

侧面粗化提高 GaN 基 LED 出光效率研究

邓彪, 刘宝林

(厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005)

摘要: 通过对传统结构 LED 出光分析, 提出采用侧面粗化来提高 GaN 基 LED 出光效率的方法, 使用蒙特卡罗光子追踪方法对器件出光效率进行了模拟。结果表明: 粗化侧面为三角状、底角为 55° 时出光效率最高, 随机粗化可以获得比固定角度粗化更高的出光效率, 同时降低材料的吸收系数可以提高 LED 的出光效率, 在吸收系数为 $10/\text{cm}$ 时, 经过粗化后的 LED 出光效率可以达到 46.1%。模拟结果证明侧面粗化可以较大地提高 LED 的出光效率。

关键词: GaN 基发光二极管; 出光效率; 侧面粗化

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2011)03-0352-04

Enhancement of Photon Extraction Efficiency of GaN-based LED by Lateral Surface Roughening

DENG Biao, LIU Baolin

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, CHN)

Abstract: By analyzing the light output of conventional LED, a method of lateral surface roughening was proposed to improve the extraction efficiency of GaN-based LED and Monte Carlo photon tracking method was used to simulate the extraction efficiency. The simulation results show that when the lateral surface is triangular shaped, the extraction efficiency of 55° rough angle reaches the highest, and random roughening can get higher efficiency than stable roughening angle. Also, reducing the absorption coefficient of the material can enhance the extraction efficiency of LED highly, and when the absorption coefficient is $10/\text{cm}$, the extraction efficiency of lateral surface roughening LED can get 46.1%.

Key words: GaN-based LED; photon extraction efficiency; lateral surface roughening

0 引言

目前, 影响 GaN 基 LED 在照明中的应用的 关键因素之一是其发光效率不高^[1]。发光效率主要由内量子效率和外量子效率决定, GaN 基 LED 的内量子效率已经达到 80% 以上^[2], 发光效率主要受外量子效率限制。

从 LED 有源层发出的光子, 需要透过器件内部

才能到达空气中。GaN 材料的折射为 2.4, 空气的折射率为 1.0, 全反射角 24.5° , 大于全反射角的光子将被反射回去。对于传统矩形腔结构 LED, 大于全反射角的光子会在器件内部来回多次反射, 在多次反射过程中, 有一部分光子会到达器件的侧面, 通过侧面出射, 一部分光子则在多次反射过程始终无法出射而最终被吸收, 理论上大约只有百分之二十几的光子能从器件出射。为了能使更多的光子逃逸出去, 可以对器件表面进行粗化^[3-5]。表面经过粗化, 会改变光子的传播方向, 增加光子出射的几率, 从而使更多的光子逃逸到空气中, 大大提高出光效率。针对传统的 GaAs 基 LED 器件, 通过自然光

收稿日期: 2010-12-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60276029); 国家“863”计划项目(2004A A311020, 2006A A032409); 福建省科技项目和基金资助项目(2006H 0092, A0210006, 2005H Z1018)。

刻和 ICP 刻蚀方法^[6], 可以有效地对表面进行粗化。然而对于 GaN 基 LED 来说, 由于 p 型层很薄, 且刻蚀深度不易控制, 刻蚀后对器件造成很大的损伤, 实现商业化应用很困难^[7-8]。为此, 我们提出对器件的侧面进行粗化来达到提高出光效率的方法。本文通过蒙特卡罗光子追踪方法^[9], 对 GaN 基 LED 侧面粗化出光效率进行模拟, 计算结果表明侧面粗化可以很大程度地提高出光效率。

1 侧面粗化方式的提出与实现

在不考虑光被吸收的情况下, 有源区产生的光子射向器件表面时, 当入射角大于全反射角时, 光子由于全反射将会在器件内部来回反射, 始终不能透过器件表面, 因此光子在器件表面及内部经多次反射最终将会到达器件的侧面, 如图 1。对于这些到达器件侧面的光子来说, 此时的侧面等效于器件的表面, 同样存在全反射问题, 所以, 对侧面进行粗化可以达到与表面粗化相同的效果, 从而提高 LED 的出光效率。在传统 GaN 基 LED 制备工艺过程中, 在进行台面刻蚀的时候, 对掩模版图形边缘进行处理, 利用 ICP 刻蚀方法, 刻蚀后即得到粗化的侧面, 如图 2, 这种方法在工艺实现上非常简便, 无需增加任何工艺流程。

