

文章编号: 1007-2780(2006)06-0604-05

LED 阵列的设计和制作工艺研究

梁静秋¹, 李 佳^{1,3}, 王维彪^{1,2}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033, E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 根据 AlGaInP 外延片的结构特点设计了 LED 型微显示器件的主要结构。利用 Markus-Christian Amann 等人提出的模型对器件电流注入后的空间分布进行了简单的理论分析, 总结出了像素元和上隔离沟槽的理想尺寸分别是 $16\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 。简述了减薄 GaAs 衬底的作用, 设计衬底电隔离沟槽宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 。采用湿法腐蚀工艺进行器件结构制备, 利用不同的腐蚀剂对金属层、p-GaP 层、AlGaInP 层和 n-GaAs 衬底层进行腐蚀。实验结果表明, 腐蚀后的沟槽形貌较好, 其深度和宽度可以达到设计要求。

关 键 词: 发光二极管阵列; 微显示器件; 隔离沟槽; 湿法腐蚀
中图分类号: TN873.3; TN312.8 **文献标识码:** A

1 引 言

LED 微显示器件作为一种全固体的主动发光器件, 具有工作电压低、发光效率高、响应速度快、性能稳定可靠、工作温度范围宽等许多优点^[1,2]。自 1998 年德国亚琛工业大学采用湿法腐蚀方法在 AlGaInP 发光芯片上制作发光二极管阵列的初步研究以来^[3], LED 微显示器件的研究取得了突破性进展。2001 年, 美国堪萨斯州立大学利用 LED 阵列技术研制出具有 InGaN/GaN 量子阱结构、像素直径为 $12\ \mu\text{m}$ 的 10×10 蓝色微型半导体阵列显示器件^[4]。2004 年, 英国斯特拉思克莱德大学利用干法刻蚀工艺制作出了蓝色 GaN 发光二极管阵列^[5], 因采用 ICP 刻蚀技术, 所研制的发光二极管阵列与常规方法相比具有更好的光学、电学性能和更高的一致性。LED 阵列技术意味着可以在很小的面积上集成很多发光像素, 并且可以采用成熟的阵列寻址方式驱动器件工作, 因此 LED 微显示器是具有产业化前景的研究方向。

超高亮度 AlGaInP-LED 微显示器是一种主动发光的单色(橙色)显示器件, 结构紧凑、清晰度

高、对比度高、寿命长, 其亮度可高达 $1\ 000\ \text{cd}/\text{m}^2$ 以上, 可以在 $-50 \sim 200$ 温度范围内正常工作。将这种显示器件放置在眼镜、头盔、掌心等地方, 通过一个透镜系统可以直接观察所显示的虚拟图像和数据。此外, 它还可作为高亮度夜间监视系统和新一代 LED 打印机的核心器件。

对于此类微显示器件, 提高其分辨率最有效的手段就是通过减小单个像素的尺寸来增加单位面积上集成的像素数目。这样, 在相邻的像素之间制作微细隔离沟槽就成为一个亟待解决的关键问题。本文对在橙色 AlGaInP 发光芯片上集成小像素尺寸、高分辨率的微 LED 阵列进行设计和工艺研究, 用湿法腐蚀工艺制作了用于光学和电学隔离的隔离沟槽。

2 器件设计

2.1 外延片结构参数

本文所研究的微显示器件是以 AlGaInP-LED 外延片为基片进行的。所用外延片的结构如图 1 所示。

最上层的 p-GaP 材料有两个作用^[6], 其一是作为器件的透光窗口层, 可以获得高的外量子效率; 其二是作为电流注入的扩散层, 电流注入该层

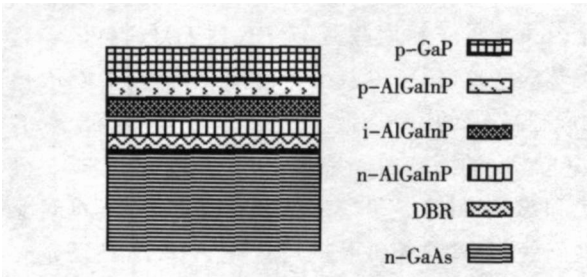


图 1 外延片的结构

Fig.1 Structure of epitaxial wafer

后可以迅速向四周扩散至 AlGaInP 层,提高有源区的可工作面积。实验选用的外延片该层的厚度是 5 ~ 6 μm。p-AlGaInP、i-AlGaInP 和 n-AlGaInP 三层是 AlGaInP-LED 的核心结构。i-AlGaInP 层是有源区,为了减小该层对光的吸收,它的厚度很薄。有源区两侧的 p-AlGaInP 和 n-AlGaInP 材料分别是空穴和电子的限制层,作用是约束少

