

光致电化学法提高垂直结构发光二极管出光效率的研究

弓志娜 云峰 丁文 张烨 郭茂峰 刘硕 黄亚平 刘浩 王帅 冯仓刚 王江腾

Increase in light extraction efficiency of vertical light emitting diodes by a photo-electro-chemical etching method

Gong Zhi-Na Yun Feng Ding Wen Zhang Ye Guo Mao-Feng Liu Shuo Huang Ya-Ping Liu Hao Wang Shuai Feng Lun-Gang Wang Jiang-Teng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 018501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.018501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

室内可见光通信发光二极管阵列发射性能的研究

Research on the light emitting diode array launching performance for indoor visible light communication

物理学报.2014, 63(23): 238503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238503>

基于反应动力学的 GaN LED 参数退化模型的研究

The investigation of LED degradation model based on the chemical kinetics

物理学报.2013, 62(21): 218503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.218503>

白光发光二级管用红色荧光粉 $\text{LiSrBO}_3:\text{Eu}^{3+}$ 的制备与发光性能研究

Preparation and photoluminescence of $\text{LiSrBO}_3:\text{Eu}^{3+}$ red-emitting phosphors for white leds

物理学报.2013, 62(10): 108504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.108504>

基于缺陷光子晶体结构的 GaN 基发光二极管光提取效率的有关研究

Study on the light extraction efficiency of GaN-based light emitting diode by using the defects of the photonic crystals

物理学报.2012, 61(20): 208502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.208502>

渐变型量子阱垒层厚度对 GaN 基双波长发光二极管发光特性调控的研究

The investigation of performance improvement of GaN-based dual-wavelength light-emitting diodes with various thickness of quantum barriers

物理学报.2012, 61(17): 178504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.178504>

光致电化学法提高垂直结构发光二极管 出光效率的研究*

弓志娜¹⁾²⁾ 云峰^{1)2)3)†} 丁文¹⁾²⁾ 张焯²⁾ 郭茂峰²⁾ 刘硕³⁾ 黄亚平¹⁾²⁾
刘浩¹⁾²⁾ 王帅¹⁾²⁾ 冯仑刚¹⁾²⁾ 王江腾¹⁾²⁾

1)(西安交通大学, 电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

2)(西安交通大学固态照明工程研究中心, 西安 710049)

3)(陕西新光源科技有限责任公司, 西安 710077)

(2014年7月24日收到; 2014年8月23日收到修改稿)

研究了在垂直结构发光二极管(VLED)器件中, 光致电化学法(PEC)刻蚀N极性n-GaN的速率受不同刻蚀条件(刻蚀浓度、刻蚀时间和光照强度)的影响. 并选择N极性n-GaN表面含有较理想六角金字塔结构(侧壁角为 31°)的样品制成器件, 研究PEC刻蚀对VLED的欧姆接触和光电性能的影响. 结果表明, 与未粗化样品相比, PEC刻蚀后的样品接触电阻率明显降低, 形成更好的欧姆接触; 其电学特性有较好的改善, 光输出功率有明显提高, 在20 mA电流下光输出功率增强了86.1%. 对不同金字塔侧壁角度的光提取效率用时域有限差分法(FDTD)模拟, 结果显示光提取效率在侧壁角度为 20° — 40° 有显著提高, 在 23.6° (GaN-空气界面的全反射角)时达到最大.

关键词: 刻蚀, 光致电化学法, n-GaN, 出光效率

PACS: 85.60.Jb, 81.65.Cf, 68.65.-k, 73.40.Ns

DOI: 10.7498/aps.64.018501

1 引言

GaN基发光二极管(light emitting diode, LED)由于其高效、节能、环保等优点在固态照明领域已经引起广泛的关注. 在大功率、高亮度LED中, 垂直结构LED在电流扩展、热管理、光提取方面比传统的水平结构LED具有更大的优势^[1-3]. 由于外延技术的进步, GaN基LED的内量子效率已经超过80%^[4]. 然而外量子效率与内量子效率相比仍然较低. 研究人员采用表面粗化^[5-7], 光子晶体^[8,9], 图形化衬底^[10]等芯片制作技术来提高出光效率, 从而提高LED的外量子效率.

采用光致电化学(photo-electro-chemical, PEC)法对LED表面进行粗化, 是一种获得高光提取效率的有效手段. 近年来, 国内外小组对PEC刻蚀n-GaN机理、PEC刻蚀速率和PEC提高出光效率等方面进行了研究. Minsky等^[11]研究了PEC刻蚀GaN的机理; Seo等^[12]研究了在KOH, H_3PO_4 , HNO_3 等多种电解液中PEC刻蚀GaN的情况; Fujii等^[13]通过PEC刻蚀n-GaN表面, 使LED光提取效率提高了2—3倍. 然而目前对GaN基垂直结构LED的PEC粗化研究较少. 本文主要研究在垂直结构LED中, 不同刻蚀条件对PEC刻蚀速率(电解液为KOH)的影响, 和PEC刻蚀对垂直结构LED的电学、光学性能的影响.

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2014AA032608)和西安交通大学金属材料国家重点实验室开放课题(批准号: 20121201)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fyun2010@mail.xjtu.edu.cn

2 实 验

实验样品的制作过程与垂直结构LED芯片工艺类似. 先用金属有机化学气相沉积(MOCVD)法在c面蓝宝石衬底上分别生长了GaN缓冲层(25 nm), 非故意掺杂GaN(2 μm), n-GaN:Si(2 μm), 5对InGaN/GaN量子阱(5 nm/12 nm), AlGaIn电子阻挡层(20 nm), p-GaN:Mg(300 nm); 外延片生长结束后, 用电子束蒸发工艺在p-GaN表面蒸镀Ni/Ag/Ti/Au(1/100/100/300 nm)的p型欧姆接触; 然后将p型金属键合在铜钨衬底上, 用激光剥离法去除蓝宝石衬底, 并用ICP刻蚀n-GaN, 露出n-GaN, 从而制成实验样品. 样品表面的n-GaN表现的是(0001) N极性面, 更容易通过PEC被刻蚀^[14]. PEC刻蚀装置如图1(a)所示, 图中n-GaN样品上蒸镀100 nm Ti, Ti用作阳极, Pt用作阴极; 阴极和阳极用电流表相连, 浸泡在KOH溶液中; 装置上方由Hg灯提供统一光源, 强度可以在0—25 mW/cm² (波长为365 nm) 范围内变化. 经PEC粗化后的样品示意图如图1(b)所示.

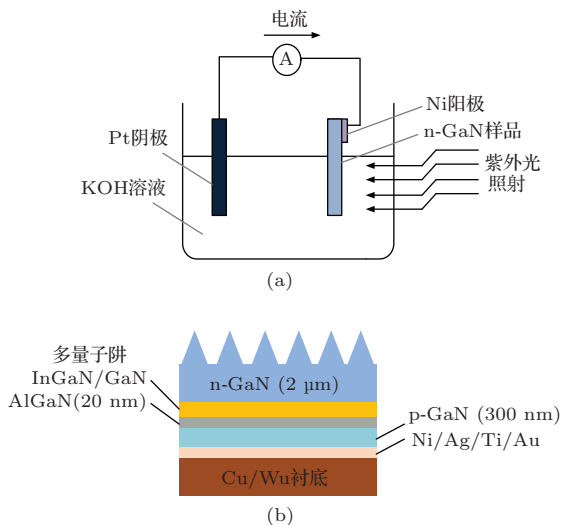


图1 (网刊彩色)(a)PEC刻蚀装置; (b)PEC粗化后的样品示意图

具体实验过程如下: 首先将实验样品在丙酮、乙醇、去离子水中分别清洗5 min, 用氮气吹干. 其次将样品分成四组, I组样品不进行PEC刻蚀, 作为对照组; II组样品在光强为20 mW/cm², 70°C的KOH溶液中进行PEC刻蚀30 min, 刻蚀浓度分别为2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 mol/L; III组样品在光强为20 mW/cm², 70°C, 7 mol/L的KOH溶液中进行刻蚀, 刻蚀时间分别为30, 40, 50, 60, 70, 80, 90

