

抛物线型衬底 InGaN/GaN 发光二极管的模拟研究^{*}

夏长生[†] 李志锋 王 堯 陈效双 陆 卫

(中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

摘要: 针对发射到衬底中的光子, 提出了一种具有抛物线型衬底结构的 InGaN/GaN 发光二极管, 并对平面衬底和抛物线型衬底 InGaN/GaN 发光二极管的光子运动轨迹、发射功率角度分布和外量子效率进行了模拟计算. 结果表明: 相对于平面衬底发光二极管, 抛物线型衬底发光二极管可以充分利用发射到衬底中的光子, 使其正向光子发射功率增加 12.6 倍, 外量子效率提高 1.22 倍, 同时具有发射准平行光的功能.

关键词: InGaN/GaN 发光二极管; 光子运动轨迹; 外量子效率

PACC: 7280E; 4215D; 7340L

中图分类号: TN312⁺. 8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)01-0100-05

1 引言

上世纪 90 年代以来, 随着氮化镓(GaN)基半导体材料生长工艺的一系列重大突破, 以 GaN 为代表的新一代半导体材料逐渐兴起. GaN 基半导体材料可以制成高效的蓝、绿光和白光发光二极管(LED)^[1~4], 广泛应用于大屏幕彩色显示、汽车照明和交通信号、多媒体显示、光通信等领域, 将来还有可能代替白炽灯、荧光灯, 实现人类照明史上的又一次革命. 但其发光效率与白炽灯、荧光灯相比还比较低. 目前, 荧光灯的流明效率为 70~100Lm/W, 而商用白光发光二极管的流明效率只有 25~50Lm/W. 如何提高 GaN 基半导体发光二极管的发光效率成为人们关注的焦点. 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. 由于工艺和技术的成熟, 人们已经可以制备内量子效率达到 70%^[5], 甚至 80%^[6] 的 GaN 基半导体发光二极管. 因此, 通过进一步提高内量子效率来大幅度提高 LED 发光强度已没有很大的余地; 而通过改变发光二极管的几何构型来提高外量子效率还具有很大的发展空间. 目前, 在这方面人们已经做了很多工作, 如采用内接微型圆盘结构^[7]、光子晶体结构^[8]、微型圆环结构^[9] 和二极管表面粗糙化^[10] 来优化 GaN 基半导体发光二极管, 使其外量子效率提高到 15%~30%.

由于半导体材料的折射率比较高, 光子在界面处很容易发生全反射而返回到半导体内部, 这是发

光二极管光子输出效率低的主要原因之一. 若 n_s 为半导体的折射率, n_e 为外部环氧树脂的折射率, 则发生全反射的临界角 θ 为: $\theta(n_e, n_s) = \sin^{-1}(n_e/n_s)$. 在半导体内部会形成 6 个所谓锥形逃逸区(escape cones)^[11], 从这 6 个锥形逃逸区发出的光子一般都可以发射到半导体外; 锥形逃逸区以外的光子则会被反射到半导体或衬底中. 发射或反射到衬底中的光子同样会受到衬底界面的多次反射或全反射而回到半导体内部被吸收或消耗掉, 仅有少量光子发射到衬底外部. 目前, GaN 基半导体发光二极管主要采用底面平整的蓝宝石作为衬底, 虽然这种衬底是透明的, 有利于光子的输出; 但其折射率(~ 1.7)比外部封装物质的折射率(环氧树脂, ~ 1.5)大, 而且衬底底面与金属支架接触, 光子在其内部同样可以发生多次反射或全反射.

本文提出一种具有抛物线型衬底结构的 GaN 基半导体发光二极管, 通过对平面衬底和抛物线型衬底发光二极管的光子运动轨迹、发射功率角度分布和外量子效率的初步模拟计算表明, 抛物线型衬底发光二极管可以充分利用发射到衬底中的光子, 具有明显的增强外量子效率和发射准平行光的作用.

