

文章编号: 1000-7032(2011)10-1069-05

p 层厚度对 Si 基 GaN 垂直结构 LED 出光的影响

陶喜霞, 王 立, 刘彦松, 王光绪, 江风益*

(南昌大学 国家硅基 LED 工程技术研究中心, 江西 南昌 330047)

摘要: 利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)法在 Si 衬底上生长了一系列具有不同 p 层厚度 d 的 InGaN/GaN 蓝光 LED 薄膜并制备成垂直结构发光二极管(VLEDs), 研究了 p 层厚度即 p 面金属反射镜与量子阱层的间距对 LED 出光效率的影响, 并采用 F-P 干涉模型进行了理论分析。结果显示, 光提取效率受 d 影响很大, 随 d 的增加呈现类似阻尼振动的变化趋势, 分别在 $0.73\lambda_n$ 处和 $1.01\lambda_n$ 处取得第一个极大值和极小值, 且前者是后者两倍多。因此优化 p 层厚度可以有效提高 LED 的出光效率。

关键词: LED; GaN; 垂直结构; 出光; p 层厚度

中图分类号: TN312+.8

PACS: 85.60.Jb

PACC: 8560

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20113210.1069

1 引 言

目前, 商业化的 InGaN/GaN 基 LED 主要有同侧结构和垂直结构两大类。传统的同侧结构 LED 存在电流拥挤、电压高、散热困难等缺点^[1], 而垂直结构 LED 则可以有效地解决这些问题^[2-4], 成为大功率 LED 的发展趋势^[5]。制作垂直结构 LED 需要去掉原生长衬底, 在这方面 Si 衬底比蓝宝石衬底更有优势^[6]。去掉蓝宝石衬底所采用的激光剥离技术至今仍存在技术难题^[7], 而 Si 衬底则可以通过成熟的湿法腐蚀技术剥离。另外, Si 材料还具有成本低、尺寸大、易加工等优点^[8]。因此, 研究 Si 衬底 GaN 基垂直结构 LED 具有现实意义。

我们采用“Si 衬底垂直结构蓝光 LED + 荧光粉”技术制造的白光 LED 已达到 100 lm/W。由于 Si 衬底对光的吸收作用, 采用 p 面反射镜工艺, 即在 LED 薄膜的 p 面上蒸发一层足够厚的高反射率的金属层作为 p 型欧姆接触和反射镜可以使大部分射向 p 面的光被反射出去, 从而避免了硅衬底的吸收。当金属反射镜和量子阱层的间距与波长相当时, 由反射镜所带来的干涉效应对出

光效率和出光模式有很大的影响。同时, 量子阱层和金属反射镜之间为 p 型 GaN, 优化该 p 层厚度可以有效提高 LED 的出光效率。本文对 p 层厚度 d 与 Si 衬底垂直结构 GaN 基 LED 出光效率的关系进行了研究, 给出了垂直结构 LED 的出光模型。这对深入了解 LED 芯片内的光学传播过程以及 LED 芯片的优化设计具有重要的指导意义。

2 实 验

LED 薄膜由 Thomas Swan CCS 低压 MOCVD 系统在 Si(111) 衬底上生长, 包括低温 AlN 缓冲层、n-GaN 层、量子阱层(QW)以及不同厚度的 p-GaN 层, 具体生长方法已有报道^[9]。薄膜生长后, 垂直结构 LED 按下列步骤制作^[2-3](芯片结构如图 1 所示): 首先, 在 p-GaN 的表面蒸镀一层 Pt 作为 p 型欧姆接触和反射镜, 然后采用键合(Bonding)的方法将 LED 薄膜转移至新的基板上, 再利用化学腐蚀的方法剥离掉原生长衬底, 随后在 N 面上制作 n 电极, 最后进行划片, 并采用环氧树脂 $\Phi 5$ 圆头封装制作成为 LED 器件。芯片的 p-GaN 厚度由 TEM 测量得到。芯片大小为

收稿日期: 2011-06-28; 修订日期: 2011-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51072076, 61040060); 国家高技术研究发展“863”计划(2009AA03A199)项目; 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRTO730)资助的项目

作者简介: 陶喜霞(1985-), 女, 山东临清人, 主要从事 GaN 基发光材料与器件的研究。

E-mail: taohaixin@163.com

*: 通讯联系人; E-mail: jiangfy@ncu.edu.cn

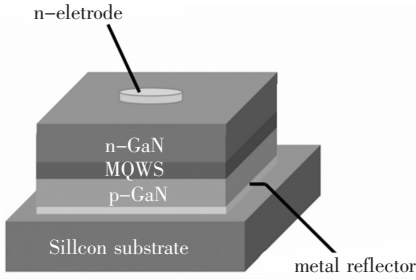


图 1 Si 衬底 GaN 基 垂直结构 LED 结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of GaN-based VLED on Si(111)

