

基于 AM-OLED 基板的拓展多晶硅薄膜功能层的研究*

李 阳^{1,3,†} 赵淑云² 吴春亚³ 孟志国³ 王 忆¹ 熊绍珍³

(1 五邑大学数学物理系, 江门 529020)

(2 香港科技大学电机与电子工程系, 香港)

(3 南开大学光电子所, 天津市光电子薄膜器件与技术重点实验室, 天津 300071)

摘要: 在有源寻址有机发光二极管(active matrix organic light emitting diode, AM-OLED)显示基板中, 将电学功能层——薄膜晶体管(thin film transistor, TFT)有源层材料 p 型掺杂金属诱导晶化(metal induced crystallized, MIC)多晶硅(p^+ -MIC poly-Si)薄膜的版图适当延伸, 来充当 OLED 的阳极, 由于它具有低方块电阻、高功函数的电学特性和半反半透、低吸收率的光学特性, 与 OLED 的金属铝阴极形成了微腔器件, 成功地形成了显示基板上的多晶硅薄膜的光学功能层. 对这一功能层的厚度进行了优化, 比较了不同厚度下 TFT 器件的电学特性和 OLED 的光学特性. 当其厚度为 40nm 时为最佳厚度, 此时, TFT 器件场迁移率、阈值电压、亚阈值幅摆、电流开关比和栅压诱导漏极漏电等性能为最佳, 且红光微腔式 OLED(microcavity-OLED, MOLED)的出光强度增大, 光谱窄化, 电流效率与功率效率均有所提高. 这不仅使器件的性能有所提高, 而且大大地简化了 AM-OLED 基板的制备流程.

关键词: p 型掺杂多晶硅薄膜; 微腔; 多晶硅薄膜功能层

PACC: 7360F; 8140T; 8115H

中图分类号: TN304.1⁺2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)12-2393-05

1 引言

多晶硅薄膜因其载流子迁移率高而成为一种重要的功能薄膜. 在平板显示有源寻址基板中, 本征的多晶硅薄膜被用来充当薄膜晶体管(TFT)的有源层, 而掺杂的多晶硅薄膜用来与 TFT 的源、漏两金属电极引线相连使金半界面形成欧姆接触, 从而形成低电阻的源、漏两极. 这些都是利用了多晶硅薄膜功能层电学特性, 而忽视其光学特性的功能应用. 然而, 一定厚度的多晶硅薄膜, 却表现出异乎寻常的光学特性, 主要表现为在可见光波段内具有半反半透、很小的吸收率^[1]. 这些独特的光学特性决定了多晶硅薄膜在有源寻址显示基板中的新颖、独特的功能优势. 鉴于多晶硅薄膜所具有的这些优势, 我们展开了在有源寻址有机发光二极管(AM-OLED)显示基板中开发新结构多晶硅薄膜功能层的研究.

本文在制备 AM-OLED 基板的共面顶栅 p 型 TFT 有源层及源、漏电极材料时, 有意将 p 型掺杂的多晶硅薄膜版图适当延伸, 用来充当 OLED 的阳极材料. 因为 p^+ -MIC poly-Si 薄膜具有比较小的方块电阻, 且功函数较高, 为 4.8eV, 与 ITO 的相当, 说明它有足够强的空穴注入能力, 其电学特性适合做 OLED 的阳极. 另外, 多晶硅薄膜在可见光波段内具有半反半透、很小的吸收率的光学特性, 与 OLED 具有高反射性能的金属铝阴极共同形成了具有微腔效应的 OLED 器件(microcavity-OLED, MOLED). 微腔可以重新分配腔内光子的态

密度, 使得满足微腔谐振条件的模式得到增强, 而其他模式受到抑制^[2]. 这样, 既有利于窄化基色 OLED 的出光光谱, 改善色饱和度, 并提高发光强度, 又能提高电流效率与功率效率. 这就是本文中所述的 OLED 多晶硅薄膜阳极技术. 这样, 就很好地将 p^+ -MIC poly-Si 薄膜的电学功能层拓展为光学功能层.