2 InGaN/GaN 发光二极管的结构

图 1 为抛物线型衬底发光二极管的结构图. 抛物线型衬底发光二极管包括蓝宝石衬底、发光层及金属反射层三部分. 如图所示, 发光层依次由 n 型

^{*} 上海市科委资助项目(批准号: 036511008)

[†] 通信作者. Email: xiachsh@mail.sitp.ac.cn

2005-06-21 收到, 2005-09-19 定稿

GaN, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ / GaN 单量子阱, p 型 GaN 组成, 尺寸为 $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$; 蓝宝石衬底为抛物线形的实心碗状结构, 上表面的中心点为抛物线的焦点, 衬底中心厚度为抛物线的焦距, 抛物线符合公式 $x^2 = 2000y$, 上表面半径为 $1000\mu\text{m}$, 厚度为 $500\mu\text{m}$. 发光层位于衬底上表面的中心位置; 衬底下表面镀有金属反射层.

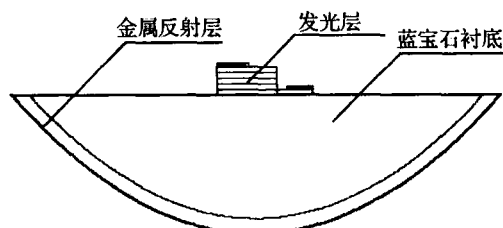


图 1 抛物线型衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管结构图

Fig.1 Structure of InGaN/ GaN single quantum well LED with parabolic substrate

图 2 为常规平面衬底发光二极管的结构图. 为了便于比较, 发光层的材料和结构参数与抛物线衬底发光二极管发光层的材料、结构参数完全相同. 蓝宝石衬底宽度为 $300\mu\text{m}$, 厚度为 $500\mu\text{m}$.

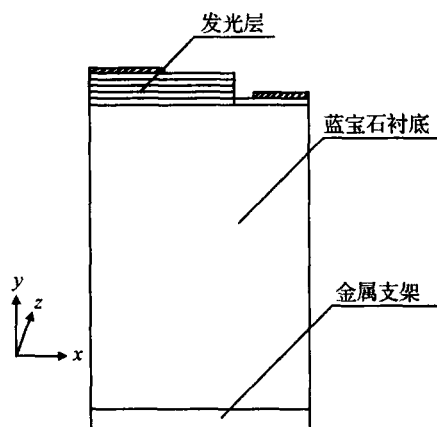


图 2 平面衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管结构图

Fig.2 Structure of InGaN/ GaN single quantum well LED with plane substrate

3 理论模型与模拟条件

采用 Crosslight 模拟软件中的计算机辅助设计程序包 APSYS 对发光二极管进行模拟. APSYS 是利用二维有限元分析方法, 以漂移-扩散模型为基础自治的解泊松方程、电流连续性方程、载流子能量传输方程、热传输方程和标量波动方程. 光线径迹 (Ray-tracing) 模拟将几何光学和波动光学 (折射、反射、吸收和干涉效应) 相结合, 通过 APSYS 程序包

模拟计算来实现对发光二极管光子运动轨迹及其发射功率角度分布的二维 (xy 平面) 模拟.

在光线径迹模拟中, 采用两种物理方法模拟光线的折射、反射和透射. 一是几何光学法, 采用光波强度公式模拟非相干波即利用光强叠加原理记录透射光强的角度分布; 沿 x 轴传播的光强度公式为:

$$I = I_0 \exp(-4\pi\kappa x/\lambda)$$

其中 I_0 为光源光强; κ 为消光系数; λ 为光的波长. 沿 y 轴的传播公式与之类似. 二是波动光学法, 用以某种电场矢量传播的光线处理相干波即将一束光线先转换为振幅和相位, 经过干涉计算后再转换为强度, 最后记录透射光强的角度分布; 最简单的极化平面波沿 x 轴传播的电场强度为:

$$E = \varepsilon \exp\{i[\omega t - (2\pi N/\lambda)x]\}$$

其中 ε 为振幅; ω 为波的角频率; N 为复折射率. 沿 y 轴的传播公式与之类似. 以 α 为入射角的入射光线从光密介质 (折射率为 $N_1 = n_1 - ik_1$) 射向光疏介质 (折射率为 $N_2 = n_2 - ik_2$), 反射角为 α , 折射角为 β , 其 TE 极化光波的费涅尔振幅反射和透射系数为:

$$r_e = \frac{N_1 \cos \alpha - N_2 \cos \beta}{N_1 \cos \alpha + N_2 \cos \beta}, \quad t_e = \frac{2 N_1 \cos \alpha}{N_1 \cos \alpha + N_2 \cos \beta}$$