min; IV组样品在70°C, 7 mol/L的KOH溶液中刻蚀30 min, 光强分别为5, 10, 15, 20, 25 mW/cm². 通过测量n-GaN刻蚀深度, 得到不同刻蚀条件的PEC刻蚀速率. 然后选择一时刻蚀效果较好的样品分割成两部分: 1) 其中一部分和对照组均在n-GaN表面蒸镀Al(600 nm)/Ti(100 nm)/Au(300 nm)电极, 制成n型欧姆接触, 采用圆形传输线模型(circle transmission line model, CTLM)来测量电极的比接触电阻率, 电极圆环的间距分别为15, 20, 25, 35, 45, 65 μm; 2) 另外一部分和对照组均在n-GaN表面蒸镀n电极制成垂直结构LED芯片, 进行电学和光学性能测试. 本次实验的SEM图像利用SU8010分析, 接触电阻率和光电特性曲线用MPS-T1测试, 内量子效率由电测量法得到^[15,16].

3 结果与讨论

对于II组样品, PEC刻蚀速率随刻蚀浓度的变化如图2(a)所示. 在光强为20 mW/cm², 70°C的KOH溶液中刻蚀30 min, 刻蚀浓度分别为2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 mol/L, 对应的PEC刻蚀速率分别为~ 6.7, ~ 25.7, ~ 40.2, ~ 50.1, ~ 53.4, ~ 54.56, ~ 54.6 nm/min. 可以发现当刻蚀浓度低于6 mol/L时, 刻蚀速率随刻蚀浓度的增加而明显增加; 当刻蚀浓度高于6 mol/L时, 刻蚀浓度对刻蚀速率的影响很小. 这是由于在刻蚀浓度低于6 mol/L时, 刻蚀速率是由动力学和扩散来控制的^[17], 刻蚀浓度影响扩散, 从而影响刻蚀速率; 当刻蚀浓度高于6 mol/L时, 刻蚀速率仅由动力学控制, 所以受刻蚀浓度的影响不大. 对于III组样品, PEC刻蚀速率随刻蚀时间的变化如图2(b)所示. 在光强为20 mW/cm², 70°C, 7 mol/L的KOH溶液中进行刻蚀, 刻蚀时间分别为30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 min, 对应的PEC刻蚀速率分别为~ 54.56, ~ 47.63, ~ 45.31, ~ 43.89, ~ 42.5, ~ 39.1, ~ 34.33 nm/min, 可见刻蚀速率随刻蚀时间的增加而逐渐下降. 这是因为在KOH刻蚀N极性的n-GaN过程中, PEC反应式如下:

氧化还原反应:



刻蚀反应:



