

倒装 GaN 基发光二极管阵列微透镜的 粗化技术*

刘志强† 王良臣 伊晓燕 王立彬 陈 宇 郭德博 马 龙

(中国科学院半导体研究所 集成技术中心, 北京 100083)

摘要: 通过模拟计算, 分析了阵列微透镜粗化对倒装结构 GaN 基 LED 提取效率的影响. 并采用感应耦合等离子 (ICP) 干法刻蚀技术在蓝宝石表面制备阵列微透镜, 实现倒装结构 GaN 基 LED 出光面粗化. 测试结果表明, 相对于普通倒装结构, 阵列微透镜表面粗化可以使 LED 提取效率提高约 50%, 测试结果与模拟计算值相符合.

关键词: GaN 基 LED; ICP; 阵列微透镜; 粗化

PACC: 4280L; 4225B; 7280E

中图分类号: TN312⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0496-04

1 引言

作为新一代环保型固态光源, GaN 基 LED 已成为人们关注的焦点. 与传统光源相比, LED 具有寿命长、可靠性高、体积小、功耗低、响应速度快、易于调制和集成等优点. 在信息显示、图像处理等领域得到广泛应用, 并有望替代白炽灯、荧光灯, 进入普通照明领域. 对于高效照明用 LED, 发光效率是其最重要的参数. 目前, GaN 蓝光 LED 发光效率为几 lm/W, GaN 白光 LED (蓝光 + 荧光粉) 的发光效率通常为几十 lm/W, 因此, 如何提高 LED 发光效率成为 LED 面临的一个主要技术瓶颈^[1-6].

GaN 基 LED 发光效率由发光二极管的内量子效率和光提取效率决定. 随着材料生长技术以及器件结构设计的进步, 内量子效率已经可以达到 80% 左右. 但受 GaN 材料吸收、电极吸收, 以及 GaN/空气界面全反射临界角等因素影响, GaN 基 LED 光提取效率只有百分之几, 仍然有很大的提升空间.

表面粗化是一种有效提高 LED 提取效率的方法. 其机理是通过对出光面粗化, 增加出光面积, 减少光线在器件内的全反射, 使更多的光线以散射光的形式出射. 目前应用于 GaN 基 LED 中的粗化技术主要局限于 GaN 面湿法腐蚀粗化. 该工艺通常要在高温或光辅助条件下实现, 因此工艺操作复杂, 重复性、可控性差, 并且不适用于以蓝宝石为出光面的倒装结构 GaN 基 LED^[7,8].

本文通过模拟计算, 分析了蓝宝石面阵列微透镜

粗化对倒装结构 GaN 基 LED 提取效率的影响; 并采用 ICP 刻蚀技术, 于倒装 LED 蓝宝石表面制作阵列微透镜, 实现倒装结构 LED 出光面粗化. 实验结果表明, 相对于普通倒装结构, 蓝宝石面阵列微透镜粗化技术可使器件提取效率提高约 50%, 实验结果与理论计算值相一致.

2 实验

实验中选用 GaN 外延片结构如下: 蓝宝石衬底, 1.5 μm Si 掺杂 n-GaN, 0.05 μm InGaN/GaN 多量子阱, 0.25 μm p-GaN. 器件制作工艺主要包括: ICP 技术刻蚀台面至 n-GaN 层, 电子束蒸发制作 n 电极, 电极体系选用 Ti/Al/Ti/Au, 退火温度 600~700 $^{\circ}\text{C}$, 蒸发过程中应注意控制蒸发速率和温度, 保证良好的电极表面及可剥离性; p 电极采用 Ni/Au 透明电极加 Ag 高反射电极, 空气氛围 500 $^{\circ}\text{C}$ 下合金. 蓝宝石面微透镜制备工艺主要包括: 通过光刻在蓝宝石表面制备均匀分布的半径为 6 μm 的光刻胶圆盘; 115 $^{\circ}\text{C}$ 条件下加热 15min, 通过光刻胶热阻回流形成半球; 以半球形光刻胶为掩膜, 通过 ICP 干法刻蚀将图形复制到蓝宝石表面. 最后将 GaN 芯片通过植球与 Si sub-mount 键合, 实现芯片倒装, 芯片结构如图 1 所示.

3 Monte-Carlo 光线追踪模拟

采用 Monte-Carlo 光线追踪的方法, 分析蓝宝

* “十五”国家重大攻关计划资助项目

† 通信作者. Email: lzq@mail.semi.ac.cn

2006-11-21 收到

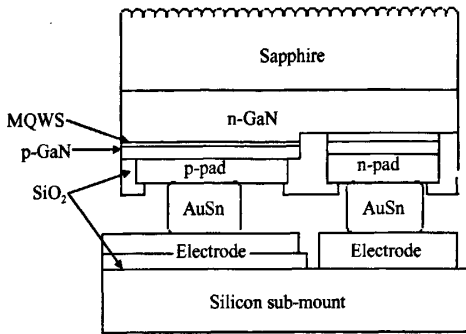


图1 粗化芯片结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of device

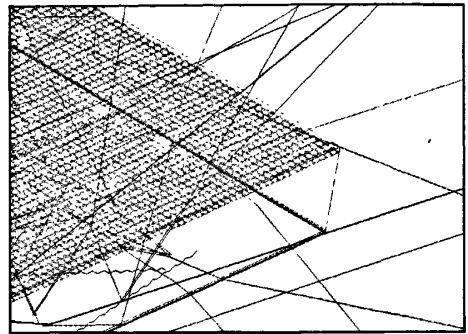


图3 模拟结果直观示意图
Fig.3 Schematic result of the model

石面阵列微透镜粗化对倒装结构 GaN 基 LED 提取效率的影响. 该模拟的主要机理如下: 首先根据器件的结构建立图 2 所示模拟模型, 然后对各层材料的折射率、吸收系数等主要物理光学参数进行设定, 使模型可以准确地反映器件实际情况. 模拟过程中, 有源区随机出射的光线, 经过各层介质层吸收及各光学界面的反射、折射, 最终逸出 LED. 通过统计逸出光线的功率总和, 与有源区输出的光功率相比, 得到 LED 的提取效率.

功率, 与有源区输出的光功率相比, 可以最终得到器件的光提取效率. 模拟结果表明, 阵列微透镜粗化可以使 GaN 基倒装 LED 提取效率提高约 70%.

4 实验结果与讨论

微透镜阵列粗化后蓝宝石表面及断面形貌如图 4 所示. 从图中可以看出, 通过光刻胶热回流掩膜及 ICP 刻蚀技术, 半球形微透镜阵列被成功地制备于蓝宝石表面, 图形一致性较好. 为考察阵列微透镜粗化对器件提取效率的影响, 我们测量了未经封装的、

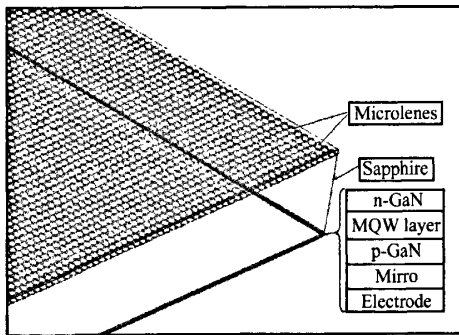


图2 模型结构示意图
Fig.2 Structure of model

模拟过程中, 结合图 1 所示 GaN 基 LED 的结构特点, 做如下假设: 有源区辐射机制为自发辐射, 自发辐射偏振方向和传播方向各向同性, 并且是随机分布的; 有源区输出光功率为 1W; LED 工作在稳态情况下; 光子产生率与损耗率符合稳态速率方程; 模型中 GaN 材料吸收系数取 100cm^{-1} [8], GaN 材料和蓝宝石的折射率分别取 2.4 和 1.76, 每个微透镜单元为半径 6mm 的半球形.

图 3 为输出光线的模拟结果直观示意图, 从图中可以看出, 有源区发出的光线一部分因为界面折射率差被限制在器件内部, 另外一部分从蓝宝石出光面逸出. 通过统计粗化前后 LED 逸出光线的

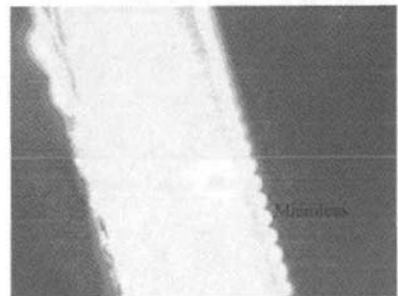
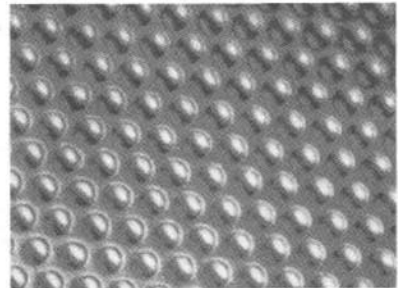


图4 蓝宝石粗化后表面及断面形貌
Fig.4 Surface and cross section optical microscopies of the fabricated sapphire microlens arrays

采用阵列微透镜粗化后的 LED, 在不同输入电流条件下的输出光功率, 并与相同材料结构、同一工艺条件下制备的未经粗化的芯片进行比较. 结果如图 5 所示.