200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$, 薄膜厚度约为 4 μm , 主波长为 467 nm。除了改变各样品的 p-GaN 厚度之外, 其余生长条件与芯片制造工艺都完全相同, 因此可以认为各样品的内量子效率是相同的, 其外量子效率的高低仅取决于光提取效率。芯片封装前后分别测试各样品的光强和光功率, 光强由 Weimin 公司生产的 LED-617 型半自动晶片点测机测得, 光功率由 Instrument system CAS 140 CT 测试系统测得。由于采用环氧树脂 $\Phi 5$ 的方式封装, 环氧树脂与外界界面为圆面, 所以可以认为所有射入环氧树脂的光线都能够出射, 即封装过程对各样品的光功率没有影响。

3 结果与讨论

图 2 为光提取效率随量子阱层和反射镜的间距 d 的变化曲线, 其中实心五角星代表实验结果, 曲线代表根据 F-P 干涉腔理论模型计算的结果。

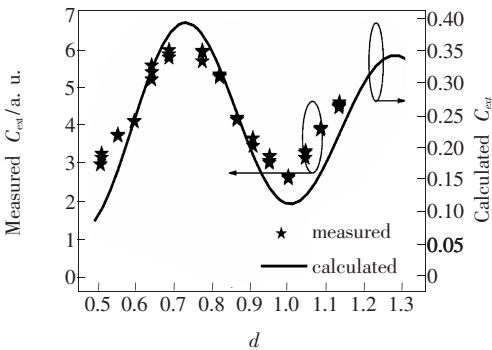


图 2 环氧封装芯片的光提取效率与量子阱层和反射镜间距 d 的关系曲线

Fig. 2 The measured and calculated extraction efficiency of epoxy packaged InGaN/GaN VLEDs against the distance (d) between the active region and the reflector. It can be seen that the maximum in extraction efficiency which is located at $0.73\lambda_n$ is more than two times the neighboring minimum locate at $1.01\lambda_n$.

d 由 λ_n 的倍数表示, λ_n 为光在折射率为 n 的芯片内部传播时的波长 (本实验所采用的垂直结构蓝光 LED 的 λ_n 约为 194 nm)。从图中可以看出: LED 的光提取效率随 d 的增加先增大再减小再增大随后又减少 (类似于阻尼振动随时间的变化规律), 光提取效率分别在 $0.73\lambda_n$ 处和 $1.01\lambda_n$ 处取得第一个极大值和第一个极小值, 且前者是后者 2 倍多。这说明 d 对光提取效率有很大的影响, 优化 d 可以有效的提高垂直结构 LED 的出光效率。

上述光提取效率随 d 的变化关系可由 F-P 干涉模型来解释。垂直结构 LED 可以被看作一个由 air/GaN 界面或 epoxy/GaN 界面和 p 面的金属反射镜构成 F-P 干涉腔^[10], 具体模型如图 3 所示。量子阱层作为光源位于 F-P 干涉腔中, 其与 p 面金属反射镜的距离 d 约为 100 ~ 200 nm, 与芯片的 λ_n 相当。而 F-P 腔的腔长 L 为整个 LED 薄膜的厚度 (约 4 μm), 远远大于 λ_n 。

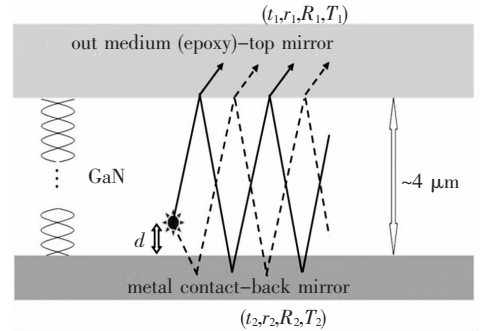


图 3 垂直结构 LED 对应的光学模型-F-P 干涉腔

Fig. 3 The optical model of InGaN/GaN VLEDs -F-P cavity, which is formed by the GaN-epoxy interface and the metal mirror-GaN interface