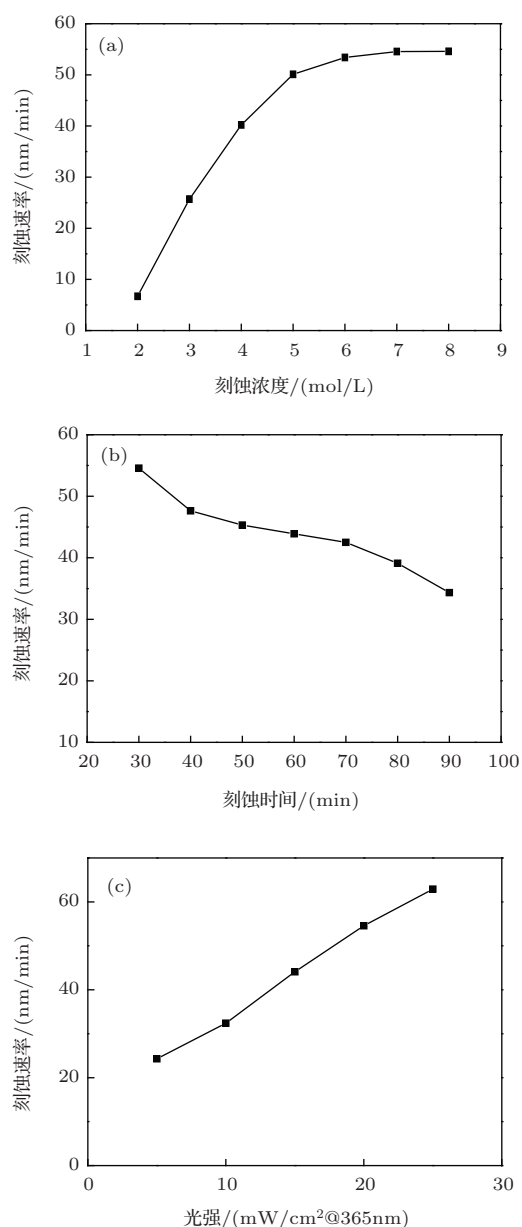


图2 PEC刻蚀速率随不同刻蚀条件的曲线 (a)在光强为 20 mW/cm², 70°C 的 KOH 溶液中刻蚀 30 min, 不同刻蚀浓度对应的刻蚀速率; (b)在光强为 20 mW/cm², 70°C, 7 mol/L 的 KOH 溶液中刻蚀, 不同刻蚀时间对应的刻蚀速率; (c)在 70°C, 7 mol/L 的 KOH 溶液中刻蚀 30 min, 不同光强对应的刻蚀速率

OH⁻ 同时参与氧化还原反应和刻蚀反应, 并且在刻蚀反应中 OH⁻ 起催化剂和溶解 Ga₂O₃ 的作用. 因此随着刻蚀时间的延长, OH⁻ 不断被消耗而减少, 从而使反应速率逐渐下降. 而且 OH⁻ 的减少也意味着 KOH 浓度的下降, 因此由 2(a) 图也可以解释刻蚀速率随刻蚀时间的增加而下降的原因. 对于 IV 组样品, PEC 刻蚀速率随光强的变化如图 2(c) 所示. 在 70°C, 7 mol/L 的 KOH 溶液中刻蚀 30 min, 光强分别为 5, 10, 15, 20, 25 mW/cm², 对

应的 PEC 刻蚀速率分别为 ~ 24.3, ~ 32.4, ~ 44.1, ~ 54.56, ~ 62.9 nm/min, 可见刻蚀速率随光强的增加而线性增大. 主要原因是在 PEC 反应中, 当紫外光源发出的光子能量大于 GaN 的禁带宽度时, 光子被吸收, 样品内部会产生电子-空穴对, 空穴参与氧化还原反应, 从而发生 PEC 刻蚀; 当光强增加时, 有更多的光子激发 GaN 产生空穴参与反应, 从而使 PEC 刻蚀速率增加.

选择一片刻蚀效果较好的样品, 其刻蚀条件为: 光强 20 mW/cm², 70°C, 7 mol/L 的 KOH 溶液, 刻蚀 30 min. 对照组和样品的 SEM 图像如图 3 所示, 图 3(a) 是 PEC 刻蚀前的 N 极性 n-GaN

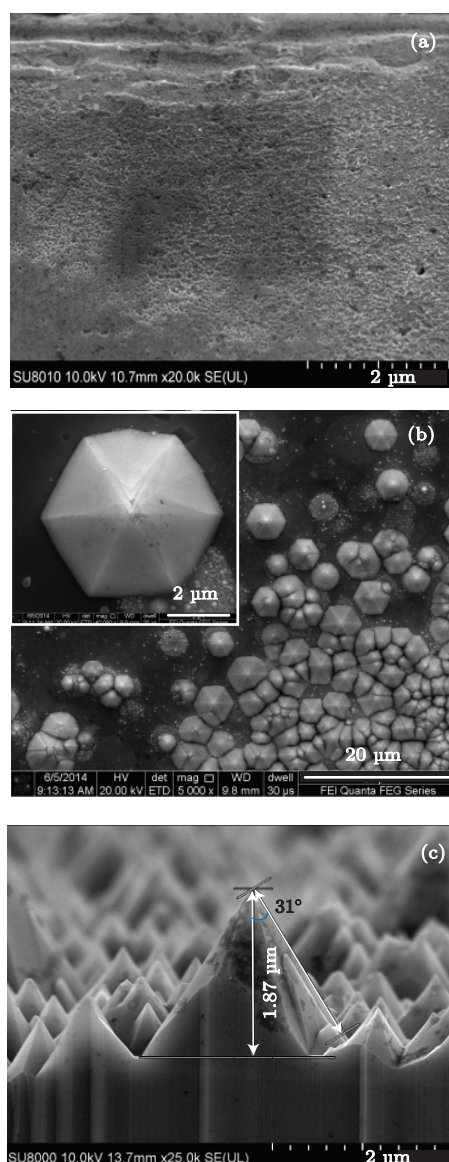


图3 (网刊彩色)(a)未进行 PEC 刻蚀的 N 极性 n-GaN 表面 SEM 形貌; (b)PEC 刻蚀 30 min 后的 N 极性 n-GaN 表面 SEM 俯视图, 插图是一个六角金字塔的放大图; (c)PEC 刻蚀后的表面 SEM 截面图

表面SEM形貌; 图3(b)是PEC刻蚀后的N极性n-GaN表面SEM俯视图, 从图中可以看出GaN经KOH刻蚀后呈六角金字塔结构, 插图是一个六角金字塔的放大图; 图3(c)是PEC刻蚀后的N极性n-GaN表面SEM截面图, 图中n-GaN的刻蚀深度为1.87 μm , 金字塔的侧壁角度为 31° . 金字塔的形貌与被刻蚀面的表面能和刻蚀速率有关^[17], 由于N极性GaN在不同刻蚀液中的面选择性刻蚀不同, 所以在KOH中刻蚀出的金字塔呈六角形, 在 H_3PO_4 中的呈十二边形; 金字塔的侧壁角度与GaN的刻蚀面有关, 沿 $(10\bar{1}\bar{1})$ 刻蚀的金字塔侧壁角度为定值 31.6° ^[18], 沿 $(000\bar{1})$ 刻蚀的侧壁角度为 31° .

将上述样品和对照组表面均蒸镀Al(600 nm)/Ti(100 nm)/Au(300 nm)电极, 对间距 $d = 35 \mu\text{m}$ 的圆环电极测试其I-V曲线如图4所示. 图中显示粗化后的样品I-V曲线比未粗化的更陡峭、更趋于线性, 这表明粗化后的样品表面与电极能更好的形成欧姆接触. 事实上, 通过CTLM模型计算得到粗化后样品的比接触电阻 ρ_c 为 $1.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 比粗化前样品的 ρ_c ($3.1 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$) 减小了一个数量级. 这是由于PEC刻蚀后使电极与n-GaN界面发生相反的能带弯曲, 且能量势垒更高, 从而使热电子发射和电子隧穿更容易发生, 接触电阻更低^[19].

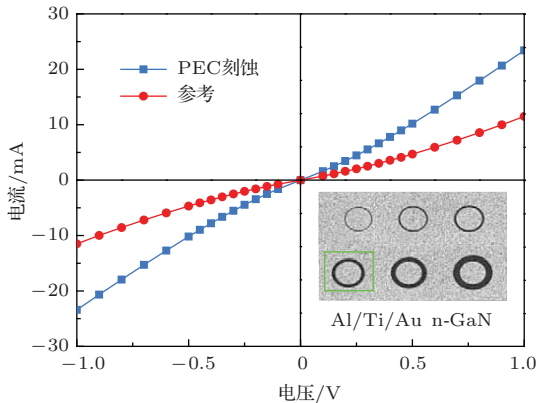


图4 (网刊彩色) 粗化和未粗化的样品蒸镀Al/Ti/Au后的I-V曲线, 被测圆环电极是插图(CTLM模型)中的被圈圆环

将粗化后样品和对照组均在n-GaN表面蒸镀n电极制成垂直结构LED芯片, 进行电学和光学性能的测试. 图5(a)是PEC刻蚀前后电学特性的对比, 可以发现粗化后的芯片有较低的正向电压, 开启电压相比于未粗化时的3.06 V减小为2.87 V; 插图是粗化前后样品的反向漏电对比, 在反向电压为

8 V时, 参考样品漏电流为0.67 μA , PEC刻蚀后的芯片漏电流减小为0.3 μA , 可见PEC刻蚀对芯片的电学特性有较好的改善. 图5(b)是PEC刻蚀前后光输出功率的对比, 可以发现PEC刻蚀后的光输出功率(light output power, LOP)有明显提高, 在20 mA和100 mA电流下光输出功率分别增强了86.1%和67.2%. 这是因为PEC刻蚀形成的金字塔

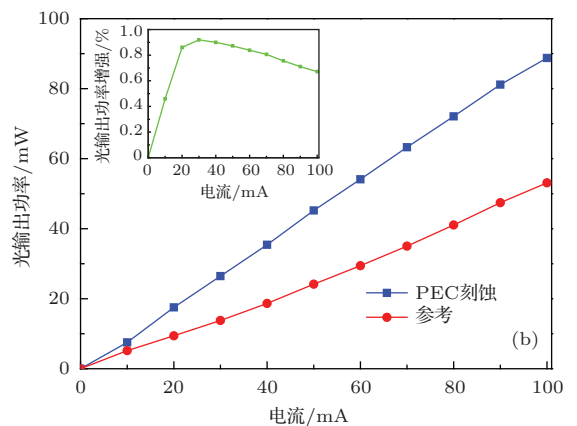
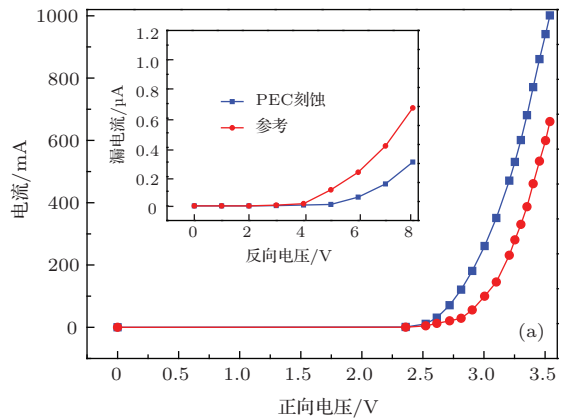


图5 (网刊彩色)(a)PEC刻蚀前后电流-正向电压曲线, 插图是反向特性对比; (b)PEC刻蚀前后光输出功率-电流曲线, 插图是PEC刻蚀后光输出功率增强-电流曲线

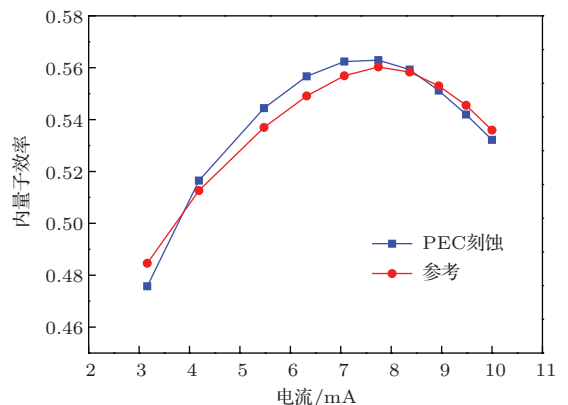


图6 (网刊彩色)PEC刻蚀前后内量子效率-电流曲线

结构使 GaN-空气界面的全反射角增大, 增加了出光路径, 从而使光提取效率增加; 而且 PEC 刻蚀对样品的内量子效率影响不太大 (如图 6), 因此综合两个因素光输出功率会增强.