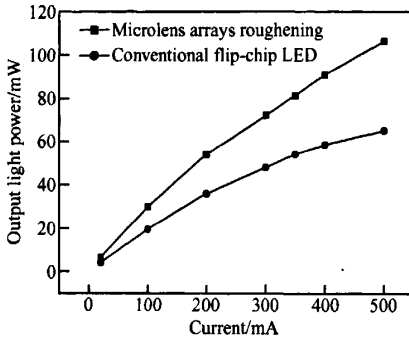


图 5 输出光功率与输入电流关系曲线

Fig. 5 Output power as a function of current

从图中可以看出, 阵列微透镜粗化, 可以有效提高倒装结构 GaN 基 LED 的输出光功率. 350mA 工作条件下, 采用阵列微透镜粗化的 LED 的蓝光输出光功率为 81mW, 与传统结构芯片比较, 提高约 50%. 同时从图中还可以看到, 经过粗化的器件具有更高的饱和电流. 这是因为, 表面粗化减少了光线在芯片内的全反射, 提高了器件光提取效率, 从而降低了因为光线吸收引起的热效应. 实验测量的光提取效率增加幅度略低于理论计算值, 其可能的原因是: 理论计算过程中, 假定微透镜紧密排布, 且形状为规则的半球形; 而实际工艺过程中, 由于工艺条件的差异, 一部分微透镜可能呈球冠状, 而不是完整的半球, 同时, 由于光刻胶的热阻回流, 也会使微透镜半径减小, 透镜单元间产生空隙, 这些因素在一定程度上减小了器件的出光面积, 最终导致器件实测提取效率增量与理论计算值比较略有降低.

5 结论

通过模拟计算, 分析了阵列微透镜粗化对倒装结构 GaN 基 LED 提取效率的影响, 并采用光刻胶热回流掩膜及 ICP 刻蚀技术, 成功地将半球形微透镜阵列制备于蓝宝石表面, 实现了倒装结构 LED 出光面粗化. 测试结果表明, 相对于传统倒装结构, 阵列微透镜表面粗化可以使 LED 提取效率提高约 50%, 实验值与理论计算结果相一致. 同时该技术与通常采用的 GaN 面湿法腐蚀粗化比较, 具有工艺相对简单、可控性好、重复率高、对有源区无损伤等优点.

参考文献

- [1] Kao C C, Kuo H C, Huang H W, et al. Light-output enhancement in a nitride-based light-emitting diode with 220 undercut sidewalls. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2005, 17(1): 19
- [2] Krames M R, Ochiai-Holcomb M. High-power truncated inverted-pyramid ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaP}$ light-emitting diodes exhibiting >50 external quantum efficiency. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(16): 2365
- [3] Chio H W, Jeon C W, Dawson M D, et al. Mechanism of enhanced light output efficiency in InGaN-based microlight emitting diodes. *J Appl Phys*, 2003, 93(10): 5978
- [4] Kawakami Y, Narukawa Y, Omae K, et al. Dimensionality of excitations in InGaN-based lighting devices. *Phys Status Solidi A*, 2000, 178(1): 331
- [5] Nishida T, Saito H, Kobayashi N. Efficient and high-power AlGaN-based ultraviolet light-emitting diode grown on bulk GaN. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(6): 711
- [6] Schnitzer I, Yablonovitch E, Caneau C, et al. 30% external quantum efficiency from surface textured thin-film light emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 1993, 63(16): 2174
- [7] Huh C, Lee K S, Kang E J, et al. Improved light-output and electrical performance of InGaN-based light-emitting diode by microroughening of the p-GaN surface. *J Appl Phys*, 2003, 93(11): 9383
- [8] Fujii T, Bao Y, Sharma R, et al. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(6): 855

Surface Roughening with Sapphire Microlens Arrays in Flip-Chip GaN-Based LEDs*

Liu Zhiqiang[†], Wang Liangchen, Yi Xiaoyan, Wang Libin, Chen Yu,
Guo Debo, and Ma Long

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10083, China*)

Abstract: The effect of surface roughness of microlens arrays on the performance of flip-chip GaN-based LEDs was investigated by simulation, and microlens arrays were fabricated on sapphire to fulfill surface roughening in flip-chip GaN-based LEDs. The results indicate that compared with conventional flip-chip GaN-based LEDs, microlens arrays roughening can improve the extraction efficiency with a factor of 1.5, and the experimental results are in good agreement with the simulation results.

Key words: GaN-based LED; ICP; microlens arrays; roughening

PACC: 4280L; 4225B; 7280E

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0496-04

* Project supported by the National Tackle Key Item in the Tenth Five-Year Plan

[†] Corresponding author. Email: lzq@mail.semi.ac.cn

Received 21 November 2006