动电路设计. Email: licn@jlu.edu.cn

收稿日期:2010-08-30; **修回日期:**2010-09-27

子注入层、电子传输和发光层、空穴传输层、空穴注入层和阳极,因为光从顶部发射,故采用透明阴极。

2 TOLED 的 SPICE 仿真模型研究

实验中制备的 TOLED 的 $I-V$ 特性如图 2。一个 OLED 像素面积为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$,微显示器包含比如 800×600 个像素点阵。

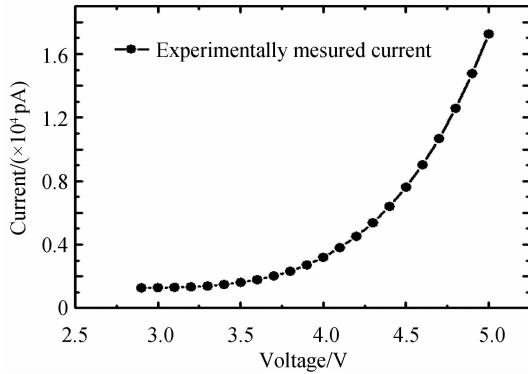


图 2 实验中制备的 TOLED 的 $I-V$ 特性
Fig. 2 Experimentally measured current vs. VOLED of the TOLED

2.1 二极管连接的 NMOS 模型

首先采用二极管连接的 NMOS 模型模拟 TOLED^[10],如图 3,其中 OLED 的并联电容 $C_{\text{OLED}} = 15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m} \times 25\text{ nF}/\text{cm}^2 = 0.042\ 25\ \text{pF}$ 。

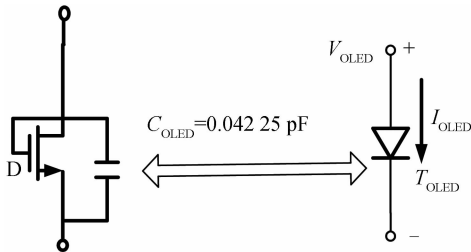


图 3 二极管连接的 NMOS 模型
Fig. 3 The diode-connected NMOS model of TOLED

由 MOS 管饱和区电流公式 $I_{\text{OLED}} = \frac{1}{2} \mu C_{\text{ox}} \frac{W}{L} \cdot (V_{\text{OLED}} - V_{\text{th}})^2 (1 + \lambda V_{\text{OLED}})$,整理得

$$I_{\text{OLED}} = \frac{1}{2} \mu C_{\text{ox}} \frac{W}{L} [V_{\text{th}}^2 + (\lambda V_{\text{th}}^2 - 2V_{\text{th}})V_{\text{OLED}} + (1 - 2\lambda V_{\text{th}})V_{\text{OLED}}^2 + \lambda V_{\text{OLED}}^3] \quad (1)$$

式中 μ 是载流子的迁移率; C_{ox} 是单位面积的栅氧化电容; W/L 是 MOS 管宽长比; V_{th} 是 MOS 管的阈值电压; λ 是沟道长度调制系数。

然后在 Origin 软件中选取拟合方程: $y = a + bx + cx^2 + dx^3$,对 TOLED 的 $I-V$ 曲线拟合得到

$$y = -83\ 917.862\ 2 + 78\ 809.242\ 36x - 24\ 427.781\ 45x^2 + 2\ 541.617\ 16x^3 \quad (2)$$

由方程(1)、(2)对应项系数相等,得

$$a = \frac{1}{2} KP \frac{W}{L} V_{\text{th}}^2$$

$$b = \frac{1}{2} KP \frac{W}{L} (\lambda V_{\text{th}}^2 - 2V_{\text{th}})$$

$$C = \frac{1}{2} KP \frac{W}{L} (1 - \lambda V_{\text{th}})$$

$$d = \frac{1}{2} KP \frac{W}{L} \lambda$$

式中, KP 是工艺跨导参量。最终计算得: $KP = -1.329\ 9e^{-5}\ \text{A}/\text{V}^2$, $W/L = 1/1142.9$, $\lambda = -0.337\ 3$, $V_{\text{th}} = 3.323\ \text{V}$ 。

将上述参量代入对应的等效 NMOS 电路(图 3)并在 HSPICE 中仿真,可得到 TOLED 仿真 $I-V$ 特性曲线。图 4、图 5 分别为 TOLED 拟合电流和实验测量电流曲线、仿真电流和实验测量电流曲线。