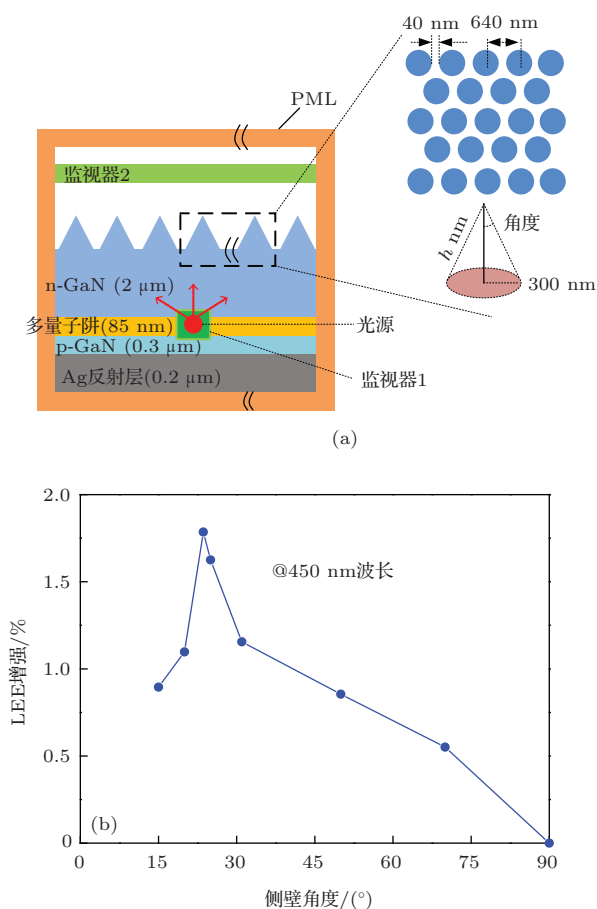


图 7 (网刊彩色) (a) FDTD 仿真的简化 VLED 模型; (b) FDTD 模拟的不同侧壁角度金字塔结构的光提取效率

为了更好的理解 PEC 刻蚀出的金字塔结构提高光输出功率的物理机理, 用时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 模拟 VLED 表面不同侧壁角度的金字塔对于光提取效率的影响, 如图 7 所示. 图 7(a) 是 FDTD 仿真的简化 VLED 模型, 定义光提取效率 (light extraction efficiency, LEE) 为接收器 1 检测的光功率 P_1 与接收器 2 检测的光功率 P_2 的比值, 即 $LEE = P_1/P_2$. 模拟结果显示光提取效率随着金字塔侧壁角度的变化而变化, 在侧壁角度为 20° — 40° 有显著提高, 且在 23.6° 时达到最大值 (图 7(b)), 这是因为金字塔侧壁角为 23.6° 时, 恰好也是 GaN-空气界面的全反射角, 量子阱发出的光几乎能全部出射到空气中. 而且当金字塔侧壁角从 23.6° 进一步减小时, 光提取效率也随之减小, 原因可能是侧壁角从 23.6° 逐渐减小

到 0° 时, 金字塔结构逐渐变成类纳米柱结构, 出射光容易在类纳米柱结构中形成波导模式 [20], 从而使光提取效率降低. 当侧壁角为 31° 时, 即实验中 PEC 刻蚀 n-GaN 后形成的金字塔侧壁角度, 理论光提取效率增强了 115%, 与实验测得的最大光输出增强功率 92% 相比略大, 说明实验中 V-LED 出射的光有很少一部分被 n-GaN 吸收.

4 结 论

本文主要研究了在垂直结构 LED 中, PEC 刻蚀 N 极性 n-GaN 时, 刻蚀速率受不同刻蚀条件的影响, 结果显示 1) 随着刻蚀浓度的增加, PEC 刻蚀速率先增大后趋于稳定; 2) 刻蚀速率随刻蚀时间的增加而逐渐下降; 3) 刻蚀速率随光强的增加而线性增大. 综合考虑上述结果, 选择出合适的刻蚀条件为光强 20 mW/cm^2 下, 70°C , 7 mol/L 的 KOH 溶液中刻蚀 30 min.

将在上述条件刻蚀出的样品制作成器件, 研究 PEC 刻蚀对 VLED 的欧姆接触和光学性能的影响, 结果表明 1) PEC 刻蚀后的样品与电极形成了更好的欧姆接触, 比接触电阻 ρ_c 为 $1.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 比未粗化样品的 ρ_c ($3.1 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$) 减小了一个数量级. 2) PEC 刻蚀后的电学特性有较好的改善, 开启电压由粗化前的 3.13 V 减小为 2.9 V, 漏电流在反向电压为 8 V 时由粗化前的 $0.67 \mu\text{A}$ 减小为 $0.3 \mu\text{A}$; 光输出功率有明显提高, 在 20 mA 电流下光输出功率增强 86.1%. 3) FDTD 模拟结果显示光提取效率在侧壁角度为 20° — 40° 有明显提高, 在 23.6° (GaN-空气界面的全反射角) 时达到最大; 实验样品的金字塔侧壁角度为 31° , 理论光提取效率增强了 115%, 与实验基本符合.

参考文献

- [1] Park J, Shin M, Lee C C 2004 *Opt. Lett.* **29** 2656
- [2] Kim H, Choi K K, Kim K K, Cho J, Lee S N, Park Y, Kwak J S, Seong T Y 2008 *Opt. Lett.* **33** 1273
- [3] Zheng C, Zhang S M, Wang H, Liu J P, Wang H B, Li Z C, Feng M X, Zhao D G, Liu Z S, Jiang D S, Yang H 2012 *Chin Phys. Lett.* **29** 017301
- [4] Fuhmann D, Netzel C, Rossow U, Hangleiter A 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 071105
- [5] Huh C, Lee K S, Kang E J, Park S J 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9383

