

非平面化型 ITO 氮化镓基蓝光发光二极管

翁斌斌¹, 秦丽菲¹, 黄瑾¹, 尹以安¹, 刘宝林^{1,2}, 张保平^{1,2}

(1. 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005; 2. 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要: 将氧化铟锡(ITO)生长于氮化镓基蓝色发光二极管的出光台面上(p型 GaN 台面), 用非平面化处理的方法制作出 ITO 井状结构, 研制出非平面化型氧化铟锡-氮化镓基蓝色发光二极管(LED), 获得了高的出光效率。结果表明, 在 20 mA 工作电流下, 该蓝色发光二极管的出光光强是平整的普通 ITO-GaN 基 LED 的 1.35 倍。

关键词: 发光二极管; 氮化镓; 氧化铟锡; 出光效率

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2007)06-0774-04

GaN-based Blue Light-emitting Diodes with a Nano-roughened ITO Surface

WENG Bin-bin¹, QIN Li-fei¹, HUANG Jin¹, YIN Yi-an¹, LIU Bao-lin^{1,2}, ZHANG Bao-ping^{1,2}

(1. Physics Department, Xiamen University, Xiamen 361005, CHN;

2. Fujian Engineering Research Center for Solid-State Lighting, Xiamen 361005, CHN)

Abstract: Indium-tin-oxide (ITO) material was grown on the plane of a new type GaN-based light emitting diodes (LEDs). A pillar or well structure arranged periodically in the plane were successfully fabricated, which obtained high light-extracted efficiency. It is found that the output power of the new type LEDs under 20 mA current is 1.35 times higher than the normal ITO-GaN-based LED.

Key words: light emitting diodes; GaN; indium-tin-oxide; light-extracted efficiency

1 引言

为了提高氮化镓基蓝色发光二极管的工作性能,改进 n 型和 p 型 GaN 材料上层金属接触的欧姆特性是十分重要的。目前, n 型 GaN 的欧姆接触研究已经取得较满意的结果^[1~6]。对于 p 型 GaN 材料,由于 Mg 的激活能很高,空穴浓度不能完全满足器件的要求。为了避免所谓电流侧向扩展限制的问题,当前通常采用半透明 Ni/Au 作为金属接触电极,将其覆盖整个 p 型 GaN 的上表面,这样就能使所加电流不需要通过侧向扩展就能有效地通过整个 p 型 GaN 注入发光器件的有源区^[7,8]。但是由于 Ni/Au 金属对于可见光具有较高的反射率和一定

的吸收作用,所以这种方法仍然在很大程度上限制了器件的提取效率,从而降低了 GaN 基蓝色发光二极管的出光效率。因此,具有高电导率、高透光率的氧化铟锡(ITO)半导体材料被选为 p 型 GaN 表层的新型金属接触电极^[9~11]。C. S. Chang 等人^[11]于 2003 年研制的 ITO-GaN 基蓝色发光二极管比 Ni/Au-GaN 基蓝色发光二极管,尽管在工作电压上偏高,大约提高了 1.12 V,但其出光光强却大大提高了,由 35.4 mcd 提高至 55.4 mcd。

尽管利用了 ITO 后,新型的 GaN 基 LED 光性能提高了许多,但是考虑到全反射现象,量子阱激发的光子在 p 型 GaN 表层和外界空气交界面入射时,仍会有大量的光子被限制在器件内部无法出射,这些光子最终转换成能量消耗于器件中,影响器件的性能。本文就是在 ITO-GaN 基 LED 的基础之上针对全反射问题展开了研究。

收稿日期:2007-03-13.

基金项目:国家自然科学基金项目(60276029);国家“863”计划项目(2004AA311020,2006AA03Z409);福建省科技项目(2006H0092,A0210006,2005HZ1018).