我们首先制备了 MIC 多晶硅薄膜阳极的微腔式 OLED, 研究了它们的出光光谱的特性, 优化了作为 OLED 的多晶硅薄膜阳极的最佳厚度(40nm). 根据多晶硅薄膜的不同厚度, 研究了不同有源层厚度的 TFT 的特性, 最后确定 TFT 有源层的最佳厚度也为 40nm, 这样, 就实现了用多晶硅薄膜构建 TFT 与 OLED 结构上的最佳匹配方式. 为简化 TFT 基板的制备流程提供了必要的研究基础.

2 AM-OLED 基板中多晶硅薄膜光学功能层的形成及其厚度的优化

作为有源寻址基板中最重要的电学功能层, TFT 有源层的 p^+ -MIC poly-Si 薄膜具有很好的电学特性^[3], 厚度为 50nm 时, 其方块电阻为 $433\Omega/\square$, 且具有较大的功函数(为 4.8eV, 与 ITO 的相当), 较适合做 OLED 的阳极. 由于 p^+ -MIC poly-Si 薄膜具有较大的折射率, 因此它在光学特性上表现为较大的反射率. 并且它是间接带隙材料, 具有很低的可见光吸收率. p^+ -MIC poly-Si 薄膜阳极较高的反射率以及较低的吸收率对于器件形成微腔效应是至关重要的^[2]. 高折射率的多

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2004AA303570)和国家自然科学基金(批准号:60437030)资助项目

† 通信作者. Email:liy@mail.nankai.edu.cn, insidesun@mail.163.com

2008-07-15 收到, 2008-08-11 定稿

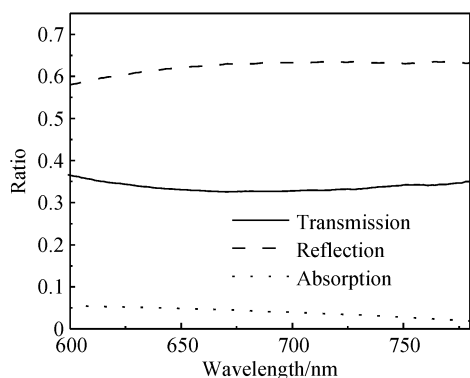


图 1 在玻璃/LTO 过渡层上制备的 MIC 多晶硅的透过率、反射率和吸收率光谱

Fig.1 Optical transmission, reflection, absorption of glass/LTO/MIC poly-Si

晶硅薄膜与玻璃衬底上低折射率的过渡层 SiO_2 形成了单周期的分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR)^[4]. 在 MOLED 结构中, DBR 是一个至关重要的部分. 而低的吸收率是提高外量子效率的必要条件.

MOLED 产生微腔谐振的条件是有效腔长 L 等于发射峰值半波长的整数倍, 即满足下列关系式:

$$m\lambda_m/2 = L \quad (1)$$

其中 m 是微腔发射模数, 为正整数; λ_m 为微腔发射光谱峰值波长; L 为光在谐振腔内的实际光程长度, 其计算公式如下^[5]:

$$L = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{n_{\text{eff}}}{\Delta n} \right) + \sum_i n_i d_i \cos\theta_i + \left| \frac{\phi_m \lambda}{4\pi} \right| \quad (2)$$

其中 λ 为自由空间波长; n_{eff} 为 DBR 有效折射率; n_i , d_i 分别为谐振腔内各有机层的折射率和厚度; ϕ_m 为金属的反射相移. 光学长度第一项为光在 DBR 中的有效穿透深度, 第二项为谐振腔间各有机层的总光学厚度, 第三项为光在金属反射镜中的有效穿透深度. 当器件的金属阴极和 DBR 确定后, 光进入两个反射镜的穿透深度基本不变; 只要调节各有机层的厚度, 使腔长满足 (1) 式, 这时, 满足谐振条件的光因干涉相长将得到增强, 从阳极和 DBR 一侧耦合而射出.

基于以上对多晶硅薄膜光学功能层的设想与考虑, 有必要制备多晶硅薄膜阳极的 MOLED. 这种多晶硅薄膜材料在红光范围内的透过率、反射率和吸收率光谱如图 1 所示. 由图可见, 50nm 的 MIC poly-Si 薄膜在红光波长区域, 其反射率可达 0.62 左右, 透射率达 0.35 左右, 而吸收率最大不过 0.05. 由此可以看出, 50nm 的 p^+ -MIC poly-Si 薄膜在红光波段良好的光、电特性使它非常适合作红光 OLED 的阳极材料. 我们制备了 50nm 厚的以 p^+ -MIC poly-Si 薄膜为阳极的 OLED. 为了进行对比, 同时制备以 ITO 为阳极的 OLED 参比器件. 它们的具体结构如下: ITO 或 poly-Si (50nm)/ m-MT-DATA; F₄-TCNQ (1mol %)(50nm)/ NPB (20nm)/ Alq₃: CJTB (1.5wt) (30nm)/ Alq₃ (20nm)/ LiF (1nm)/ Al.

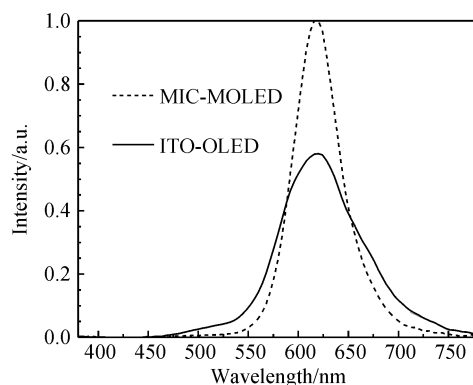


图 2 以 MIC poly-Si 和 ITO 为阳极的红光有机电致发光器件的发光光谱

Fig.2 EL spectra of the red OLEDs with MIC poly-Si and ITO anode

两种器件的发光光谱和电流效率曲线分别如图 2 和图 3 所示. 具有一定反射率的 p^+ -MIC poly-Si 薄膜和金属阴极兼作反射镜面的 Al 构成了微腔^[6] (MOLED), 使得器件的发光光谱强度明显增加, 且光谱有所窄化, 半宽高由 90nm 减小到 54nm, 品质因数 (Q 值) 由 6.9 增大到 11.5. 电流效率与功率效率均有所提高, 最大电流效率提高了 57%.

从以上的分析与实验结果得出, 用 p^+ -MIC poly-Si 薄膜做 OLED 的阳极, 可以形成光谱窄化、发光强度增加、电流效率提高的微腔器件. 这样, 就成功地将显示基板中的电学功能层拓展为光学功能层.

多晶硅薄膜光学功能层的厚度是影响其能否构成具有微腔效应的光学特性的主要因素, 因此, 必须要对 MIC 多晶硅薄膜进行厚度优化. 我们用与 50nm 的 MIC 多晶硅薄膜制备工艺完全相同的方法, 又制备了厚度分别约 40 和 30nm 的多晶硅薄膜. 经测试这 3 种厚度 (50, 40 和 30nm) 薄膜的方块电阻分别为 433, 570 和 874 Ω/\square ; 而它们的光学特性如图 4 所示. 表 1 为 3 种厚度的 MIC 多晶硅薄膜在红、绿、蓝光的中心波长处 (480, 550 和 650nm) 的透过率、反射率和吸收率比较. 从图 4 和表 1 可以看出, 50 和 30nm 的 MIC 多晶硅

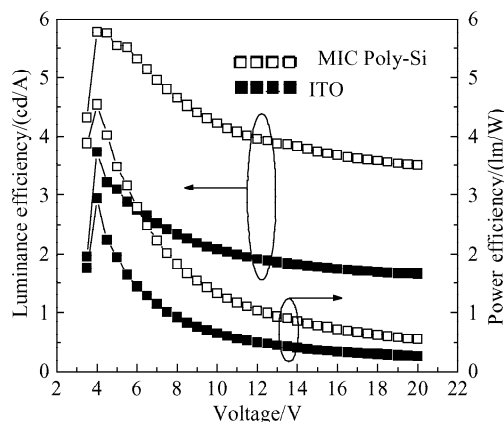


图 3 红光微腔式 OLED 的发光效率与功率效率

Fig.3 Luminance efficiency and the power efficiency of the red MOLED

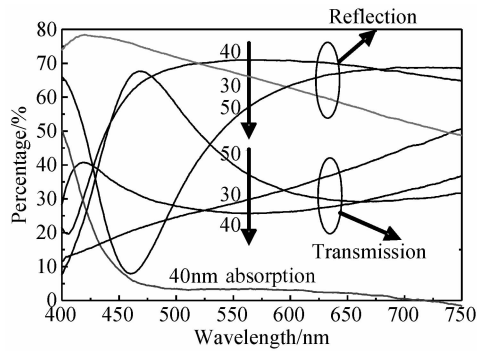


图 4 30nm/40nm/50nm 厚的 MIC 多晶硅薄膜的透射/反射光谱比较以及 40nm 厚薄膜的吸收率光谱

Fig.4 Transmission/reflection of 30nm/40nm/50nm MIC poly-Si thin films and the absorption of 40nm MIC poly-Si thin films