- [6] Huang H W, Kuo H C, Lai C F, Lee C E, Chiu C W, Lu T C, Wang S C, Lin C H, Leung K M 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 565
- [7] Zhang S Y, Xiu X Q, Hua X M, Xie Z L, Liu B, Chen P, Han P, Lu H, Zhang R, Zheng Y D 2014 *Chin. Phys. B* **23** 058101
- [8] Jewell J, Simeonov D, Huang S-C, Hu Y-L, Nakamura S, Speck J, Weisbuch C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 171105
- [9] Wu K, Wei T B, Lan D, Zheng H Y, Wang J X, Luo Y, Li J M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 028504
- [10] Shen C F, Chang S J, Chen W S, Ko T K, Kuo C T, Shei S C 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 780
- [11] Minsky M S, White M, Hu E L 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1531
- [12] Seo J W, Oh C S, Yang J W, Yang G M, Lim K Y, Yoon C J, Lee H J 2001 *Phys. Status Solidi A* **188** 403
- [13] Fujii T, Gao Y, Sharma R, Hu E L, DenBaars S P, Nakamura S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 855
- [14] Palacios T, Calle F, Varela M, Ballesteros C, Monroy E, Naranjo F B, Sanchez-Garacia M A, Calleja E, Munoz E 2000 *Semicond. Sci. Technol.* **15** 996
- [15] Yu T J (于彤军) 2011 CN 102252829 A
- [16] Laubsch A, Sabathil M, Baur J, Peter M, Hahn B 2010 *IEEE Trans. Electron Devices* **57** 79
- [17] Wang L C, Ma J, Liu Z Q, Yi X Y, Yuan G D, Wang G H 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 133101
- [18] Ng H M, Weimann N G, Chowdhury A 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 650
- [19] Chung R B, Chen H T, Pan C C, Ha J S, DenBaars S P, Nakamura S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 091104
- [20] Kuo M L, Kim Y S, Hsieh M L, Lin S Y 2011 *Nano Lett.* **11** 476

Increase in light extraction efficiency of vertical light emitting diodes by a photo-electro-chemical etching method*

Gong Zhi-Na¹⁾²⁾ Yun Feng^{1)2)3)†} Ding Wen¹⁾²⁾ Zhang Ye²⁾ Guo Mao-Feng²⁾ Liu Shuo³⁾
Huang Ya-Ping¹⁾²⁾ Liu Hao¹⁾²⁾ Wang Shuai¹⁾²⁾ Feng Lun-Gang¹⁾²⁾ Wang Jiang-Teng¹⁾²⁾

1) (Shaanxi Provincial Key Laboratory of Photonics & Information Technology, Key Laboratory of Physical Electronics and Devices of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Solid-State Lighting Engineering Research Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (Shaanxi Supernova Lighting Technology Co. Ltd, Xi'an 710077, China)

(Received 24 July 2014; revised manuscript received 23 August 2014)

Abstract

The rate of photo-electro-chemical (PEC) etching on N-polar n-GaN using vertical light emitting diodes (V-LEDs) has been investigated in detail, by varying the etching parameters (etchant concentration, etching duration and light intensity). V-LED with optimal hexagonal pyramid structure (the side-wall angle is 31°) has been fabricated, and then the influence of the PEC etching on the electrical and optical properties of V-LED has been analyzed. After PEC etching, the sample has good ohmic contact with the electrode and has lower contact resistance than a reference sample. The electrical characteristics have a better improvement. And the light output power has improved obviously after PEC etching, which shows 86.1% enhancement at 20 mA. Effect of side-wall angle of the pyramids on light extraction efficiency (LEE) in V-LEDs is theoretically calculated by finite difference time domain (FDTD) method. Simulation results show that the LEE is significantly increased for the sidewall angle between 20° and 40° , and the maximum enhancement is realized at a side-wall angle of 23.6° (the total reflection angle at the GaN/air interface).

Keywords: etch, photo-electro-chemical method, n-GaN, light extraction efficiency

PACS: 85.60.Jb, 81.65.Cf, 68.65.-k, 73.40.Ns

DOI: 10.7498/aps.64.018501

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2014AA032608), and the Xi'an Jiaotong University State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Material open project, China (Project No. 20121201).

† Corresponding author. E-mail: fyun2010@mail.xjtu.edu.cn