本文使用光的射线理论对光子的传播路径进行分析,研究了限制光出射的原因,提出了将原来平整的ITO电流扩展层进行非平面化的方法,解决原LED由于全反射而限制光出射的问题。通过实验,研制了这种ITO-GaN基蓝色发光二极管,从实践角度证明了该设计的正确性和可行性,得到的出光功率约为普通的ITO-GaN基蓝色发光二极管的1.35倍。

2 问题分析及解决方案

光从折射率高的物质射入折射率低的物质时,在它们的界面会产生全反射现象。从几何光学分析,出射光线的规律满足菲涅尔定律。当全反射发生时,其临界角满足公式

$$\sin \theta_c = n_1 / n_2 \tag{1}$$

式中, θ_c 为全反射角,外界环境的折射率为 n_1 , 矩形材料的折射率为 n_2 , 且 $n_1 < n_2$, 则该材料的出光效率可近似为

$$\eta_{out} = \frac{6 \int_0^{\theta_c} 2\pi R^2 \sin \theta d\theta}{4\pi R^2} = 3 - 3\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} \tag{2}$$

其他光子由于全反射的原因被限制在了材料内部,这种通过全反射机理限制光出射的矩形结构为光学谐振腔。

同样,对于GaN基LED而言,其内部有源层激射的光在GaN材料与外界环境的分界面上会发生全反射现象。GaN材料的折射率约为2.5,假设外界环境为空气,即 n_1 为1。根据公式(1)计算得到的GaN基LED内部光子在GaN材料与外界环境界面的全反射临界角约为 23.6° 。针对GaN基LED的矩形结构,并运用几何光学的方法分析易得,在器件的上、下两表面无法出射的光线,如图1(a);当其入射角处于 $66.4^\circ < \theta < 90^\circ$ 时,会经过多次反射到达LED芯片侧面,这时其入射角将小于全反射的临界角,可以从侧面耦合出器件,如图1(b);但是,当其入射角处于 $23.6^\circ < \theta < 66.4^\circ$ 时,即使光线传播至器件侧面,也仍然无法耦合出器件,如图1(c)。

根据公式(2),结合以上分析,理论计算得到GaN基LED的最大出光率约为24%。

若将交接界面转换成弧状或者球状,光线在不断反射的同时,界面处的入射角也在不断变化,这将导致原先入射角大于全反射临界角的光线可能由于入射角变化至小于全反射临界角而耦合出器件。

基于以上非平面化破坏光学谐振腔机理的描述,同时结合ITO在提高GaN基LED出光效率方面的优点,本工作设计了以下三种方案,结构的截面模型如图2所示。

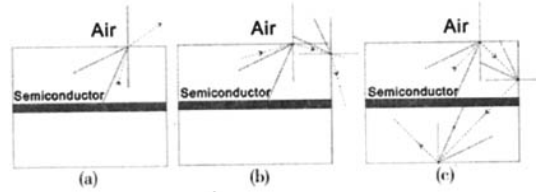


图1 GaN基LED有源层激射光的传播路径模拟图



图2 三种非平面化ITO结构的截面图

对于大半球形ITO结构方案,以一块 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的发光管芯片为例,需要在芯片上生长至少 $150 \mu\text{m}$ 的ITO材料,这显然是十分不现实的做法;对于小半球阵列ITO结构方案,这种方案受到了目前实验室制作工艺的限制,无法实现。因此,在同时考虑了出光效率的提高,以及制作工艺的限制等因素,确定了第三个实验方案,即在ITO材料表层运用湿法刻蚀腐蚀出ITO圆井状阵列,并在阵列的底部保留一层ITO薄层作为电流扩展层。这种方法工艺简单,可行性强,同时能够达到提高出光效率的目的。

运用非平面化处理破坏光学谐振腔结构的方法,设计了新型的ITO-GaN基蓝色LED的结构,立体模型如图3所示。

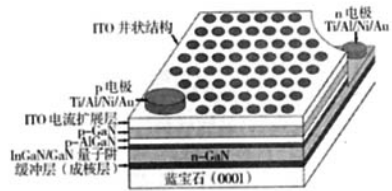


图3 圆井状阵列ITO-GaN基LED的结构立体图

3 实验研究

本研究使用的InGaIn/GaN多量子阱的外延片是由厦门三安电子有限公司提供。外延片由下至上分别为 $350 \mu\text{m}$ 厚的蓝宝石,约 30 nm 厚的成核层, $4 \mu\text{m}$ 厚的掺Si的n型GaN层, 140 nm 厚的InGaIn/GaN多量子阱有源层, 50 nm 厚掺Mg的p型

AlGaN 和 $0.2\ \mu\text{m}$ 厚掺 Mg 的 p 型 GaN 以及 $250\ \text{nm}$ 的 ITO。通过清洗、光刻、溅射、退火等实验工艺,我们制作了普通的 ITO-GaN 基发光二极管。接着芯片进行涂胶、光刻、湿法腐蚀等步骤,对其进行非平面化处理,获得了非平面化的新型 ITO-GaN 基蓝色 LED 芯片。

为了选择最优化的圆井底直径,设计了直径分别为 $2\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 、 $6\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 的四种结构光刻掩模版,为了实验结果的对比性更加可靠,在制作光刻掩模版时作了一定的改进和简化,将以上四种直径的掩模图形制作于同一套掩模版之上,如图 4 所示。

制作非平面化 ITO 表面采用王水 ($V_{\text{HNO}_3} : V_{\text{HCl}} = 1 : 3$) 作为腐蚀剂,在室温下进行湿法腐蚀,其腐蚀速率为 $4.3\ \text{nm}/\text{min}$ 。

最后,对制成的芯片进行了功率-电流 ($P-I$) 特性测试。

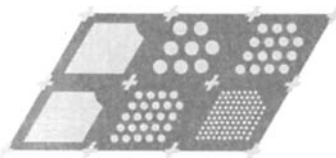


图 4 改进型 3 号掩模版示意图

4 结果分析

4.1 LED 芯片的表面分析

为了能够形象地了解 ITO 薄层通过 $V_{\text{HNO}_3} : V_{\text{HCl}} = 1 : 3$ 配比的腐蚀液湿法腐蚀后的表面效果,进而了解其对 LED 的出光功率改变的影响程度,本实验使用 Olympus 显微镜对腐蚀后所制成的非平面化结构 ITO-GaN 基蓝色 LED 芯片的上表层进行放大,如图 5 所示。

从图 5 中,可以很清楚地看到,湿法腐蚀 ITO 的效果达到了我们的预期目的:在一块材料上,同时获得了底直径为 $2\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 、 $6\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 理想的圆井型非平面化结构,以及没有经过非平面化处理的结构。

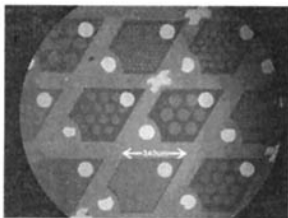


图 5 Olympus 显微镜下拍摄的非平面化及普通的 ITO-GaN 基 LED 的芯片俯视图

4.2 LED 芯片的出光光强随电流的变化情况

对上述 ITO-GaN 基蓝色发光二极管,进行了光强-电流 ($L-I$) 特性测试,结果如图 6 所示,该图充分说明了经过非平面化处理后的 ITO-GaN 基 LED 的出光效率要比未经处理的普通 ITO-GaN 基 LED 高。而且,周期性圆井单元的底直径为 $4\ \mu\text{m}$ 的 ITO-GaN 基 LED 相比其他直径的非平面化 ITO-GaN 基 LED 的出光性能要好。

通过分析数据可知,在 $20\ \text{mA}$ 的正向工作电流下,周期性圆井单元的底直径为 $4\ \mu\text{m}$ 的 ITO-GaN 基 LED 的发光光强最高,为 $42.6\ \text{mcd}$;普通的 ITO-GaN 基 LED 的发光光强最低,为 $31.18\ \text{mcd}$;圆井单元直径为 $4\ \mu\text{m}$ 的 ITO-GaN 基 LED 的光强为普通 ITO-GaN 基 LED 的 1.35 倍。

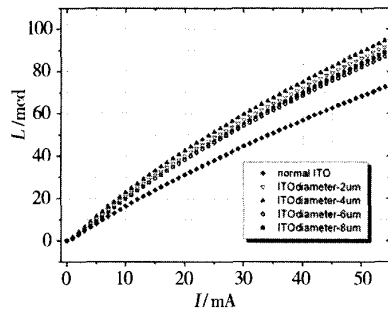


图 6 LED 芯片的光强-电流 ($L-I$) 特性测试曲线

5 结论

通过对 GaN 线性光学分析,研制出非平面化处理的 ITO-GaN 基 LED,达到了提高光输出效率的目的。通过对样品进行光 $L-I$ 测试,可知 $4\ \mu\text{m}$ 的周期性井状单元直径的非平面化处理的 ITO-GaN 基 LED 的出光效率最高,是普通 ITO-GaN 基 LED 的 1.35 倍。

参考文献:

- [1] Smith L L, Davis R F, Kim M J, et al. Microstructure, electrical properties, and thermo stability of Al ohmic contacts to n-GaN [J]. J. Materials Research, 1996, 11(9):2257.
- [2] Wu Y F, Jiang W N, Keller B P, et al. Low resistance ohmic contact to n-GaN with a separate layer method [J]. Solid-State Electron., 1997, 41(2):165-168.
- [3] Lin M E, Ma Z, Huang F Y, et al. Low resistance Ohmic contacts on wide band-gap GaN [J]. Appl. Phys. Lett., 1994, 64(8):1003-1005.
- [4] Wang F D, Feng S W, Lu C, et al. Low-resistance

- Ti/Al/Ti/Au multilayer ohmic contact to n-GaN[J]. J. Appl. Phys., 2001, 89(11):6 214-6 217.
- [5] Pelto C M, Chang Y A. Thermally stable, oxidation resistant capping technology for Ti/Al ohmic contact to n-GaN[J]. J. Appl. Phys., 2002, 92(8):4 283-4 289.
- [6] 陈志忠, 秦志新, 胡晓东, 等. Ti/Al/Ni/Au与n型GaN的欧姆接触研究[J]. 高技术通讯, 2004, 14(2): 36-39.
- [7] Kim T, Yoo M C. Cr/Ni/Au ohmic contacts to the moderately doped p-and n-GaN[J]. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1997, 449:1 061-1 065.
- [8] Mori T, Kozawa T, Ohwaki T, et al. Schottky barriers and contact resistances on p-type GaN[J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 69(23):3 537-3 539.
- [9] Margalith T, Buchinsky O. Indium tin oxide contacts to gallium nitride optoelectronic devices [J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 74(26):3 930-3 932.
- [10] Horng R H, Wu D S, Lien Y C, et al. low-resistance and high transparency Ni/indium tin oxide ohmic contacts to p-type GaN [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 79(18):2 925-2 927.
- [11] Chang C S, Chang S J, Su Y K, et al. InGaN/GaN light-emitting diodes with ITO p-contact layers prepared by RF sputtering [J]. Semicond. Sci. Technol., 2003, 18(4): L21-L23.

作者简介:

翁斌斌(1984—),男,福建省福鼎市人,在读硕士研究生;研究方向为半导体材料的分子束外延生长、半导体光电子器件的结构设计和制作工艺等。

E-mail: kevin@xmu.edu.cn

(上接第768页)

4 结论

对GaN基大功率倒装焊蓝光LED在不同温度、不同老化阶段的I-V特性曲线进行了研究。发现I-V特性曲线6个对应区域——反向偏压区、正向漏电流区、产生-复合电流区、扩散电流区、大注入区和串联电阻区,均偏离理想情形:反向偏压区漏电因深能级隧穿而偏大;正向小偏压下因沿着位错汇聚金属产生漏电流;产生-复合电流区和扩散电流区因多量子阱限制而理想因子偏大;有源区低掺杂使10 A/cm²就形成大注入区;大电流下串联电阻分压形成串联电阻区。扩散电流区的温度系数和肖克莱方程导出的数值最接近,可用来测量结温。老化过程中反向漏电流增加,是因为有了更多被激活的深能级;正向漏电增加且速度变慢,是由于位错逐渐被汇集的金属填满。

参考文献:

- [1] Moll J L. The evolution of the theory of the current-voltage characteristics of p-n junctions[J]. Proc. IRE, 1958, 46(6): 1 076-1 082.
- [2] Cao X A, Teetsov J M, D' Evelyn M P, et al. Electrical characteristics of InGaN/GaN light-emitting diodes grown on GaN and sapphire substrates [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85(1):7-9.
- [3] Hsu C Y, Lan W H, Wu Y C, et al. Effect of thermal annealing of Ni/Au ohmic contact on the leakage current of GaN based light emitting diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 83(12): 2 447-249.
- [4] Shah J M, Li Y L, Gessmann Th, et al. Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors ($n \gg 2, 0$) in AlGaIn/GaN p-n junction diodes[J]. J. Appl. Phys., 2003, 94(4): 2 627-2 630.
- [5] Xi Y, Schubert E F. Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method[J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85(12): 2 163-2 165.
- [6] Huh Chul, Kim S W, Kim H S, et al. Effects of sulfur treatment on electrical and optical performance of InGaN/GaN multiple-quantum-well blue light-emitting diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 78(12): 1 766.
- [7] Kim H S, Kim D J, Park S J, et al. Effect of an oxidized Ni/Au p-contact on the performance of GaN/InGaN multiple quantum well light-emitting diodes[J]. J. Appl. Phys., 2001, 89(2): 1 506-1 508.
- [8] Meneghesso G, Levada S, Zanoni E, et al. Failure modes and mechanisms of DC-aged GaN LEDs [J]. Phys. Status. Solidi. (a). 2002, 194(2): 389-392.
- [9] 林亮, 陈志忠, 陈挺, 等. 白光LED的加速老化特性[J]. 发光学报, 2005, 26(5):617-621.
- [10] Murata S, Nakada H. Adding a heat bypass improves the thermal characteristics of a 50 pm spaced a-beam laser diode array[J]. J. Appl. Phys., 1992, 72(6): 2 514-2 516.

作者简介:

林亮(1983—),男,2004年毕业于北京大学物理学院,获学士学位,现为硕士研究生,主要从事GaN基大功率LED的热产生和作用机理的研究。

E-mail: linliang04@pku.edu.cn

非平面化型ITO氮化镓基蓝光发光二极管

作者: 翁斌斌, 秦丽菲, 黄瑾, 尹以安, 刘宝林, 张保平, WENG Bin-bin, QIN Li-fei, HUANG Jin, YIN Yian, LIU Bao-lin, ZHANG Bao-ping
作者单位: 翁斌斌, 秦丽菲, 黄瑾, 尹以安, WENG Bin-bin, QIN Li-fei, HUANG Jin, YIN Yian(厦门大学, 物理系, 福建, 厦门, 361005), 刘宝林, 张保平, LIU Bao-lin, ZHANG Bao-ping(厦门大学, 物理系, 福建, 厦门, 361005; 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建, 厦门, 361005)
刊名: 半导体光电 **ISTIC PKU**
英文刊名: SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS
年, 卷(期): 2007, 28(6)

参考文献(11条)

1. Wu Y F;Jiang W N;Keller B P Low resistance ohmic contact to n-GaN with a separate layer method 1997(02)
2. Smith L L;Davis R F;Kim M J Microstructure, electrical properties, and thermo stability of Al ohmic contacts to n-GaN 1996(09)
3. Chang C S;Chang S J;Su Y K InGaN/GaN light-emitting diodes with ITO p-contact layers prepared by RF sputtering[外文期刊] 2003(04)
4. Horng R H;Wuu D S;Lien Y C low-resistance and high transparency Ni/indium tin oxide ohmic contacts to p-type GaN[外文期刊] 2001(18)
5. Margalith T;Buchinsky O Indium tin oxide contacts to gallium nitride optoelectronic devices[外文期刊] 1999(26)
6. Mori T;Kozawa T;Ohwaki T Schottky barriers and contact resistances on p-type GaN 1996(23)
7. Kim T;Yoo M C Cr/Ni/Au ohmic contacts to the moderately doped p-and n-GaN 1997
8. 陈志忠;秦志新;胡晓东 Ti/Al/Ni/Au与n型GaN的欧姆接触研究[期刊论文]-高技术通讯 2004(02)
9. Pelto C M;Chang Y A Thermally stable, oxidation resistant capping technology for Ti/Al ohmic contact to n-GaN[外文期刊] 2002(08)
10. Wang F D;Feng S W;Lu C Low-resistance Ti/Al/Ti/Au multilayer ohmic contact to n-GaN[外文期刊] 2001(11)
11. Lin M E;Ma Z;Huang F Y Low resistance Ohmic contacts on wide band-gap GaN 1994(08)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_bdtgd200706006.aspx