TM 极化光波的费涅尔振幅反射和透射系数为:

$$r_m = \frac{N_1 \cos \beta - N_2 \cos \alpha}{N_1 \cos \beta + N_2 \cos \alpha}, \quad t_m = \frac{2 N_1 \cos \beta}{N_1 \cos \beta + N_2 \cos \alpha}$$

则透射率和反射率为:

$$R_e = R_m = rr^*, \quad T_e = \frac{tt^* \operatorname{Re}(N_2) \cos \beta}{N_1^* \cos \alpha}, \quad T_m = \frac{tt^* \operatorname{Re}(N_2) \cos \alpha}{N_1^* \cos \beta}$$

其中 $*$ 表示复数共轭; Re 为复数的实部.

在模拟过程中, 当光在 GaN 薄膜结构中传播时采用波动光学方法 (因为薄膜厚度小于光的相关长度), 而在蓝宝石衬底上传播时采用几何光学方法 (因为衬底厚度远大于光的相关长度).

模拟条件: 光波为 50% 横向电场 (TE) 50% 横向磁场 (TM) 的电磁波; 电极为半透明电极, 折射率为 $2 + 0.1i$; InGaN/ GaN 发光二极管为未经封装的芯片, 空气折射率为 1.0; 衬底折射率为 1.7; GaN 折射率为 2.54; $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 折射率为 2.7; 金属反射层及金属支架的反射率均为 98.5%; 发光层光源采用点光源; 考虑光子循环效应. APSYS 是二维 (xy 平面) 模拟程序, 假设器件在 z 轴方向为无穷大, 则电流和发射功率的单位分别为 A/m, W/m.

4 模拟结果

图 3 和 4 分别为平面衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管的光子运动轨迹和光子发射功率角度

分布图.由图 3 和 4 可知,发射到平面衬底中的光子,大部分仍会经过衬底界面和底部金属层的多次反射或全反射,只有很少部分能够发射到 L ED 外面;光子发射功率比较低,正向发射功率只有 0.3 W/m ;其角度分布是发散的,而且发射到二极管

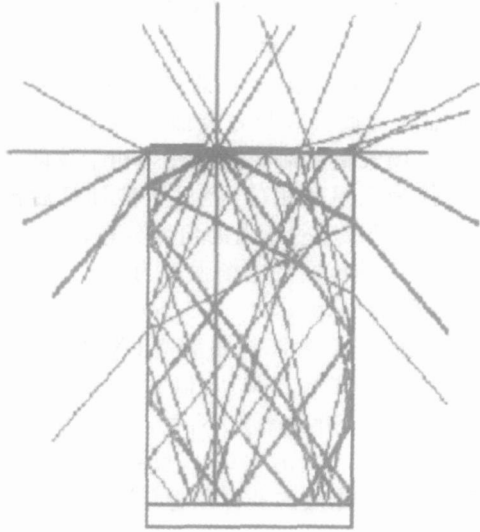


图 3 平面衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管的光子运动轨迹

Fig.3 Ray trace of InGaN/ GaN single quantum well L ED with plane substrate

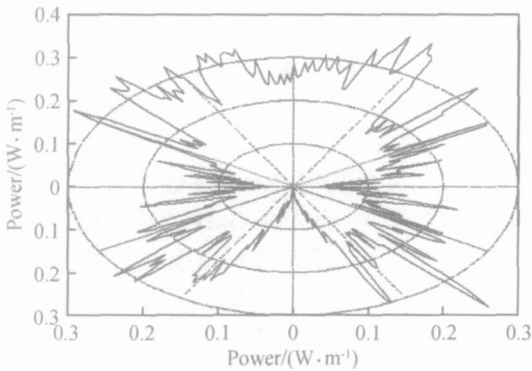


图 4 平面衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管光子发射功率的角度分布图

Fig.4 Angular distribution of emitted power for InGaN/ GaN single quantum well L ED with plane substrate