数载流子和提高 LED 的量子效率^[7]。限制层的厚度一般为 0.5 ~ 0.8 μm,有源区的厚度一般为 0.8 ~ 1.2 μm。DBR(分布式布拉格反射光栅)是由多层交替的低反射率层和高反射率层组成的,各层厚度为发射光波长的 1/4^[8],其作用是使射向衬底的光反射回上表面,从而提高器件的出光效率。它的成分是 AlGaAs/GaAs,厚度一般为 0.1 ~ 0.3 μm。衬底材料是(100)晶面偏向(011)的 n-GaAs。实验采用的这种 AlGaInP-LED 外延片厚度大约 280 μm,发光波段在 590 ~ 620 nm。

2.2 微显示器件结构

根据图 1 的外延片结构设计的微显示器件结构如图 2 所示。图 2(a)为正视剖面图,图 2(b)为左视剖面图。

由于 LED 阵列与激光二极管阵列的结构相

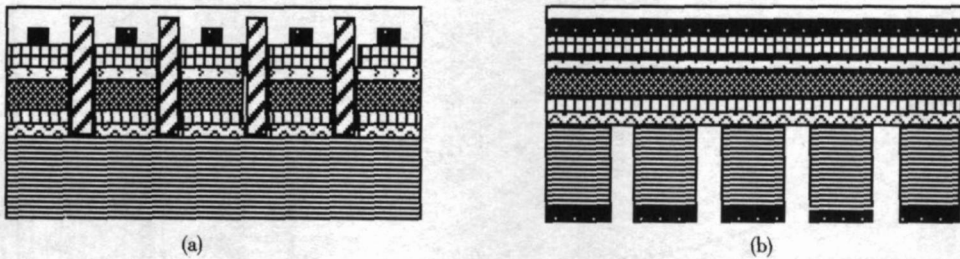


图 2 微显示器件结构示意图

Fig.2 Structure of micro display devices

似,它的注入电流密度的分布可采用 Markus-Christian Amann 等人提出的模型^[9]来近似计算。为了分析方便,可以只分析单个 LED 的注入电流分布,将 LED 上电极和电流扩散层的结构简化为图 3 的形式。

率用 ρ 表示,p-GaP 层的电阻率用 ρ_p 表示。一般情况下 $\rho_p \ll T/2$,故接触电阻可忽略不计。假定电流注入 LED 上电极后金属和半导体之间的接触区域是一个电流源。由于 p-AlGaInP 层的厚度与 p-GaP 层相比非常薄, T 和 w 成为影响注入电流空间分布的主要因素。

$J(x)$ 表示横向电流密度分布,描述了电流经上电极注入到 p-GaP 层后在 $[-\frac{a}{2}, \frac{a}{2}]$ 区域内的横向扩散。 $J(x)$ 可以用式(1)表示^[7]:

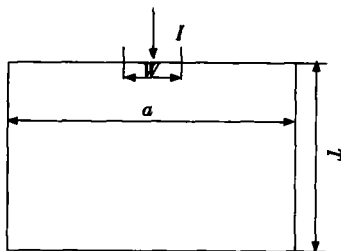


图 3 注入电流的 LED 的简化模型

Fig.3 Simple structure of LED model with injecting current

图中 a 为 LED 的宽度, w 为上电极的宽度, T 为电流扩散层 p-GaP 的厚度, I 表示注入电流强度。金属和半导体之间(M-S)的欧姆接触电阻

$$J(x) = \frac{2}{L} \frac{1}{w} \arctan \left(\frac{\sinh \left(\frac{-w}{4T} \right)}{\cosh \left(\frac{-x}{2T} \right)} \right) \quad (1)$$