如图 3 所示, 在出光面的任意方向上都有两束光, 一束光由量子阱层直接向上出射, 另一束则是经由 p 面反射镜反射后出射。这两束光又会在 F-P 腔中多次反射, 最终形成两个系列的光。每个系列内的多束光会相互干涉, 同时这两个系列之间也会相互干涉。根据 F-P 干涉腔模型^[11], LED 上方任意 θ 方向上的光强为:

$$E_{\text{up}}^2 = E_{\theta_0}^2 \times T_1 \times (1 - r_2 e^{2i\beta' + i\beta})^2 \times (1 - r_1 r_2 e^{2i\beta})^{-2},$$

其中,

$$\phi' = 2\pi n d \cos\theta / \lambda,$$

$$\phi = 2\pi n L \cos\theta / \lambda, \quad (1)$$

其中 ϕ' 为不同系列光束间的光程差, β 为金属反射镜上的反射相移, ϕ 为 F-P 腔的周期相移 (the

round phase shift of F-P cavity), $E_{\theta_0}^2$ 代表无 F-P 腔时 θ 方向上光强^[12]。芯片的出光功率 P 为全反射临界角 ($\sin\theta_c = n_{\text{ambient}}/n_{\text{GaN}}$) 内光强的总和:

$$P = \int_0^{\theta_c} E_{\text{up}}^2 \times 2\pi\sin\theta d\theta, \quad (2)$$

其中 $2\pi\sin\theta d\theta$ 为 $d\theta$ 所对应的立体角。由于 $L \gg \lambda_n, \phi \gg 2\pi$, 即使在很小的 θ 范围内,

$$\langle 1 - r_1 r_2 e^{2i\phi} \rangle_{\theta} = 1, \quad (3)$$

因此, 式(1)和式(2)可分别近似为:

$$E_{\text{up}}^2 = E_{\theta_0}^2 \times T_1 \times (1 - r_2 e^{2i\phi' + \beta})^2, \quad (4)$$

$$P = \int_0^{\theta_c} E_{\theta_0}^2 \times T_1 \times (1 - r_2 e^{2i\phi' + \beta}) \times 2\pi\sin\theta d\theta, \quad (5)$$

本实验所采用的垂直结构 LED 为平面薄膜型芯片, 其量子阱层发出的光是各项异性的^[13]:

$$E_{\theta_0}^2 = (1 + \cos\theta) \times G/5\pi, \quad (6)$$

其中 G 代表光源的总功率。由式(5)和式(6)可得到垂直结构 InGaN/GaN LED 的光提取效率为:

$$C_{\text{ext}} = \frac{\text{output power}}{\text{Total provide power}} = \frac{P}{G} =$$

$$\frac{2}{5} \int_0^{\theta_c} T_1 \times (1 + \cos\theta) \times (1 - r_2 e^{i(2kd\cos\theta + \beta)})^2 \times \sin\theta d\theta, \quad (7)$$

根据上述 F-P 干涉腔模型计算的结果, 与实验结果相吻合。但计算所得曲线的振幅比较大, 这是因为在理论计算时忽略了从薄膜侧面出射的光以及 LED 表面的非故意微粗化的缘故。

图 4 为实验所得到的 LED 芯片的光功率和垂直方向的光强随 d 的变化曲线。光强曲线和光功率曲线都是对实验结果进行高斯多峰拟合得到的。如图所示, 光强和光功率随着 d 的变化曲线呈现几乎相同的趋势, 但光强曲线比光功率曲线左移了约 15 nm, 且随着 d 增大光强曲线相对左移的程度有所增加。这是因为光强仅与某一方向上的光束有关(本文测量的是垂直方向的光强)。根据 F-P 干涉腔模型, 垂直方向 ($\theta = 0$) 的光强满足下式:

$$E_{\text{up}}^2(d_E) \propto \cos(2\pi n d_E / \lambda + \beta), \quad (8)$$

而芯片的光功率不但与垂直方向的光束有关, 而且是单位时间内出光角 ($0, \theta_c$) 内所有方向上光的集合:

$$P = \int_0^{\theta_c} E_{\text{up}}^2 \times d\Omega, \quad (9)$$

由于金属反射镜上的反射相移 β 与 θ 的关系非常

复杂, 此积分的计算非常困难, 本文没有对此进行精确计算, 而是将其表示为某一方向的光强与出光角的乘积:

$$P(d_p) = E_{\text{up}}^2(\theta) \times \Omega_c \propto \frac{1}{\cos(2\pi n d_p \cos\theta / \lambda + \beta)} \quad 0 < \theta < \theta_c, \quad (10)$$

由(8)和(10)两式可知, 芯片的光功率和垂直方向的光强满足下式:

$$P(d_E / \cos\theta) \propto E_{\text{up}}^2(d_E), \quad (11)$$

由式(11)可知, 光功率 $P(d_p)$ 和垂直方向的光强 $E^2(d_E)$ 随 d 的变化趋势几乎相同, 但 $E^2(d_E)$ 曲线比 $P(d_p)$ 曲线要左移一段距离 ($d_E / \cos\theta - d_E, 0 < \theta < \theta_c, \theta_c \approx 39^\circ$), 且随着 d_E 增大, 光强左移的程度会增加。如果 $d_E = 120 \text{ nm}$, 则 $0 < d_E / \cos\theta - d_E < 34.4 \text{ nm}$ 。本文实验结果在其范围内, 与上述估算结果相符。

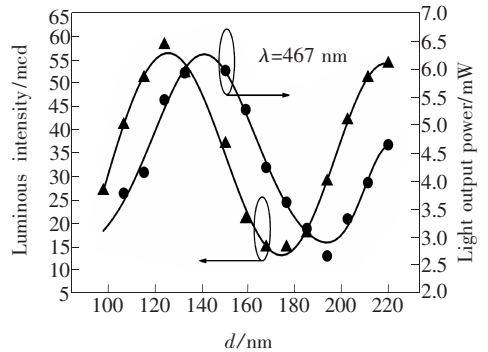


图 4 垂直方向的光强和光功率随量子阱层和反射镜的间距 d 的变化关系

Fig. 4 The measured luminous intensity and light output power of InGaN/GaN VLEDs against the distance d between the active region and the reflector

4 结 论

研究了 p 层厚度 d 对垂直结构发光二极管 (VLEDs) 光提取效率的影响, 给出了 VLEDs 的出光模型为 F-P 干涉模型, 并在此模型的基础上对 VLEDs 的光提取效率进行了理论分析。结果表明, 垂直结构 LED 的光提取效率受到 p 层厚度的很大的影响, 随 d 的增加, 呈现类阻尼振动随时间变化的规律。这是因为 VLEDs 的 p 层厚度 d 非常小, 与芯片的发光波长相当, 所以 d 的大小对光在芯片内的干涉有很大的影响, 进而影响了芯片光强分布和出光效率。因此优化 p 层厚度, 可以有效提高 VLEDs 的出光效率。但是, 对 p 层厚度

的优化,不能仅根据垂直方向光强来判断,因为垂直方向光强与 p 层厚度的关系曲线比光功率与 p 层厚度的关系曲线左移约 15 nm。也就是说,芯

片垂直方向的光强最大时,其光功率并不是最大的。本文的研究为高效 LED 的研发提供了理论和实际支持。

参 考 文 献:

- [1] Guo X, Schubert E F. Current crowding and optical saturation effects in GaInN/GaN light-emitting diodes grown on insulating substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(21):3337-3339.
- [2] Xiong C B, Jiang F Y, Fang W Q, *et al.* Different properties of GaN-based LED grown on Si(111) and transferred onto new substrate [J]. *Sci. China, Ser. E.*, 2006, **49**(3):313-321.
- [3] Xiong C, Jiang F, Fang W, *et al.* The characteristics of GaN-based blue LED on Si substrate [J]. *J. Lumin.*, 2007, **122-123**:185-187.
- [4] Xiao Y P, Mo C L, Qiu C, *et al.* The aging characteristics of GaN-based blue LED on Si substrate [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, **31**(3):364-368 (in Chinese).
- [5] Shchekin O B, Epler J E, Trottier T A, *et al.* High performance thin-film flip-chip InGaN-GaN light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(7):071109-1-3.
- [6] Xiong Y J, Zhang M, Xiong C B, *et al.* Investigation of strain of GaN light-emitting diode films transferred to metal substrate from Si (111) [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, **31**(4):531-537 (in Chinese).
- [7] Chen W H, Kang X N, Hu X D, *et al.* Study of the structural damage in the (0001) GaN epilayer processed by laser lift-off techniques [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(12):121114-1-3.
- [8] Qiu H, Liu J L, Wang L, *et al.* Effects of SiON passivation layer on reliability of GaN based green LED on silicon substrate [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, **32**(6) 603-607 (in Chinese).
- [9] Mo C L, Fang W Q, Pu Y, *et al.* Growth and characterization of InGaN blue LED structure on Si(111) by MOCVD [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **285**(3):312-317.
- [10] Schubert E F. *Light-Emitting Diodes* [M]. New York: Cambridge University Press, 2006:78.
- [11] Benisty H, De Neve H, Weisbuch C. Impact of planar microcavity effects on light extraction-Part I: Basic concepts and analytical trends [J]. *IEEE J. Quantum Elect.*, 1998, **34**(9):1612-1631.
- [12] Bennett J M. Precise method for measuring the absolute phase change on reflection [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(5):612-622.
- [13] Krames M R, Shchekin O B, Mueller-Mach R, *et al.* Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting [J]. *J. Disp. Technol.*, 2007, **3**(2):160-175.

Effects of The Thickness of p-type GaN on Light Extraction of GaN Based Vertical Light Emitting Diodes on Silicon Substrate

TAO Xi-xia, WANG Li, LIU Yan-Song, WANG Guang-xu, JIANG Feng-yi

(National Engineering Technology Research Center for LED on Silicon Substrate, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract: The relationship between the thickness d of p-type GaN and light extraction efficiency of GaN based vertical light emitting diodes (VLEDs) was described in this work. The VLEDs were grown on silicon by metal organic chemical vapour deposition (MOCVD). A series of VLEDs were fabricated with varied thickness of p-type GaN. It showed that the thickness d was in the order of wavelength and it had a significant influence on extraction efficiency due to interferences. The maximum in extraction efficiency was two times more than the neighboring minimum, which were located at $0.73\lambda_n$ and $1.01\lambda_n$, respectively. Therefore, the extraction efficiency of VLEDs can be enhanced by optimizing the thickness of p-type GaN.

Key words: LED; GaN; vertical structure; light extraction; thickness of p-type GaN

CLC number: TN312⁺.8

PACS: 85.60.Jb

PACC: 8560

Document code: A

DOI: 10.3788/fgxb20113210.1069

Received date: 2011-06-28

欢迎订阅《光机电信息》(月刊)

本刊由中国光学学会、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。

本刊征集光学和应用光学、光电子学和激光、微纳科技、材料科学、电磁学和电子学、机械、信息科学和技术等几大领域如下形式的文章:

1. 研究信息快报

本栏目主要报道最新研究成果、阶段新结果、片段新结果的介绍或说明,不要求是纯学术论文。目的是为那些尚未能形成正式研究论文,但希望把已有的最新研究成果、阶段或片段新结果抢先发表的科研工作者提供一个平台,保护广大科研人员的知识产权。主要内容包括研究背景简介、研究过程或实验过程简述、观察到的结果、数据及相关信息说明、评论等,附图表数据等,也可附参考文献(一般不要求)。本栏目发表的论文数据不影响在正式发表论文时使用。

本栏目出版周期:收稿日期为每月 5 日之后、25 日之前收到,下月即出版发表。如为当月 5 号之前收到,当月发表。

2. 研究快报

本栏目主要征集研究新成果的快速报道,要求同其他刊物的研究快报。要求具有如下内容:摘要、关键词、研究背景(引言)、研究过程或实验过程、研究结果、参考文献。

3. 研究评论

对当前最新研究结果或研究动态的评论和展望,或基于他人研究结果的二次开发或更深层次的研究结果报道。

4. 综述文章

(1) 综述本领域或本学科的研究成果和进展、发展动态和趋势;(2) 作者本研究群体的研究工作综述。

5. 研究论文

征集研究新结果的学术论文。

6. 应用开发类论文

接受各类大学、研究所、企业自主研发的新产品性能报道和新应用报道;新型器件在系统应用结果方面的报道等。这类论文是反映企业研发创新和对自身产品的再认识的能力、并能够让用户更好地了解产品性能、拓展应用范围的手段。本栏目论文具有产品推广广告作用。

7. 成果信息和研发信息

本栏目主要为大学、研究所等研发部门发布研究成果信息或项目工程研发信息;企业需要开发或攻关的项目信息等。目的是为研发部门和企业之间架起沟通桥梁。

8. 各类形式的企业宣传、广告,具体来电来函商谈,本刊做各类宣传、广告,费用低廉。

“好酒也怕巷子深”——您的产品多一份广告就会多一份收益,低廉的费用可以节约销售人员的出差费用,而效费比高,广告范围广。

在我们这里刊登的广告哪怕只为您带来一个客户——您就收回了广告成本,同时也给您带来了久远的影响和效益。纸版的广告+电子版的广告——更值得客户信赖,更能为您培养潜在的中、远期客户。

网上投稿: E-mail: gjdxxw@gmail.com, xxfw@ciomp.ac.cn

学报地址: 长春市东南湖大路 3888 号 邮编: 130033