薄膜, 它们的反射率与透过率在可见光范围内起伏较大, 而 40nm 的 MIC 多晶硅薄膜在可见光范围内呈现出起伏度相对较小的反射率曲线和透过率曲线, 其透过率在 25%~30% 之间, 反射率在 66%~70% 之间; 而且它的吸收率也很低, 在红光与绿光区域内基本低于 3.3%, 在蓝光发光中心 480nm 处为 4.1%, 和 50nm 的 MIC 多晶硅薄膜相比要小得多. 综上所述, 与其他厚度相比, 40nm 的 p⁺-MIC poly-Si 薄膜作为 OLED 的阳极具有最合适的光学特性.

3 不同有源层厚度 TFT 器件特性参数的分析与比较

从以上分析与实验结果可知, 显示基板的 p⁺-MIC poly-Si 薄膜光学功能层是电学功能层的拓展, 即 OLED 的阳极材料与 TFT 有源层材料同层同材质制备, 是 TFT 有源层材料的延伸. OLED 的厚度 40nm 时为最佳, 这样有必要对 TFT 有源层的厚度效应进行必要的分析与比较.

鉴于从简化基板制备流程的目的出发, TFT 的有源层与其所驱动 OLED 的阳极为同层、同材质制备; 又考虑到常规的低温多晶硅 (LTPS) TFT 有源层厚度一般为几十纳米, 基于以上两个原因, 我们制备了 3 种有源层厚度与 OLED 多晶硅阳极厚度相同的 TFT 器件, 即有源层厚度分别为 30nm/40nm/50nm, 比较它们的转移特性曲线, 分析它们的各项性能指标, 以便从兼容 TFT 与 OLED 阳极的要求来确定多晶硅 TFT 有源层的最佳厚度.

首先对所制备的 poly-Si TFT, 测量它们的转移特

表 1 3 种厚度的 MIC 多晶硅薄膜透过率、反射率和吸收率数据

Table 1 Transmission, reflection, and absorption of three thickness MIC poly-si thin films

厚度/nm	透过率/%			反射率/%			吸收率/%		
	蓝	绿	红	蓝	绿	红	蓝	绿	红
50	65.5	40.0	29.2	16.2	53.5	67.4	18.1	6.4	3.2
40	29.4	25.7	28.4	66.3	70.8	69.3	4.1	3.3	2.2
30	24.6	30.6	40.6	74.6	68.2	58.6	0.6	1.1	0.7

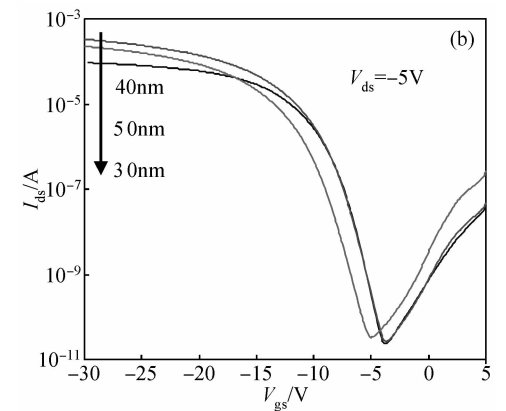
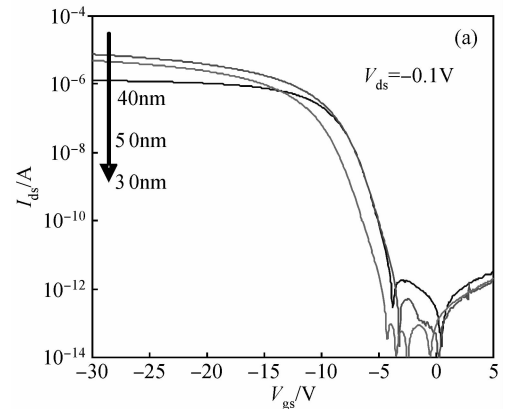


图 5 30nm/40nm/50nm 多晶硅有源层 TFT 在 $V_{ds} = -0.1V$ (a) 和 $-5V$ (b) 的转移特性曲线

Fig. 5 Transfer characteristic curves of 30nm/40nm/50nm MIC poly-Si thin films TFT when $V_{ds} = -0.1V$ (a) and $-5V$ (b)

性. 3 种 TFT 器件沟道的宽长 (W/L) 比均为 $30\mu m/10\mu m$, 器件的栅绝缘层厚度为 100nm. 对于 p-channel 的器件, 源漏电压分别为 $-0.1V$ 和 $-5.0V$, 栅电压的测量范围为 $-30 \sim +10V$. TFT 的开启电压可以由以下公式进行推导 (此公式只适用于工作在线性区的 TFT):

$$I_d \approx \frac{\mu C_{ox} W}{L} (V_{gs} - V_{th}) V_{ds} \quad (3)$$

其中 V_{gs} , V_{th} 和 V_{ds} 分别为栅偏压、开启电压和源漏电压; C_{ox} 是单位面积上的栅绝缘层电容; W 和 L 分别是 TFT 沟道的有效宽度和长度. TFT 的开启电压为低源漏电压转移特性曲线线性区切线的外延线与 V_{gs} 轴交点数值.

V_{ds} 低压下的场效应迁移率 (μ_{FE}) 可以由低源漏电压下转移特性曲线的跨导求得:

$$\mu_{FE} = \frac{Lg_m}{WC_{ox}V_{ds}} \quad (4)$$

其中 g_m 是跨导. 本文所给出的迁移率均为最大迁移率数值.

30nm/40nm/50nm 多晶硅有源层 TFT 的转移特性曲线及具体的测量结果如图 5 所示, 从图中的转移特性曲线可以看到, 无论 $V_{ds} = -0.1V$ 还是 $V_{ds} = -5V$, 40nm 多晶硅有源层 TFT 器件都显示出比较好的转移特性曲线, 具有相对大的开态电流, 相对小的开

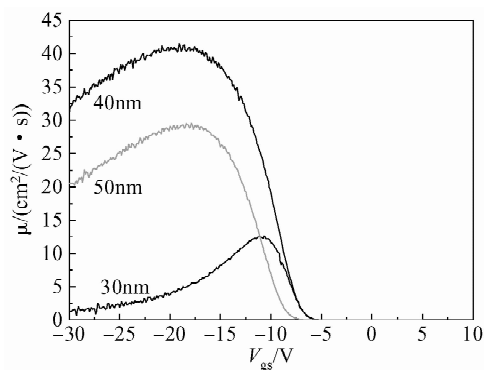


图 6 30nm/40nm/50nm 多晶硅有源层 TFT 场效应迁移率的比较
Fig.6 Field effect mobility comparison of MIC poly-Si thin films TFTs with 30nm/40nm/50nm active layer

启电压和相对小的亚阈值摆幅. 30nm 多晶硅有源层 TFT 器件的转移特性曲线在线性区与 40nm 的几乎重合,而在饱和区其开态电流与 40nm 的相比下降了半个甚至接近一个数量级(可能源于背面氧化层带来的某些影响). 而 50nm 多晶硅有源层 TFT 器件的转移特性曲线在饱和区的开态电流位于 30nm 的与 40nm 的曲线之间,在 $V_{ds} = -0.1V$ 时,具有最低的漏极电流,而 $V_{ds} = -5V$ 时,又具有相对大的漏极电流(可能源于较小的体电阻).

图 6 所示为 30nm/40nm/50nm 多晶硅有源层 TFT 的场效应迁移率曲线,从图上可以看出,40nm 多晶硅有源层 TFT 器件的场效应迁移率最大,为 $41.6\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 左右,50nm 器件的场效应迁移率稍小一些,为 $29.4\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,而 30nm 器件的场效应迁移率最小,仅为 $12.5\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$.

有源层厚度的变化对器件的阈值电压 V_{th} 也有很明显的影 响. 当厚度由 50nm 减小到 40nm 时,其阈值电压 V_{th} 明显下降,并在 40nm 以下趋于平稳.

实验研究表明阈值电压随有源层厚度减小而减小并趋于平稳;在弱场时,亚阈特征参数受有源层厚度的影响很大,有源层厚度的减小,抑制了亚阈特征参数的增加,从而改善了亚阈特性;在强场时 TFT 的电流开关比随 d_s (有源区沟道厚度)作近似抛物线状变化,引起厚度效应的主要原因是空间电荷区在有源层的扩展. 在高源漏电压测量条件下,即当 $V_{ds} = -5V$ 时,主要考察的是 TFT 的开关比,即开态电流与关态电流之比;另外开态电流与 $V_{gs} = 5V$ 反向情况下的漏电电流之比,其主要反映栅压诱导漏极漏电 (GIDL) 的影响.

综合以上数据,这 3 个沟道厚度不同的 TFT 虽各有差别,但均满足驱动 OLED 的能力 ($I_{on} > 0.1\text{mA}/\mu\text{m}^2$, 亦即 $33\text{A}/\text{cm}^2$ 以上). 经过计算,它们的开关比 (I_{on}/I_{off}) 也都超过了 10^7 . 只是 30nm 的器件受背沟影响,迁移率和开态电流偏小;50nm 多晶硅有源层的 TFT GIDL 最为严重. 40nm 多晶硅有源层的 TFT 总体性能比较起来要好一些.

表 2 给出了 3 种不同有源层厚度的多晶硅 TFT 的

表 2 三种有源层厚度的 TFT 的综合测量结果

Table 2 Synthesis measuring results of different layer thickness TFT

测试类别	30nm	40nm	50nm
$\mu_{FE}/(\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s}))$	12.5	41.6	29.4
V_{th}/V	-8	-8	-9.6
$S/(\text{V}/\text{decade})$	0.77	0.85	0.92
$I_{on}/I_{off}(\times 10^7)$ at $ V_{ds} = -5V$	3.4	1.3	0.7
GIDL (pA/ μm) at $V_{ds} = -5V, V_g = 5V$	1350	1606	9067

综合测量结果,包括 $|V_{ds}| = 0.1V$ 和 $|V_{ds}| = 5V$ 的测量条件.

从表 2 综合分析可知,40nm 多晶硅有源层 TFT 器件具有比较好的转移特性曲线,具有相对大的开态电流,相对小的开启电压和相对小的亚阈值摆幅. 开关电流比大于 7 个数量级,栅诱导漏电流也相对较小,开启电压也相对较小,场迁移率为最大.

图 7 是 3 种多晶硅有源层厚度的 TFT 器件的 4 组输出特性曲线. V_{gs} 分别取 $-18, -22, -26$ 和 $-30V$, 从 4 组输出特性曲线看出,随着 V_{gs} 的逐渐增大,40nm 多晶硅有源层 TFT 器件输出电流最大,对驱动 OLED 器件是比较有利的.

因此,我们认为,从 TFT 的综合特性分析以及与微腔 OLED 多晶硅薄膜阳极厚度兼容性看,TFT 有源层厚度选用 40nm 较为合适. 这为 OLED 多晶硅薄膜阳极与其驱动 TFT 的有源层、源漏电极同层、同基质、同厚度制备提供了良好的理论分析与实验基础.

4 结论

用 AM-OLED 基板的共面顶栅 p 型 TFT 有源层及源、漏电极材料来充当 OLED 的阳极材料,得到了性能很好的红光微腔器件,其发光光谱强度明显增加,且光谱有所窄化,半宽高由 90nm 减小到 54nm,品质因数由 6.9 增大到 11.5. 电流效率与功率效率均有所提高,最大电流效率提高了 57%. 优化了这种光学功能层的最佳厚度为 40nm. 这样,成功地将电学功能层拓展为光学功能层. 根据多晶硅薄膜的不同厚度,又研究比较了不同有源层厚度的 TFT 的场迁移率、阈值电压、亚阈值摆幅、电流开关比和栅压诱导漏极漏电等性能特性,

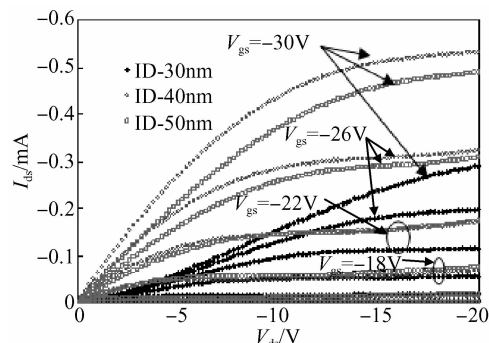


图 7 30nm/40nm/50nm 多晶硅有源层 TFT 的输出特性曲线图
Fig.7 Output characteristic curves of 30nm/40nm/50nm MIC poly-Si thin films TFT

最后确定 TFT 有源层的最佳厚度也为 40nm, 这样, 就实现了用多晶硅薄膜构建 TFT 与红光 OLED 结构上的最佳匹配方式. 为简化 TFT 基板的制备流程提供了必要的研究基础.

参考文献

- [1] Li Yang, Meng Zhiguo, Wu Chunya, et al. Basis mechanism of MIC poly-Si thin film material dynamic gettered technology and its applications. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(10): 1574(in Chinese)[李阳, 孟志国, 吴春亚, 等. MIC 薄膜多晶硅材料的动态镍吸附技术基本机理及其应用. *半导体学报*, 2007, 28(10): 1574]
- [2] Li Yang, Meng Zhiguo, Wu Chunya, et al. A poly-crystalline Si anode microcavity organic light emitting device and its simplified preparation process flow. *Journal of Semiconductors*, 2008, 29(1):144(in Chinese)[李阳, 孟志国, 吴春亚, 等. 多晶硅薄膜阳极微腔有机发光器件及其简化制备流程的研究. *半导体学报*, 2008, 29(1):144]
- [3] Meng Z, Wang M, Wong M. High performance low temperature metal-induced unilaterally crystallized poly crystalline silicon thin film transistor for system-on-panel applications. *IEEE Trans Electron Devices*, 2000, 47(2):404
- [4] MacDougal M H, Hummel S G, Dapkus P D. Epitaxial (Al, Ga) InP-oxide distributed Bragg reflectors for use in visible-wavelength optical devices. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1995, 3852387
- [5] Dodabalapur A, Rothberg L J, Miller T M, et al. Physics and applications of organic microcavity light emitting diodes. *J Appl Phys*, 1996, 80(12):6954
- [6] Li Yang, Meng Zhiguo, Wu Chunya, et al. Study of a new type Anode of OLED by MIC poly-Si. *Proc SPIE*, 2007, 6828:68280J

Poly-Si Film Functional Layer Based AM-OLED Display Panel*

Li Yang^{1,3,†}, Zhao Shuyun², Wu Chunya³, Meng Zhiguo³, Wang Yi¹, and Xiong Shaozhen³

(1 Department of Mathematics and Physics, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

(2 Department of Electronic and Computer Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

(3 Tianjin Key Laboratory of Photo-Electronic Thin Film Devices and Technology, Institute of Photo-Electronics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: In the active matrix addressing organic light-emitting diode (AM-OLED) display panel, we modify electricity functional layer-layout of the poly-Si thin film transistor (TFT) and prolong the source and drain electrode as the anode of OLED, forming the micro cavity AM-OLED with a certain quality factor (Q). The slight modification of the layout can not only improve the color saturation of the OLED, which is good to display color image, but also omit the process of deposition and photo lithography of OLED's ITO anode. As a result, p^+ -MIC poly-Si thin film optic functional layer is formed. The thickness of optic functional layer is optimized; and the electricity characteristic of TFT and the optic characteristic of OLED are compared. When the thickness is 40nm, μ_{FE} ($\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$), V_{th} (V), S (V/decade), I_{on}/I_{off} ($\times 10^7$) at $|V_{ds}| = -5\text{V}$, GIDL ($\text{pA}/\mu\text{m}$) at $V_{ds} = -5\text{V}$ and $V_g = 5\text{V}$ of TFT are very good, and display device (MOLED) with high EL intensity and high saturation performance could be realized. This not only develops the high performance of red MOLED but also greatly results simplification of the preparation process flow.

Key words: p-nc-Si; H thin film; microcavity; poly-Si thin film functional layer

PACC: 7360F; 8140T; 8115H

Article ID: 0253-4177(2008)12-2393-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2004AA303570) and the National Natural Science Foundation of China (No. 60437030)

† Corresponding author. Email: liy@mail.nankai.edu.cn; insidesun@mail.163.com

Received 15 July 2008, revised manuscript received 11 August 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics