

文章编号:1004-4213(2010)11-1956-5

提高 LED 光提取效率的研究*

熊伟平, 范广涵[†], 李琦

(华南师范大学 光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

摘要:通过模拟计算的方法分析了倒装结构 LED 中衬底材料折射率及厚度对光提取效率的影响,并在此基础上提出一种新的菱形结构.结果表明:该菱形结构可大幅度提高 LED 光提取效率,在使用 Si、蓝宝石、SiC 作为芯片衬底材料时,菱形结构的光提取效率分别提高到传统方形结构的 1.51、2.03、3.65 倍.

关键词:光提取效率;倒装结构;菱形结构;衬底
中图分类号: TN312 **文献标识码:** A

doi:10.3788/gzxb20103911.1956

0 引言

提高 LED 发光效率的两个基本出发点是提高其内量子效率和外量子效率.其中外量子效率为内量子效率与表面光提取效率之乘积,即: $\eta = \eta_i \times \eta_e$ 其中 η_i 为内量子效率, η_e 为光提取效率.由于工艺进步及结构优化,内量子效率已达到相当高的水平,如 GaN 基蓝光 LED 已达到 80% 以上^[1-2],显然在内量子效率上已没有太大的提升空间.外量子效率低的主要原因在于 LED 光提取效率很低,提升光提取效率将是未来提高 LED 外量子效率的主要途径.这在很大程度上要求设计新的芯片结构来改善出光.

对于给定内量子效率的 LED,光提取效率为逃逸到空气中的光子能量与有源层发出的光子的能量之比.光提取效率是 LED 的一个重要参量,然而对于 GaN 基 LED,所使用的 GaN 材料的折射率为 2.4,对应于临界全反射角 $\theta_c = 24.5^\circ$,而超过该角度入射的光子将会被反射回去,继续在 GaN 内传播,最终被完全吸收,光提取效率还有很大的提升空间.

目前已有许多方法用于提高 LED 光提取效率,如光子晶体^[3]、表面粗化^[4]、倒装结构^[5-6]以及特殊形状芯片^[7]等.近年来人们对光子晶体特性的研究^[8-10]为其应用于 LED 提供了基础.本文首先分析了 LED 倒装结构中衬底折射率及厚度对光提取效率的影响,并在此基础上提出一种菱形结构,通过模拟计算表明该结构能大幅的提高光提取效率.

1 GaN 基 LED 倒装结构

目前, GaN 基 LED 广泛采用蓝宝石作为衬底,由于蓝宝石为绝缘材料,因而在制备电极时必须采用同侧横向结构,对于传统正装结构,电极被制备在出光表面,它将吸收一部分光子;并且,电极引线也会阻挡一部分光子出射.此外,蓝宝石材料热导率很低,正装结构不利于芯片散热.针对这些问题人们发展了倒装结构,将 LED 倒装焊接在 Si 基板上,光子从蓝宝石表面出射,这就避免了电极对光子的吸收以及电极引线的阻挡;同时,芯片工作产生的热量直接经电极传递至 Si 基板,由于 Si 是热的良导体,可以将热量及时传递出去.更重要的是,在倒装结构中,蓝宝石衬底厚度通常是外延结构的几十倍,可作为光子出射的窗口,增加了侧面出光,提高了光提取效率.

图 1 为倒装结构示意图.光从蓝宝石衬底出射,由于蓝宝石与外延材料 GaN 折射率差较之空气与 GaN 折射率差小的多,因而有更多的光线能进入蓝宝石衬底.那么就需要将这部分光子有效的提取出来.

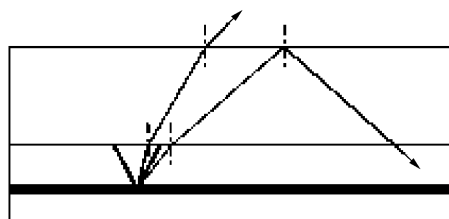


图 1 倒装结构光路分析
Fig. 1 Optical path analysis in the flip-chip structure
在 LED 背面出光的光路中的菲涅尔关系为

$$n_1 \times \sin \theta_1 = n_2 \times \sin \theta_2$$

式中 n_1 为 GaN 的折射率, n_2 为蓝宝石折射率, $n_3 =$

* 省部产学研引导项目-大功率白光 LED 新机构 (2009B090300338) 和粤港关键领域重点突破项目-发光二极管(LED)外延片材料和生长方法(2007AD10501008)资助

[†] Tel: 029-88204271

Email: gfan@senu.edu.cn

收稿日期: 2009-11-09

修回日期: 2010-03-30

1 为空气折射率. 光子从 GaN 直接入射到空气的全反射临界角为 24.5° , 入射到蓝宝石时为 47° . 然而当光线以大于 24.5° 而小于 47° 的入射角入射到蓝宝石时, 式中 $n_1 \times \sin \theta_1 = n_2 \times \sin \theta_2$ 将大于 1, 也就是说这部分光虽然能够进入蓝宝石, 但不能透射到空气中, 最终反射回外延层被吸收殆尽.

分析可知, 倒装结构并没有增大 LED 出光锥角, 只是避免了正装结构中电极对光子的吸收以及增加了衬底侧面出光. 部分文献称倒装结构由于有蓝宝石作媒介, 从而增大了出光锥角, 显然是不符合事实的.

2 模拟分析与设计

2.1 理论模型与模拟参量

本文采用专业的光学设计软件 Tracepro 进行模拟计算. Tracepro 广泛应用于光学计算与器件仿真特别是 LED 仿真, 是基于蒙特卡罗方法进行非序列性光线追踪, 在所定义的发光面上随机选取一点发射光线, 该光线的方向和能量也是随机的. 追迹的光线在模型内严格按照几何光学和波动光学的规律传播. 在传播过程中, 光子以一定几率被吸收. 当一条光线的能量减少到一个很小的值时, Tracepro 将进入下一条光线的追迹. 由于计算机运算能力的飞速发展, 允许追迹几万甚至几百万个光子, 本文的模拟追迹五万条光线.

首先必须根据实际芯片结构建立芯片仿真模型, 芯片尺寸为 $350 \times 350 \mu\text{m}^2$, 依次建立 $3 \mu\text{m}$ 厚的 n-GaN, $5 \times 23 \text{ nm}$ 厚有源层, $0.2 \mu\text{m}$ 厚 p-GaN. 由于这里旨在计算芯片光提取效率, 而不考虑内量子效率和光子实际产生过程, 因此有源层用一个上下表面为发光面的长方体代替, 其发射方向是各向同性的^[8]. 总发光功率为 1 W, 波长为 470 nm. 计算得到的出光效率即为光提取效率.

建立好仿真模型后对各层材料及表面设置属性表 1.

表 1 材料属性
Table 1 Material properties

Materials	Refractive index	Absorption/ mm^{-1}
n-GaN	2.42	1.7
Active layer	2.54	125
P-GaN	2.45	1.7

设置好各层材料属性, 软件将根据菲涅尔公式自动计算各层材料界面在不同入射角时的光反射率和透射率. 此外, 在倒装结构中, 通常其 p 型电流扩散层兼具反射作用, 设定其反射率为 95% ^[1], 其余将被吸收.

2.2 传统倒装结构光提取效率探讨

目前 GaN 基 LED 主要采用蓝宝石、Si、SiC 作为衬底材料, 折射率分别为 1.78、1.5、2.47. 图 2 表明了三种材料的折射率及厚度对提取效率的影响. 从图中看到, 三种衬底材料折射率虽然存在较大差异, 但光提取效率差别甚微, 表明衬底折射率对光提取效率几乎无影响, 由此可以证明倒装结构不会因为衬底作为出光媒介而增大出光锥角, 这与本文前面的分析相论证.

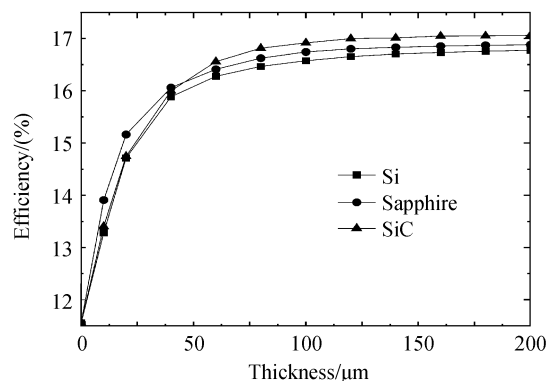


图 2 倒装 LED 光提取效率随衬底厚度的变化
Fig. 2 Extraction efficiency of flip-chip LED versus thickness

在倒装结构中衬底可作为窗口层而提高光提取效率, 因此衬底厚度必然对提取效率有一定影响. 图 2 表明, 倒装 LED 光提取效率随衬底厚度增大而迅速增加. 随着厚度不断增大, 提取效率增加变得缓慢. 如图 3, 阴影部分是 LED 侧面出光锥角, 该锥角内只有投射到侧面的光能够出射, 当衬底厚度较薄时, 随着厚度不断变大, 锥角内越来越多的光线投射到侧面, 因而光提取效率增加, 但当厚度进一步变大, 锥角内的光线全部投射到侧面, 提取效率相应的不再增加.

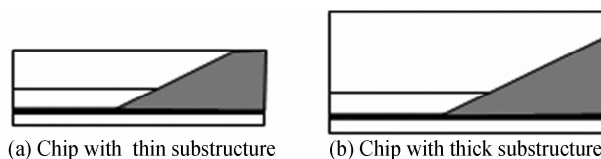


图 3 提取效率随衬底厚度变化分析
Fig. 3 Extraction efficiency with the thickness changes

2.3 菱形结构的提出与探讨

本文分析表明, 倒装结构未能增大 LED 出光锥角, 只是增加侧面出光, 对光提取效率的提高极为有限, 且制作工艺复杂, 因而实际应用中还是以正装结构为主. 实验及理论分析表明^[7,11], 传统方形结构使光子在一个平行腔内被限制, 通过改变这种方形结构的形状能得到更高的提取效率. 图 4 是一种倒金字塔形结构, 最早在 1999 年被提出^[10], 它是在透明衬底 LED 基础上的再次加工. 将 bonding 后的 LED

晶片倒置,切去四个方向的下角,侧面与垂直方向夹角为 35° . 倾斜侧面能将在其上不能出射的光全反射至上表面再出射,同样的,上表面也能将出射锥角外的光反射至倾斜侧面再出射,能大幅度地提高提取效率. 该结构最早是应用于红光 LED, 本文将其应用于 GaN 基蓝光 LED, 并计算光提取效率. 以 $200\ \mu\text{m}$ 厚度的 SiC 衬底为例, 光提取效率达到了 70%. 然而该结构在制作时需切除四个下角, 浪费了大量外延材料, 且制作工艺复杂, 需进行多次切割, 因而单位成本所得到的光通量并未有大幅增加.

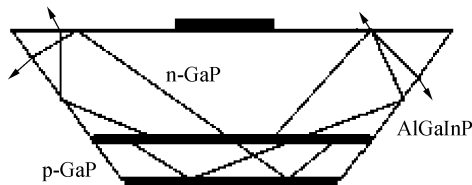


图 4 倒金字塔形芯片

Fig. 4 Truncated-inverted-pyramid LED

为此, 本文提出一种新的菱形结构芯片, 如图 5. 四个侧面同样被设计成斜面, 但相对的两个侧面相互平行, 这样就避免了材料的浪费. 通过计算发现, 菱形结构可以有效地提取出进入衬底的光子, 也就是说外延材料相对空气的出光锥角以外的光也有机会出射到空气中, 因此其光提取效率将会有大幅提高.

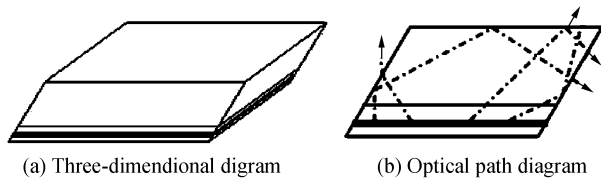


图 5 菱形结构

Fig. 5 The Diamond-shaped structure

分析图 5(b) 的光路示意图, 经衬底上表面全反射回来的光到达右侧面时可以透射, 这与图 3(b) 的情形相同, 但是经上表面全反射到左侧面的光不能透射, 因而菱形结构的光提取效率相对于倒金字塔形结构会有所下降, 计算结果也表明了这一点, 但因其不会浪费外延材料, 所以单位成本得到的光通量实际是要更大些.

同样分析衬底折射率及厚度对菱形结构光提取效率的影响, 如图 6. 此外, 分析侧面倾斜角度(侧面与竖直面夹角)的影响, 如图 7.

图 6 显示了侧面倾斜角度为 30° 时衬底厚度对光提取效率的影响. 随着衬底厚度的增大, 光提取效率迅速增加, 然后变得缓慢, 这与传统倒装结构的情形相类似, 但提取效率的大小相比传统倒装结构有了明显增加, 衬底厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 时, 对应 Si、蓝宝石、SiC 三种衬底材料, 提取效率分别为 25.25%、

34.15%、62.27%, 分别提高到传统方形结构的 1.51、2.02、3.65 倍.

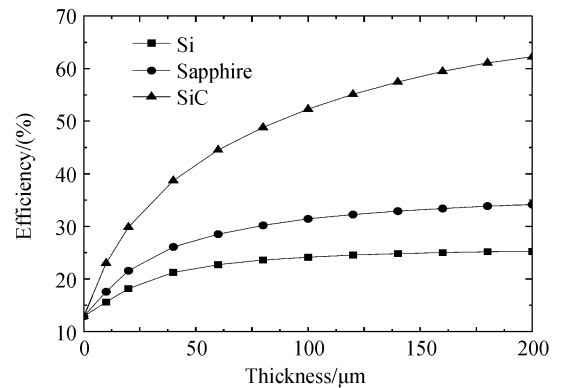


图 6 衬底厚度对菱形结构光提取效率的影响

Fig. 6 Impact of thickness on the extraction efficiency of diamond-shaped structure

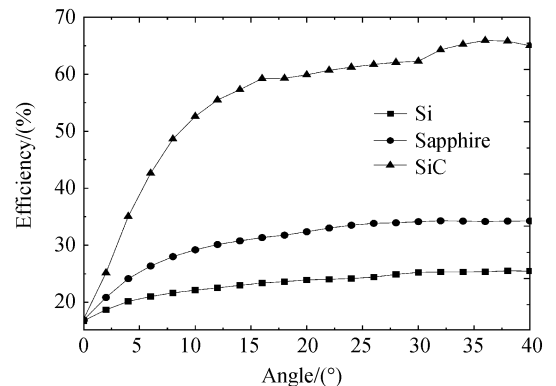


图 7 侧面倾斜角度对菱形结构光提取效率的影响

Fig. 7 Impact of tilt angle on the extraction efficiency of diamond-shaped structure

此外, 与图 3 所不同的是, 对应三种不同折射率的衬底材料, 提取效率有着很大的差别, 这表明菱形结构突破了全反射效应的限制, 并且出光锥角随衬底折射率变大而增大. 此时, 光从外延材料入射到衬底的多少成为影响芯片光提取效率的主要因素, 衬底材料折射率越大, 进入衬底的光子就越多, 提取效率越高. 其中 SiC 的折射率与外延材料相当, 光子能全部进入衬底, 因而提取效率较之其他两种材料有更明显的增加.

值得注意的是, 衬底折射率不宜过大, 因为衬底折射率远超过外延材料时, 有源层产生的光子能全部透射入衬底, 此时衬底表面的出光锥角(衬底相对空气)将成为制约提取效率的主要因素. 菱形结构的作用就在于通过表面的全反射不断改变光再次入射到表面时的入射角, 则光子在经过一次或几次全反射后以一定几率出射, 如果衬底折射率过大导致表面出光锥角变小, 这种几率必然也要变小; 另外, 衬底折射率越大, 其与外延材料的折射率差就越大, 在两者的界面处的反射率变大, 相应的透射率变小, 进入衬底的光子将减少, 对芯片光提取效率造成不利

影响. 因而衬底折射率应与外延材料相当为宜. 表 2 的计算结果证实了这一点, 光提取效率在 GaN 材料的折射率附近达到最大值, 随着折射率继续增大, 提取效率将逐渐降低.

表 2 光提取效率随衬底折射率变化

	Thickness = 200 μm Tilt angle = 30°					
Refractive index	1.5	1.78	2.40	2.47	3.0	3.5
Efficiency/%	25.25	34.15	61.08	62.08	45.07	31.47

图 7 表明了衬底厚度为 200 μm 时侧面倾斜角度对提取效率同样有着重要影响, 提取效率随倾斜角度的增大而增加. 可以看到, 当倾斜角度增大到一定程度后, 提取效率的增加变得缓慢. 对于图 8(a) 的传统方形结构, 只有半个出光锥角内的光子可以通过侧面出射; 而在图 8(b) 中, 随侧面倾斜角度增大, 左侧面将使整个出光锥角内的光子都可以透射, 右侧面更是能将投射到其上的光子或直接出射或全反射至上表面再出射, 因而提取效率迅速增大; 但在图 8(c) 中, 随着侧面倾斜角度进一步增大, 一整个出光锥角内的光子从左侧面直接透射, 但出光锥角下方将有一部分光子被全反射回外延层被吸收, 而右侧面由于倾斜角度增大将更有利于光子出射, 此时就存在两种力量的制衡, 因而光提取效率的增加变得缓慢, 这正如图 7. 可以想象, 如果侧面倾斜角度越来越接近 90°, 此时大部分光子投射到左侧面, 提取效率将逐渐降低.

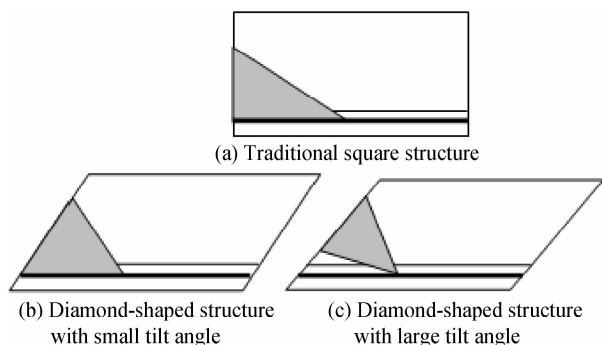


图 8 侧面倾斜角度对提取效率的影响

Fig. 8 Impact of tilt angle on the extraction efficiency

3 结论

本文分析了 GaN 基 LED 倒装结构中衬底折射率及厚度对光提取效率的影响, 并提出了一种新的菱形结构, 分析衬底折射率和厚度以及侧面倾斜角度对菱形结构 LED 光提取效率的影响. 结果表明, 菱形结构突破了传统芯片中全反射的限制, 大幅提高了光提取效率. 当侧面倾斜角度为 30°, 衬底厚度

为 200 μm 时, 对应 Si、蓝宝石、SiC 三种衬底材料, 菱形结构的光提取效率分别提高到传统倒装结构的 1.51、2.03、3.65 倍.

参考文献

- [1] LIU Zhi-qiang, WANG Liang-chen. Analysis of light extraction efficiency for face-up and flip-chip GaN-based LED [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2007, **30**(3):775-778.
刘志强, 王良臣. 正装、倒装结构 GaN 基 LED 提取效率分析 [J]. *电子器件*, 2007, **30**(3):775-778.
- [2] KAWAKAMI Y, NARUKAWA Y, OMAE K, *et al.* Dimensionality of excisions in InGaN-based lighting devices [J]. *Phys Status Solidi A*, 2000, **178**(1):331-336
- [3] FAN S H, VILLENEUVE P R, JOANNOPOULOS J D, *et al.* High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystal [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, **78**(17):3294-3297.
- [4] FUJII T, GAO Y, SHARMA R, *et al.* Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(6):855-857.
- [5] SHEN-TU Wei-jin, HU Fei, LUO Yi, *et al.* Study on light extraction efficiency of GaN-based light-emitting diode chips [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(4):385-389.
申屠伟进, 胡飞, 罗毅, 等. GaN 基发光二极管芯片光提取效率的研究 [J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4):385-389.
- [6] WIERER J J, STEIGERWALD D A, KRAMES M R, *et al.* High-power AlGaInN flip-chip light-emitting diodes [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, **78**(22):3379-3381.
- [7] KRAMES M R, OCHIAI-HOLCOMB M, HOFLEER G E, *et al.* High-power truncated-inverted-pyramid (Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/GaP light-emitting diodes exhibiting > 50% external quantum efficiency [J]. *Appl Phys Lett*, 1999, **75**(22):2365-2367.
- [8] ZHANG Ling, LIANG Liang, ZHANG Lin-li, *et al.* Study of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9):1815-1818.
张玲, 梁良, 张琳丽, 等. 一维光子晶体带隙结构研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(9):1815-1818.
- [9] WANG Xin-hua, WANG Bin-ke, QU Shao-bo, *et al.* Simulation of power distribution and combination in two-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6):1423-1426.
王新华, 王斌科, 屈绍波, 等. 二维光子晶体功率分配与合成的仿真 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(6):1423-1426.
- [10] LU Hui, TIAN Hui-ping, LI Chang-hong, *et al.* Large absolute band gaps of 2D photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6):1414-1418.
鲁辉, 田慧平, 李长红, 等. 大带隙二维光子晶体结构的研究 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(6):1414-1418.
- [11] XIA Chang-sheng, LI Zhi-feng, WANG Chong, *et al.* Ray tracing simulation of InGaN/GaN light-emitting diodes with parabolic substrates [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, **27**(1):100-103.
夏长生, 李志锋, 王菴, 等. 抛物线型衬底 InGaN/GaN 发光二极管的模拟研究 [J]. *半导体学报*, 2006, **27**(1):100-103.

Improvement for the Light Extraction Efficiency of Light-Emitting Diodes

XIONG Wei-ping, FAN Guang-han, LI Qi

(*Institute of Opto-Electronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China*)

Abstract: The impact of the refractive index and thickness of substrate on the light extraction efficiency of flip-chip LED is analyzed through simulation analysis. And a new diamond-shaped structure is proposed. The results show that the light extraction efficiency is improved to a good purpose in the diamond-shaped LED, resulting in an increase in the light extraction efficiency by 1.51, 2.03 or 3.65 times when the substrate is Si, Sapphire or SiC respectively.

Key words: Light extraction efficiency; Flip-chip structure; Diamond-shaped structure; Substrate



XIONG Wei-ping was born in 1983. Now he is a M. S. degree candidate at Institute of Optoelectronic Materials and Technology, South China Normal University, and his research interests focus on the preparation and design of LED chips with GaN material and the lighting design.



FAN Guang-han was born in 1945. He is a professor of South China Normal University. Now his research interests focus on the metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) and the photoelectronic devices.