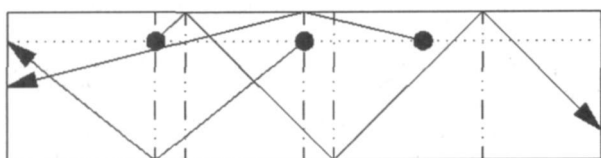


图 1 传统 LED 光子全反射图

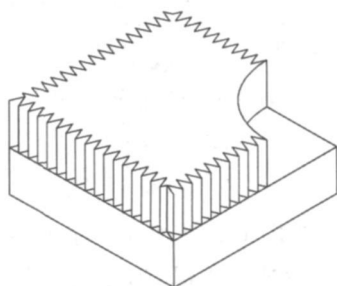


图 2 侧面粗化 LED 结构示意图

2 理论模型及模拟条件

2.1 模型建立

(1) LED 的各层介质均由平面方程给出, 而粗化微元由周期性曲面方程给出, 光子均匀分布在有源层内。给定随机初始位置 $L_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 及随机

方向向量 $D(D_x, D_y, D_z)^{[10]}$

$$\begin{cases} D_x = \sqrt{1 - \xi^2} \sin 2\pi\delta \\ D_y = \sqrt{1 - \xi^2} \cos 2\pi\delta \\ D_z = \xi \end{cases} \quad (1)$$

其中, δ 为取 $(-1, 1)$ 之间的随机数, ξ 为取 $[0, 1)$ 之间的随机数。

(2) 在光子飞行一段距离与平面相遇之后, 考虑光子是否被吸收。飞行距离为 L , 被吸收概率 $A = \exp(-aL)$, a 为材料的吸收系数。产生一个随机数 ζ , 如果满足条件 $\zeta < A$, 则光子被吸收, 考虑下一个光子, 反之光子存活, 继续传播。

(3) 在光子与界面相遇时, 采用 Snell 定律判断光子的反射与折射。根据直线与界面方程, 可以求出直线与平面的夹角 α_1 , α_1 即为入射角。然后由 Snell 定律可以求出折射角 α_2 , 其中 n_1 为折射面折射率, n_2 为入射面折射率。在界面上反射率 R_F 如式 (2) 所示:

$$R_F = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} + \frac{\tan^2(\alpha_1 - \alpha_2)}{\tan^2(\alpha_1 + \alpha_2)} \right] \quad (2)$$

求出反射率 R_F , 然后再产生一个随机数 δ , δ 是 $(0, 1)$ 之间的数, 与 R_F 比较, 若 $R_F < \delta$ 则折射出去, 记录射出的面、方向、位置, 然后再产生下一个光子, 反之则反射, 继续跟踪这个光子。

本文模拟未封装 GaN 基 LED, 如图 2, GaN 的折射率取 2.413, Al_2O_3 的折射率取 1.745, 空气折射率取 1.0。吸收系数取 $50/\text{cm}$, 透明金属电流扩展层透射率取 90%, 不考虑金属电极以及反射镜, 器件尺寸为 $330 \mu\text{m} \times 330 \mu\text{m}$, 粗化微元大小为 $2 \mu\text{m}$, p 型区厚度为 $0.15 \mu\text{m}$, n 型区厚度为 $2 \mu\text{m}$, 衬底厚度为 $100 \mu\text{m}$ 。

3 结果与讨论

3.1 GaN 基 LED 传统结构模拟分析

取 GaN 的吸收系数为 $50/\text{cm}$, 透明金属电流扩展层透射率为 90%, 对传统矩形腔结构 GaN 基 LED 进行模拟, 计算得到出光效率为 21.1%。

3.2 侧面粗化模拟计算结果分析

考虑侧面粗化为三角状粗化, 三角状平面为一定角度倾斜垂直底面的平面, 如图 2, 吸收系数取 $50/\text{cm}$ 。因此, 对出光效率 η 的影响主要取决于粗化的角度的大小。给定两组数据, 一组数据角度为随机粗化角度, 即粗化角度不固定, 另一组数据为固

定的粗化角度。模拟结果为: 随机粗化的出光效率为 32.77%, 相比不粗化时候提高了 55.3%。固定角度粗化结果如图 3, 在 5° 时对应最大的出光效率 31.64%, 45° 时出光效率最低, 仅为 23.2%, 这一结论与表面粗化计算结果基本一致^[11]。

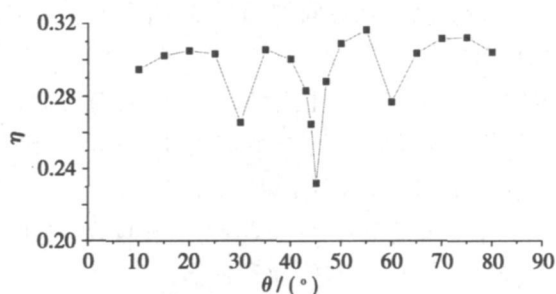


图 3 不同粗化角度下的出光效率图

3.3 粗化比例对模拟结果的影响分析

由于器件粗化方式是从底面刻蚀实现的, 在粗化的实现上不能保证 GaN 侧面全部被刻蚀, 即有一部分器件侧面是没有粗化效果的, 因此, 计算粗化比例 R 可以针对实际情况下的具体粗化效果提供一定的参考。同样取吸收系数为 50/cm, 粗化比例为 [0, 1] 之间, 粗化角度分别为随机粗化方式和固定角度 (35°) 粗化, 计算结果如图 4。由图可知, 随着粗化比例的增加出光效率线性增加, 证明 LED 的出光效率在侧面粗化的作用下增加了。

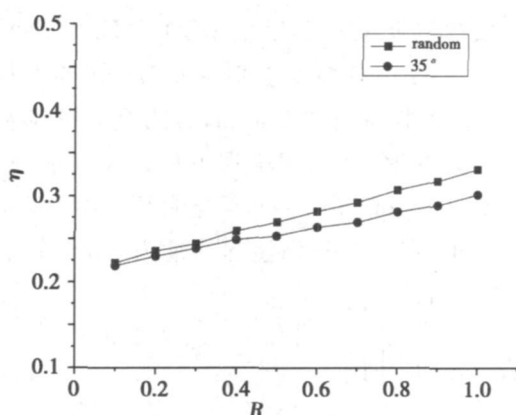


图 4 不同粗化比例下的出光效率图

3.4 电流扩展层透射系数对出光效率的影响分析

将电流扩展层的透射率从 0.1 到 1.0 变化, 计算结果如图 5。未粗化时电流扩展层透射率 t 由 0.1 变成 1.0 时, 出光效率提高了 18.95%, 而随机粗化与 35° 粗化时出光效率分别提高了 10.17% 和 12.19%, 粗化后, 电流扩展层透射率的影响减小了, 这是由于更多的光子不是通过器件的表面而是侧面出射的。

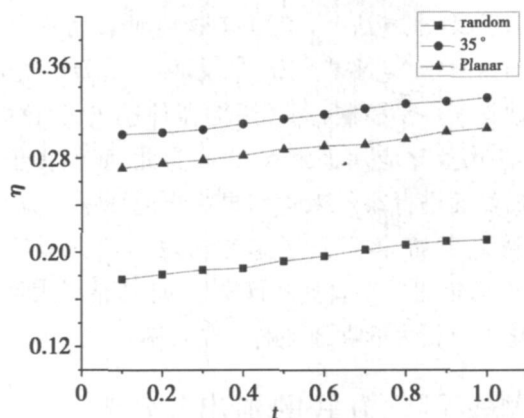


图 5 不同电流扩展层透射率下的出光效率图

3.5 吸收系数对出光效率的影响分析

吸收系数为 10~200/cm, 分别计算不粗化、随机角度粗化和固定角度 (35°) 粗化的出光效率。计算结果如图 6, 由图可知, 随着吸收系数的增加出光效率急剧减小。当吸收系数取 10/cm 时, 未粗化的出光效率为 28.3%, 而随机粗化的出光效率可以达到 46.1%, 同时, 未粗化的曲线相对粗化后的曲线更为平缓。这是因为吸收系数较小时, 不能出射的光子有足够的机会到达器件的侧面, 粗化后大量的光子可以通过侧面出射出去, 最终提高出光效率。

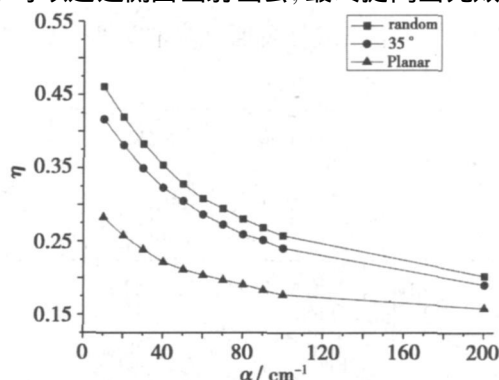


图 6 不同吸收系数下的出光效率图

4 结论

通过对传统 LED 出光特点的分析, 提出采用侧面粗化来提高 GaN 基 LED 出光效率的方法, 使用蒙特卡罗光子追踪方法对出光效率进行了模拟, 结果证明侧面粗化方式可以较大幅度地提高 LED 的出光效率。粗化侧面为三角状、55° 时的出光效率最高, 而随机粗化可以获得比固定角度粗化更高的出光效率。同时, 降低材料的吸收系数可以很大程度地提高 LED 的出光效率, 在吸收系数为 10/cm 时, 经过粗化后的 LED 出光效率可以达到 46.1%。

参考文献:

- [1] Nakamura S. The roles of structural imperfections in InGaN-based blue light emitting diodes and laser diodes[J]. Science, 1998, 281: 956-961.
- [2] Nishida T, Saito H. Efficient and high power AlGaN-based ultraviolet light emitting diode grown on bulk GaN[J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 79(6): 711-712.
- [3] Hao M, Egawa T, Ishikawa H. Highly efficient GaN-based light emitting diodes with micropits[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 241907.
- [4] Fujii T, Gao Y, Nakamura S, 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] Windisch R, Dutta B, Kuijk M, et al. 40% efficient thin film surface textured light emitting diodes by optimization of natural lithography[J]. Electron Devices, 2000, 47: 1492-1498.
- [6] Schnitzer I. 30% external quantum efficiency from surface textured, thin film light emitting diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 1993, 63(16): 2174-2176.

- [7] Windisch R, Heremans P, Knobloch A, et al. Light emitting diodes with 31% external quantum efficiency by outcoupling of lateral waveguide modes[J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 74: 2256-2258.
- [8] Huang S M, Yao Y, Jin C, et al. Enhancement of the light output of GaN-based light emitting diodes using surface textured indium tin oxide transparent ohmic contacts[J]. Displays, 2008, 29: 254-259.
- [9] Pufal S, Nakwaski W. The Monte Carlo model of a light emitting diode[J]. Optical and Quantum Electron., 1987, 19: 289-292.
- [10] Lee S J. Analysis of light emitting diodes by Monte Carlo photon simulation[J]. Appl. Opt., 2001, 40(9): 1427-1437.
- [11] 郑清洪, 刘宝林. 表面粗化提高 GaN 基 LED 光提取效率的模拟[J]. 电子器件, 2008, 31(4): 1077-1080.

作者简介:

邓彪(1987-), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事 GaN 基高效 LED 方面的研究。

E-mail: blliu@xmu.edu.cn

(上接第 338 页)

3 结论

本文从载流子速率方程出发, 得到考虑了寄生参量的影响, 并引入了噪声电流的 APD 的等效电路模型。模拟结果表明: 在低反向偏压时, APD 具有较好的脉冲响应、较高的频率响应带宽和较低的噪声电流, 随反向偏压的升高, 脉冲响应变差、频率响应带宽减小、噪声电流增大; APD 的增益、带宽相互制约, 在高增益区增益带宽积约为一个常数。因此在使用 APD 时要综合考虑其带宽需求和接收信号的强弱, 合理地选择工作电压。APD 特性分析结果与文献中理论与实验结果相符合, 证明了该等效电路模型的有效性和准确性, 可以应用于 OEIC 的模拟仿真, 同时该电路模型也为优化设计 APD 提供了一种方法。

参考文献:

- [1] Lucovsky G. Transit-time considerations in p-i-n diodes[J]. J. Appl. Phys., 1964, 35(3): 622-628.
- [2] Chen Weiyong, Liu Shiyong. IN avalanche photodiodes model for circuit simulation[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1996, 32(12): 2105-2111.

- [3] Abbasi M R, Sheikhi M H, Zarifkar A. Implementation of split step method to consider gradual changes of the electric field for circuit simulation of an avalanche photodiode[C]// Proc. 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2008: 1-6.
- [4] 杨祥林, 孟宇. 光纤通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [5] 祝宁华. 光电子器件微波封装和测试[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] Leheny R F, Nahory R E, Pollack M A, et al. Characterization of InGaAs photodiodes exhibiting low dark current and low junction capacitance[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1981, 17(2): 227-231.
- [7] Anselm K A. Performance of thin separate absorption charge and multiplication avalanche photodiodes[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1998, 34: 482-490.
- [8] Emmons R B. Avalanche photodiode frequency response[J]. Trans. Electron Devices, 1967, 14(9): 633-633.

作者简介:

许文彪(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信、高速光电子器件建模的研究。

E-mail: lnjcxuwb@163.com