背面的光子占有很大的比例,减弱了正向照明亮度.图 5 和 6 分别为抛物线型衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管的光子运动轨迹和光子发射功率角度分布图.可以看出,由于发光层处于抛物线衬底的焦点位置上,发射到衬底中的光子经过底部金属反射层的反射以平行光的形式沿二极管的正向发射出来,这不仅可以降低光子在衬底中的发生多次反射或全反射的机会,还可以减少衬底和半导体材料对

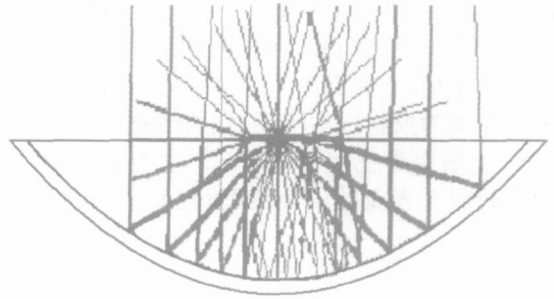


图 5 抛物线衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管的光子运动轨迹

Fig.5 Ray trace of InGaN/ GaN single quantum well L ED with parabolic substrate

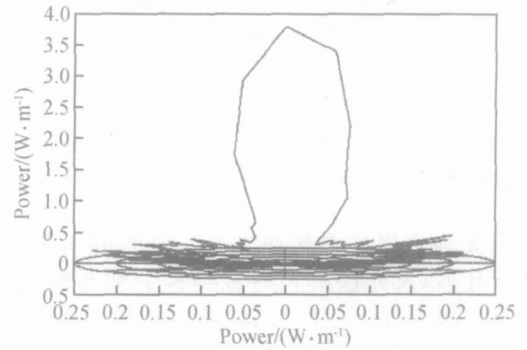


图 6 抛物线衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管光子发射功率的角度分布图

Fig.6 Angular distribution of emitted power for InGaN/ GaN single quantum well L ED with parabolic substrate

光子的吸收.其光子发射功率的角度分布具有很强的方向性,正向发射功率约为 3.8 W/m ,与平面衬底器件相比增大了 12.6 倍,而且背面光子发射功率几乎为零.

图 7 显示了这两种不同衬底结构的 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管的外量子效率.可以看出,在相同的注入电流下,抛物线型衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管相对于平面衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管具有较高的外量子效率,电流为 225 A/m 时,外量子效率提高了约 1.22 倍.由此可见,镀有金属反射层的抛物线型衬底可有效地减少光子在衬底中发生多次反射或全反射的机会,使原本不能发射出去的光子沿正向发射出去,充分利用发射到衬底中的光子,有效地提高发光二极管的正向发射功率和外量子效率.

由于抛物线型衬底 L ED 光子发射功率分布具有很强的方向性,在对其进行封装时必须合理设计环氧树脂的形状,以便保持其原有的发光特性,同时也可进一步增强其发光的方向性.抛物线型衬底厚度不能太小,否则难以加工.

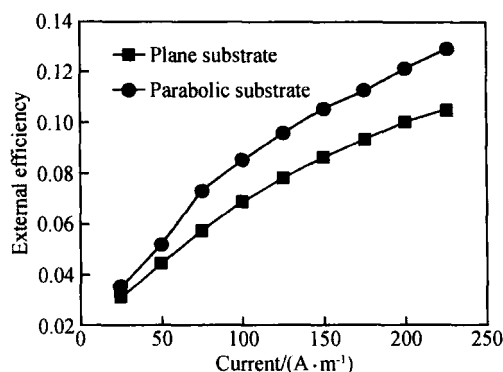


图 7 两种衬底结构 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管的外量子效率

Fig. 7 External quantum efficiency of InGaN/ GaN single quantum well LED with the two kinds of substrates

5 结论

通过对常规平面衬底和抛物线型衬底 InGaN/ GaN 单量子阱发光二极管的光子运动轨迹和光子发射功率角度分布以及外量子效率的初步模拟计算表明,本文提出的抛物线型衬底发光二极管相对于常规平面衬底发光二极管可以充分利用发射到衬底中的光子,减少衬底对光子的多次反射和吸收,具有明显的增强外量子效率和发射准平行光的作用.同时还使得外发射光子的正向定向特征明显强化,这将十分有利于多 LED 单元集成形成高亮度 GaN 基半导体发光二极管照明光源.