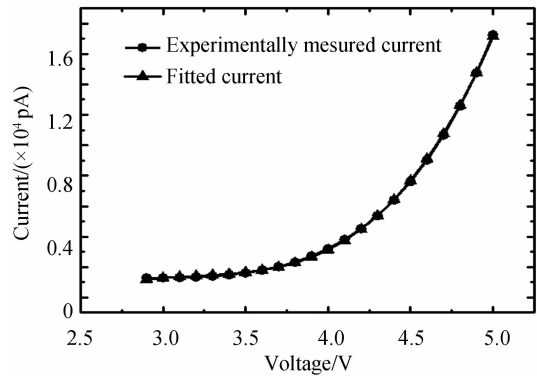


图 4 TOLED 拟合电流和实验测量电流曲线
Fig. 4 Fitted current and experimentally measured current vs. VOLED

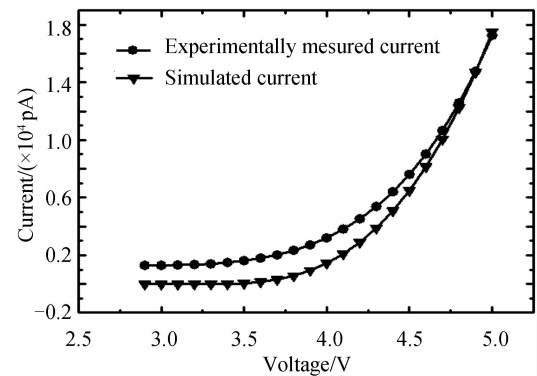


图 5 TOLED 仿真电流和实验测量电流曲线
Fig. 5 Simulated current and experimentally measured current vs. VOLED

由图可见,其拟合电流和实验测量电流误差较小,最小误差点在 $3.6\ \text{V}$ 为 $0.045\ 65\%$,最大误差点在 $2.9\ \text{V}$ 为 $-8.250\ 11\%$ 。但是仿真电流和实验测量电流相比误差较大,最小误差点在 $4.8\ \text{V}$ 为 $-2.753\ 41\%$,最大误差点在 $3.2\ \text{V}$ 为 $-100.478\ 39\%$ 。其原因是由于 Origin 软件拟合过程是一个纯数学计算过程,只考虑参量的最佳匹配,而不考虑参量实际物理意义。但由此得到的 KP 、 λ 是负数,这是典型的 PMOS 管参量,不符合图 3 所示的二极管连接的 NMOS 管模型,故二极管连

接的 NMOS 管模型拟合得到的参量应用仿真时误差极大,无法在 HSPICE 中应用.

2.2 二极管模型

HSPICE 软件提供了 3 种二极管模型: LEVEL1 是无几何参量结二极管模型(The nongeometric junction diode model); LEVEL2 是 Fowler-Nordheim 二极管模型; LEVEL3 是几何结二极管模型(The geometric junction diode model). 设计人员可以选择合适的模型来进行二极管电路的仿真,例如齐纳二极管,肖特基二极管,硅扩散二极管等等^[13].

本文选用二极管 Level1 模型,对 TOLED 的 I - V 特性进行参量拟合,采用的单个二极管模型如图 6 所示.

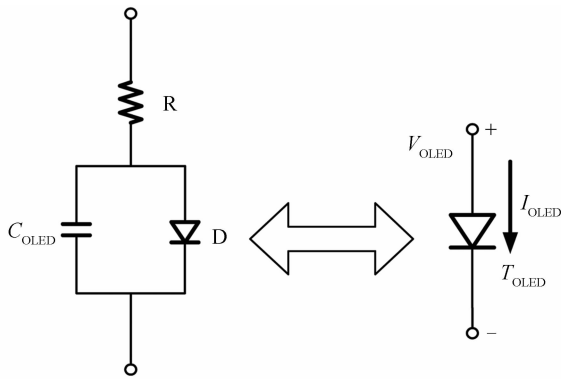


图 6 单个二极管模型

Fig. 6 Single-diode model for TOLED

由图 6 所示的模型电路可得其 I - V 关系为

$$V = RI + V_T n \ln \left(\frac{I}{I_s} + 1 \right) \quad (3)$$

式中 I_s 是二极管的反向饱和电流, $V_T = 0.0258 \text{ V}$, n 是非理想化因子.

根据式(3),采用自定义拟合方程

$$y = ax + 0.0258b \ln \left(\frac{x}{c} + 1 \right) \quad (4)$$

拟合后得到 $R = -4.459e^{-5} \Omega$, $n = 37$, $I_s = 4.48e^{-11} \text{ A/m}^2$. 但由于此时电阻 R 为负值,没有实际物理意义,取 $R = 0$,重新拟合.

此时,模型的 I - V 关系由式(3)变为

$$I = I_s (e^{v/nV_T} - 1) \quad (5)$$

选择拟合公式

$$Y = a(1 - e^{-bx}) \quad (6)$$

得到参量 $I_s = 5.31985e^{-12} \text{ A/m}^2$, $n = 24$.

此时得到的 TOLED 拟合电流和实验测量电流曲线、仿真电流和实验测量电流曲线分别如图 7、图 8.

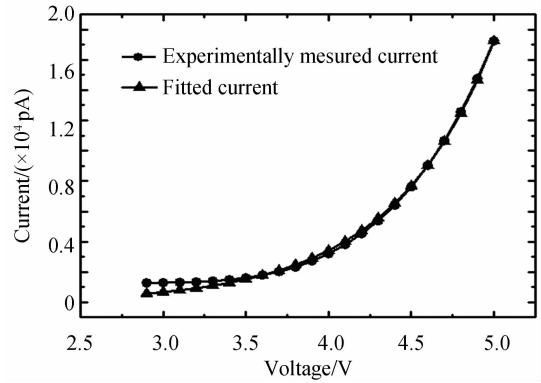


图 7 TOLED 拟合电流和实验测量电流曲线

Fig. 7 Fitted current and experimentally measured current vs. VOLED

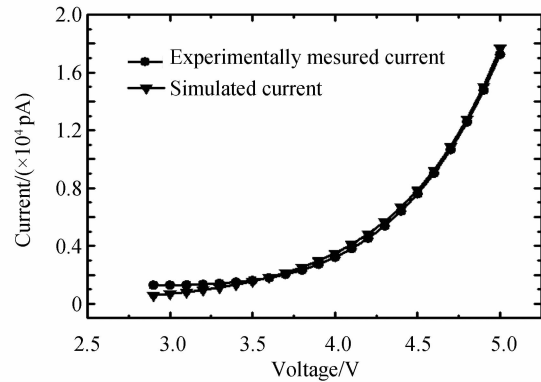


图 8 TOLED 仿真电流和实验测量电流曲线

Fig. 8 Simulated current and experimentally measured current vs. VOLED

由图 7 和图 8 结果可知,TOLED 电压在 2.9~3.3 V 范围内误差较大. 特别在电压为 2.9 V 时, TOLED 仿真电流和实验测量电流误差达到 54.51%, 不满足设计的要求. 故单二极管模型也不适合作为 TOLED 的 HSPICE 仿真模型.

改用如图 9 所示的双二极管并联模型,用两个二极管分别表示 T_{OLED} 的 I - V 关系的前半段和后半段.

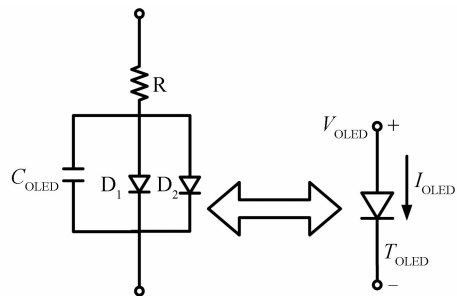


图 9 双二极管并联模型

Fig. 9 Double-diode paralleled model for TOLED

此时该模型的 I - V 关系为

$$\begin{cases} V = V_1 + V_2 \\ V_1 = IR \\ I = I_{s1} e^{\left(\frac{V_1}{n_1 V_T}\right)} + I_{s2} e^{\left(\frac{V_2}{n_2 V_T}\right)} \end{cases}$$

其中 V_1 和 V_2 分别为电阻和二极管上的压降.

在 Origin 中选用自定义方程组

$$\begin{cases} y = y_1 + y_2 \\ y_1 = ax \\ x = b_1 e^{\left(\frac{y_2}{n_1 V_T} - 1\right)} + b_2 e^{\left(\frac{y_2}{n_2 V_T} - 1\right)} \end{cases}$$

经过拟合后得到

$$R = 2.7e^6 \Omega, I_{s_1} = 2.535.28 \text{ A/m}^2, n_1 = 44.267,$$

$$I_{s_2} = 2.86e^{-4} \text{ A/m}^2, n_2 = 15.$$

使用 HSPICE 和上述参量的双二极管模型进行仿真,仿真电流和实验测量电流数据如图 10 所示,仿真误差较小,满足设计要求.和实验测量电流相比较,在 OLED 有效工作电压范围(2.9~4.8 V)内仿真误差均小于 8%,表明该模型及其参量可用在 EDA 软件如 HSPICE 中进行 TOLED 仿真,误差基本与实验中 TOLED 的 $I-V$ 特性实验偏差相当,在可以接受的误差范围内.

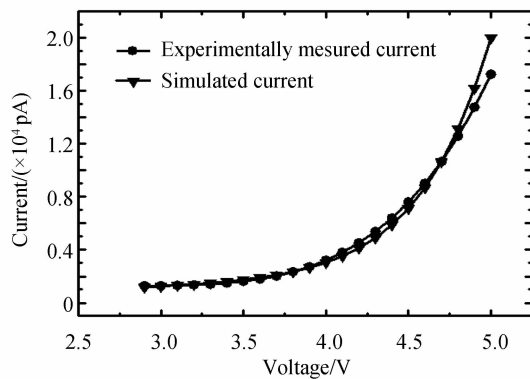


图 10 TOLED 的实验测量电流和仿真数据曲线

Fig. 10 Simulated current and experimentally measured current vs. VOLED

当进一步采用三个二极管并联模型时,误差大小和双二极管模型近似,但是它的等效电路模型和仿真过程比双二极管模型更复杂.综合考虑,最终采用双二极管并联模型作为 TOLED 的仿真模型.

3 结论

常用的 EDA 软件(如 HSPICE)中没有自带的 OLED 或 TOLED 仿真模型,导致设计 OLED-on-Silicon 像素驱动电路时存在困难.为此,本文介绍

了一种用于 TOLED 仿真设计的双二极管并联模型.最终的结果和实验室得到的实验数据相比较,在 OLED 有效工作电压范围内仿真误差均小于 8%,该模型符合 OLED-on-Silicon 像素驱动电路的设计要求.

参考文献

- [1] JOSEPH SHINAR, Organic light-emitting devices: a survey [M]. New York: AIP Press, 2004.
- [2] ANDRADE B W D, FORREST S R, White organic light-emitting devices for solid-state lighting [J]. *Advanced Materials*, 2004, **16**(8): 1585-1595.
- [3] ARMITAGE D, UNDERWOOD I, WU S T. Introduction to Microdisplays[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [4] LÜ Chen-huai. The design of the pixel driving circuit for OLED-on-silicon[D]. Changchun: Jilin University, 2010. 5. 吕晨怀. 用于 OLED-on-Silicon 的像素驱动电路的设计[D]. 长春: 吉林大学, 2010. 5.
- [5] TAN S C, SUN X W. Designing of circuit building blocks for OLED-on-Silicon[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2002, **1**(33): 980-983.
- [6] LEVY GRAY B, EVANS WILLIAM, EBNER JOHN, et al. An 852x600 pixel OLED-on-silicon color microdisplay using CMOS subthreshold-voltage-scaling current drivers[J]. *IEEE Solid State Circuits*, 2002, **37**(12): 1879-1888.
- [7] LU Chao, RAN Feng, XU Mei-hua. Design of a 640x480 pixel matrix OLED-on-silicon microdisplay chip [J]. *Vedio Engineering*, 2004, **1**(12): 44-48. 陆超, 冉峰, 徐美华. 640x480 像素矩阵 OLED-on-silicon 微显示芯片设计[J]. 视频工程, 2004, **1**(12): 44-48.
- [8] LIN Hai-qing, ERIC N Y, OLIVER P E. An 852x600 pixel OLED-on-Silicon color microdisplay chip using CMOS subthreshold-voltage-scaling current driver [C]. *IEEE International Solid-State Circuits Conference*, 2002.
- [9] PRACHE O. Full-color SVGA + OLED-on-Silicon microdisplay[J]. *Journal of SID*, 2002, **10**(2): 133-138.
- [10] BEHZAD R. Design of analog CMOS integrated circuits[M]. New York: The McGraw-Hill Companies Inc, 2001.
- [11] SANG G L, REIJI H. OLED Analog behavioral modeling based on physics. *IMID/IDMC/ASIA display 08 digest*: 431-434.
- [12] WOUTER F A, STIJN V, PAUL H, et al. Design of an organic pixel addressing circuit for an active-matrix OLED display[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2002, **49**(12): 2124-2130.
- [13] DAWSON R M A, SHEN Z, FURST D A, et al. The impact of the transient response of organic light emitting diodes on the design of active matrix OLED display [C]. *IEEE International Electron Device Meeting*, 1998.

SPICE Model of Top-emitting OLED for Microdisplay

ZONG Shao-xin, LI Chuan-nan, LÜ Chen-huai, XIE Guo-hua, ZHAO Yi, LIU Shi-yong
(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Popular EDA software such as HSPICE do not have the simulation model of OLED or top-emitting OLED, so it is difficult to design the OLED-on-Silicon pixel driving circuits in microdisplay applications. To solve the problem, the simulation model of top-emitting OLED for microdisplay was studied in this paper. Moreover, three types of equivalent circuit model, which are the single-diode model, the double-diode paralleled model and their equivalent circuits are discussed respectively. Meanwhile, the circuit parameters are got after fitting the $I-V$ curve of the top-emitting OLED, finally all the simulated data from the equivalent circuits by HSPICE and the original $I-V$ curve was compared. The results show that the fitted errors obtained from the diode-connected NMOS model are the smallest one, but its simulated errors are the largest one. The fitted errors and the simulated errors from the single-diode model are relatively large, too. But, smallest fitted errors and simulated errors are got using double-diode paralleled model, and the errors are small enough to satisfy the requirements of designing pixel driving circuits. Finally, the double-diode paralleled model is selected as the SPICE model for top-emitting OLED used in microdisplay.

Key words: Microdisplay; Top-emitting OLED; SPICE model