式中 L 代表上电极的长度, $w = 2 \mu\text{m}$ 代表单个 LED 的长度。在设定 $w = 2 \mu\text{m}$, $I = 0.178 \text{ mA}$, $L = 20 \mu\text{m}$, $T = 6 \mu\text{m}$ 的条件下,可计算出 p-GaP 层底的横向电流密度分布曲线,如图 4 所示。

$J(y)$ 表示中心点的纵向电流密度分布,描述

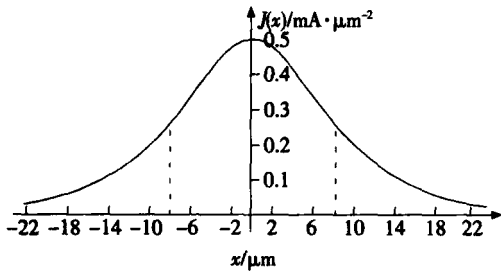


图 4 p-GaP 层底的横向电流密度分布曲线

Fig. 4 Lateral current density distribution at the bottom of p-GaP layer

了电流注入后,在深度为 $[0, T]$ 区域内的纵向扩散。 $J(y)$ 可由 $J(x)$ 推导出来,具体表达式见公式(2)。p-GaP 层中心的纵向电流密度分布曲线如图 5 所示。

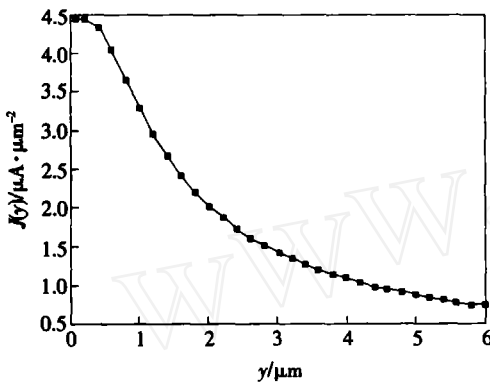


图 5 p-GaP 层中心的纵向电流密度分布曲线

Fig. 5 Longitudinal current distribution at the mid of p-GaP layer

$$J(y) = \frac{2}{L} \frac{1}{w} \arctan \left[\sinh \left(\frac{-w}{4y} \right) \right] \quad (2)$$

由图 4 可以看出,电流注入 p-GaP 表面后迅速横向扩散,离中心点越远,电流密度越低,但是大部分的电流分布在 $-8 \sim 8 \mu\text{m}$ 范围内。因此,可以将 LED 的横向尺寸设定为 $a = 16 \mu\text{m}$ 。

由图 5 可以看出,随着扩散深度的增加,电流密度越来越低,而且在 $0 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围内电流密度下降得很快,实际到达 p-AlGaInP 层的电流非常少,发光效率受到很大影响。这是由于电流的横向扩散效应直接导致的。为了解决这个问题,必须在相邻的像素之间引入隔离沟槽,阻止电流向非发光区域扩散。从理论和工艺两方面考虑,设计隔离沟槽宽度为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

在 LED 阵列中,GaAs 衬底的电学隔离也是

十分重要的。衬底减薄不仅有利于衬底电学隔离工艺的实现,还可以减少亮度退化,提高 AlGaInP-LED 器件的稳定性^[10]。AlGaInP 四元系的 MOCVD 的薄膜材料是亚稳相生长,在 GaAs 衬底和 AlGaInP 外延层之间存在晶格匹配、热匹配的问题,尤其是短波长的可见光 AlGaInP 发光二极管 GaAs 衬底的吸收和发热更加严重。由于在 MOCVD 外延中生长存在界面的缺陷和晶格失配,如果 LED 的热传导不好,就会出现缺陷的增殖和非辐射复合中心,从而严重影响 LED 的各项工作特性,尤其是亮度的退化。同样从器件性能和工艺难度两方面考虑,将衬底电学隔离沟槽宽度设计为 $5 \mu\text{m}$ 。

2.3 器件制作流程的设计

器件制作的工艺步骤如图 6 所示。图 6(a) 为外延片衬底,(1)在 p-GaP 表面制备金属电极以形成良好的欧姆接触(图 6(b));(2)光刻、腐蚀金属形成上隔离沟槽图形(图 6(c));(3)继续腐蚀 p-GaP 形成一定深宽比的隔离沟槽(图 6(d));(4)再次光刻,以光刻胶作掩膜腐蚀 AlGaInP 材

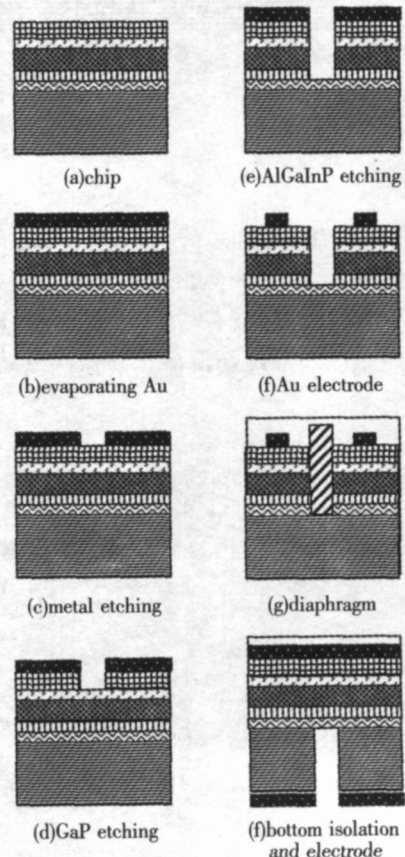


图 6 制作 AlGaInP-LED 微显示器件的工艺流程

Fig. 6 Fabrication process of AlGaInP-LED micro display devices

料(图 6(e));(5)上隔离沟槽制作完毕。再次光刻、腐蚀形成上电极(图 6(f));(6)制作光阑和保护层(图 6(g));(7)在正面工艺完成后,对 GaAs 衬底减薄,进行下电极和下隔离沟槽的制作,最后对整个器件进行封装测试(图 6(h),此为左视图)。

3 实 验

实验中,以 AuGeNi/Au 为上、下电极材料,用 KI、I₂、H₂O 的比例为 4g 1g 40 mL 腐蚀液腐蚀 Au 电极,腐蚀时间约 30 s。用热 H₃PO₄ (130 ~ 200)为腐蚀液腐蚀 GaP,腐蚀速率约为 0.5 ~ 0.9 μm/min。用 HCl(37 %)、CH₃COOH(99.8 %)、H₂O₂(30 %)系腐蚀液腐蚀 AlGaInP。背隔离沟槽采用柠檬酸与双氧水混合溶剂对 GaAs 进行腐蚀,分别试验了在相同条件下,柠檬酸水溶液(质量百分比为 50 %)和双氧水(质量比为 30 %)的混合比例为 2 1、10 1 和 10 1 的腐蚀结果。

4 结果与讨论

用上述方法在 AlGaInP 发光芯片上表面制作成了宽 2 μm、深约 10 μm 的上隔离沟槽。图 7 给出用不同温度 H₃PO₄ 腐蚀 p-GaP 层的效果对比。由图可看出,150 的 H₃PO₄ 是比较合适的腐蚀液(图 7(b)),此时的腐蚀速率为 1.2 μm/min。当温度比较低时(130 ~ 140)腐蚀速率比较慢(图 7(a)),而且在将 p-GaP 腐蚀掉 3 μm 后,腐蚀过程几乎停滞。较高的温度(160 ~ 200)会导致片子表面出现小斑点,温度越高,斑点越多,当温度超过 200 时,片子表面会出现裂痕。(见图 7(c))在上隔离沟槽的制作工艺中,p-GaP 层和 AlGaInP 层的腐蚀是比较困难的。p-GaP 层的难点在于它比较厚,而上隔离沟槽仅为 2 μm 宽,该

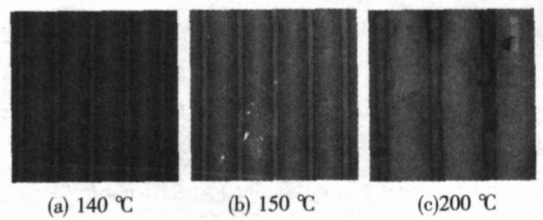


图 7 经过不同温度的 H₃PO₄ 腐蚀后的表面形貌
Fig. 7 Morphology of the samples after submerged into the etchants with different temperature

层的腐蚀既要求一定的深宽比又要求侧壁比较陡。AlGaInP 层的难点在于它包括 3 层不同组分和掺杂浓度的材料,而且该层不处于基片上表面,腐蚀过程中需要不断搅拌,腐蚀液温度须控制在 0 左右,以使腐蚀过程不至于太剧烈。实验结果表明,这种在橙色 AlGaInP 发光芯片上表面制作上隔离沟槽的工艺步骤是可行的。

此外,从 GaAs 腐蚀的对比实验可知,采用比例为 2 1 的腐蚀液对于 GaAs 的腐蚀效果最好,表面平整且侧蚀小。腐蚀速率为 3 ~ 5 μm/min,腐蚀 5 ~ 7 min。在腐蚀过程中可利用搅拌器搅拌腐蚀液,以利于氧化产物的络和溶解,并及时从沟槽中去除,保持反应继续进行。

5 结 论

在橙色 AlGaInP 发光芯片上集成小像素尺寸、高分辨率的微 LED 阵列,设计和制作用于光学和电学隔离的沟槽十分重要。本工作采用湿法腐蚀工艺制作了微细隔离沟槽。研究表明,通过光刻、减薄、镀膜以及化合物半导体材料的湿法腐蚀技术进行 LED 阵列的微元分割、形成微显示器件是可行的。在腐蚀工艺中,腐蚀液成分的选择、配比、温度等条件十分重要。

参 考 文 献:

- [1] 郑智斌. InGaAlP-LED 发光特性分析 [J]. 液晶与显示, 2003, 18(6): 450-453.
- [2] 郑智斌, 彭万华. InGaAlP 超高亮 LED 性能及可靠性 [J]. 液晶与显示, 2001, 16(2): 145-149.
- [3] Schineller B, Junas Y, Heuken M, et al. Investigation of process technologies for the fabrication of AlGaInP mesa ultra high brightness light emitting diode [J]. *Materials Science and Engineering*, 1998, B51: 34-38.
- [4] Robinson Kevin. Blue LEDs open door to microdisplays [J]. *Photonics Spectra*, 2001, 35: 43-44.
- [5] Choin H W, Jeon C W, Dawson M D. Fabrication of matrix-addressable micro-LED arrays based on a novel etch technique [J]. *J. Crystal Growth*, 2004, 268: 527-530.
- [6] Huang K H, Yu J G, Kuo C P, et al. Twofold efficiency improvement in high performance AlGaInP light-emitting

- diodes in the 555 ~ 620 nm spectral region using a thick GaP window layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 61(9): 1045-1047.
- [7] 陈练辉. GaInP/AlGaInP 多量子阱外延片的生长与光学性质研究[D]. 华南师范大学硕士学位论文, 2004.
- [8] Chang S J, Chang C S, Su Y K, *et al.* Chirped GaAs-AlAs distributed bragg reflectors for high brightness yellow-green light-emitting diodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letts.*, 1997, 9(2):182-184.
- [9] Amann Markus Christian, Kappeler Franz. Analytical solution for the lateral current distribution in multiple [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 48(25):1710-1712.
- [10] 周海龙, 黄柏标, 潘教青, 等. GaAs 衬底厚度对发光二极管稳定性的影响 [J]. 量子电子学报, 2003, 2(1):125-128.

Design and Fabrication of AlGaInP LED Array

LIANG Jing-qiu¹, LI Jia^{1,3}, WANG Wei-biao²

- (1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn;
2. Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract

A kind of micro-LED array is designed in this paper. This device is based on AlGaInP epitaxial wafer. The theoretical analysis of injection current distribution based on the model developed by Markus-Christian Amann etc. is presented. It is concluded that the ideal dimension of the pels and top isolation groove width are $16\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$ and $2\ \mu\text{m}$, respectively. It is necessary for this device to decrease the GaAs substrate thickness. And the bottom isolation groove width is designed as $5\ \mu\text{m}$. The structure of isolation is fabricated by wet etching using both isotropic and anisotropic solvent. The result of the experiment shows that the procedure of isolation fabrication is feasible.

Key words: LED array; microdisplay; isolation groove; wet etching

作者简介: 梁静秋(1962 -), 女, 辽宁沈阳人, 研究员, 研究生导师, 研究方向为微光机电系统及光器件。