致谢 感谢 Crosslight 软件公司提供发光二极管器件模拟软件.

参考文献

- [1] Nakamura S, Senoh M, Iwasa N, et al. Superbright green InGaN single-quantum-well-structure light-emitting diodes. Jpn J Appl Phys, 1995, 34: L1332
- [2] Wang Xiaohui, Liu Xianglin, Lu Dacheng, et al. InGaN/ GaN single quantum well structures green light-emitting diodes. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(7): 726 (in Chinese) [王晓晖, 刘祥林, 陆大成, 等. InGaN/ GaN 单量子阱绿光发光二极管. 半导体学报, 2000, 21(7): 726]
- [3] Lu Dacheng, Han Peide, Liu Xianglin, et al. InGaN/ AlGaIn DH green LED. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(4): 414 (in Chinese) [陆大成, 韩培德, 刘祥林, 等. InGaN/ AlGaIn 双异质结绿光发光二极管. 半导体学报, 2000, 21(4): 414]
- [4] Xu Jin, He Lenian. Research and recent progress in GaN-based semiconductor LED. Optoelectronic Technology, 2003, 23(2): 139 (in Chinese) [徐进, 何乐年. GaN 基发光二极管研究与进展. 光电子技术, 2003, 23(2): 139]
- [5] Kawakami Y, Narukawa Y, Omae K, et al. Dimensionality of excitons in InGaIn-based light emitting devices. Phys Status Solidi A, 2000, 178(1): 331
- [6] Nishida T, Saito H, Kobayashi N. Efficient and high-power AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diode grown on bulk GaN. Appl Phys Lett, 2001, 79(6): 711
- [7] Jin S X, Li J, Lin J Y, et al. InGaIn/ GaN quantum well interconnected microdisk light emitting diodes. Appl Phys Lett, 2000, 77(20): 3236
- [8] Shakya J, Kim K H, Lin J Y, et al. Enhanced light extraction in InGaN ultraviolet photonic crystal light-emitting diodes. Appl Phys Lett, 2004, 85(1): 142
- [9] Choi H W, Dawson M D, Edwards P R, et al. High extraction efficiency InGaIn micro-ring light-emitting diodes. Appl Phys Lett, 2003, 83(22): 4483
- [10] Fujii T, Gao Y, Sharma R, et al. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening. Appl Phys Lett, 2004, 84(6): 855
- [11] Lee S J. Analysis of InGaIn high-brightness light-emitting diodes. Jpn J Appl Phys, 1998, part1, 37(11): 5990

Ray Tracing Simulation of InGaN/ GaN Light-Emitting Diodes with Parabolic Substrates^{*}

Xia Changsheng[†], Li Zhifeng, Wang Chong, Chen Xiaoshuang, and Lu Wei

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract : A new kind of InGaN/ GaN light-emitting diode with a parabolic substrate is proposed with special attention to the photon emitted into the substrate. Ray trace, the angular distribution of emitted power, and the external quantum efficiency for plane and parabolic InGaN/ GaN light-emitting diodes are simulated and calculated preliminarily. The results show that the parabolic InGaN/ GaN light-emitting diode can emit better quasi-parallel light than that with a plane substrate and can effectively utilize the photon emitted into the substrate, resulting in an increase in the emitted power in the forward direction by 12.6 times and an improvement in the external quantum efficiency by 1.22 times.

Key words : InGaN/ GaN LED; ray trace; external quantum efficiency

PACC : 7280E; 4215D; 7340L

Article ID : 0253-4177(2006)01-0100-05

^{*} Project supported by the Science & Technology Committee of Shanghai (No. 036511008)

[†] Corresponding author. Email: xiachsh@mail.sitp.ac.cn

Received 21 June 2005, revised manuscript received 19 September 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics