

表面织构对红光 LED 发光的影响*

宋小伟[†] 李建军 韩 军 邓 军 陈依新 孙 昊 蒋文静 沈光地

(北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要: 运用蒙特卡罗法模拟二维红光 LED 表面织构对 LED 光提取效率的影响. 模拟了不同形状的表面织构对应的光强变化率. 选取刻蚀深度为 $4\mu\text{m}$ 、腐蚀宽度为 $2\mu\text{m}$ 、倾角为 40° 、周期为 $2\mu\text{m}$ 的表面图形对 LED 进行粗化实验. 结果显示, 引入表面织构后光强比常规 LED 提高了 20.56%; 并对模拟结果与实验结果进行了分析, 结果表明引入表面织构可以有效地提高 LED 的光提取效率.

关键词: 表面织构; 蒙特卡罗; 发光二极管

PACC: 0710C

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)07-1365-04

1 引言

近几年, AlGaInP 高亮度发光二极管 (light emitting diode, LED) 得到了广泛应用, 在各种显示系统、照明系统、汽车尾灯等领域起着越来越重要的作用. 以 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料作为有源区的 LED 具有较高的内量子效率^[1]. 然而, 一方面由于高亮度红光 LED 的外延是在 GaAs 衬底上进行的, GaAs 材料对红光是吸收的, 使得出光效率很低. 于是人们引入分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR)、全方位反射镜 (omni-directionally reflector, ODR) 来反射有源区到衬底间的光, 避免被衬底吸收. 另一方面作为正面出光窗口层的半导体材料的折射率很大, 全反射临界角很小, 大多数的光都被全反射到器件内部, 经过多次反射后可能被器件完全吸收, 这也是 LED 出光效率很低的主要原因之一. 为了提高 LED 的出光效率, 研究人员采用表面粗化技术, 对 LED 表面进行粗化处理, 通过改变光线的出射角度, 使得光线有可能出射到器件外, 从而提高 LED 的出光效率. 本文运用蒙特卡罗的模拟方法研究表面结构对 LED 特性的影响.

蒙特卡罗方法就是模拟光子的统计特性, 即在有源区某点产生许多个 2π 立体角内均匀分布的光子, 统计最终出射到芯片外的光子数, 其核心思想是跟踪光子的运动轨迹和决定光子的生存状态并判断光子与介质作用后的行为, 如: 吸收、反射、透射等, 根据一定的判定条件选择跟踪反射还是透射光线, 直到光子被吸收或者离开器件, 才终止对这个光子的跟踪, 再跟踪下一个新产生的光子, 如此反复, 记录下这些离开器件的光子出射方向及位置, 便可以得到 LED 的发光特性^[2,3].

2 理论分析

2.1 器件模型

本文模拟的二维红光 LED 器件结构, 是在 n-GaAs 衬底上利用 MOCVD 外延生长技术生长了 n-AlGaInP, p-AlGaInP 限制层, 多量子阱有源区层和 p-GaP 窗口层. 如图 1 所示, GaP 层采用腐蚀与刻蚀方法周期性制作如图 2 所示的表面图形.

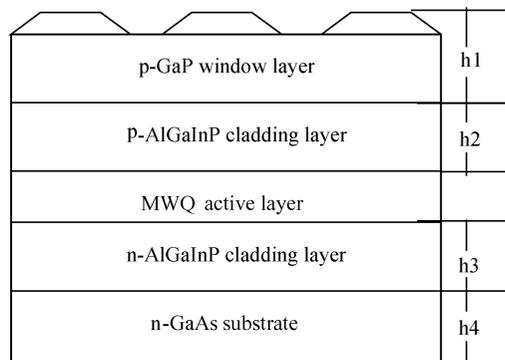


图 1 红光 LED 结构简图

Fig. 1 Structure of red LED

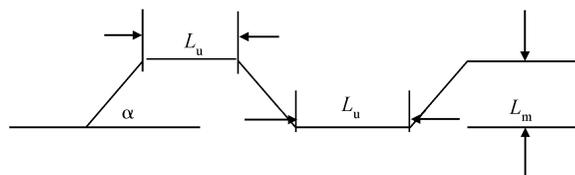


图 2 腐蚀图形形状

Fig. 2 Etching graphic shape

* 北京市属市管高等学校人才强教计划, 国家自然科学基金 (批准号: 60407009), 北京市自然科学基金 (批准号: 4032007) 及北京市教委资助项目

[†] 通信作者. Email: davidsung1983@gmail.com

2007-12-24 收到, 2008-01-22 定稿

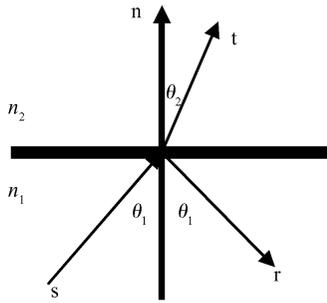


图 3 光的反射与折射

Fig. 3 Reflection and refraction of light

在模拟 LED 的发光过程中,做如下假设:(1) 由自发辐射的工作原理,可以认为 LED 在有源区内产生的光子在 2π 立体角度内均匀分布,强度是均匀的。(2) 发射的光为单色光,即 λ (波长)为一定值。(3) 假设有源区是没有厚度的一个发光面。(4) 假设 s 光、p 光各占 50%。

2.2 光学理论

运用于模拟计算的理论是非涅尔公式,作为自然界中最普遍的光学理论,可以用来解决大多数的光学问题,它适合于计算光线作用尺寸远远大于光的波长的现象.非涅尔公式描述如下^[4]:s 为入射光由折射率为 n_1 的介质入射到折射率为 n_2 的介质中,在界面处发生反射,反射光线为 r,反射角为 θ_1 ,在折射率为 n_2 的介质中发生折射,折射光线为 t,折射角为 θ_2 ,n 为入射面法线方向,如图 3 所示.反射系数与折射系数由(1)~(4)式描述:

$$R_s = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (1)$$

$$T_s = \frac{\sin^2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (3)$$

$$T_p = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2)} \quad (4)$$

并且

$$\begin{aligned} R_s + T_s &= 1 \\ R_p + T_p &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 R_s, T_s, R_p, T_p 分别为 s 光反射系数、s 光透射系数、p 光反射系数、p 光透射系数。

那么介质对光的反射率可通过下式表示:

$$R = (1 - \delta_s^2)R_p + \delta_p^2 R_s \quad (6)$$

其中 δ_s, δ_p 为分别为 s, p 光在偏振光中所占的比例。

3 模拟过程

本文采用 MATLAB 语言编程,LED 的蒙特卡罗射线追踪法模拟流程图如图 4 所示。

3.1 网格划分

根据 LED 结构及各层折射率划分网格,引入网格

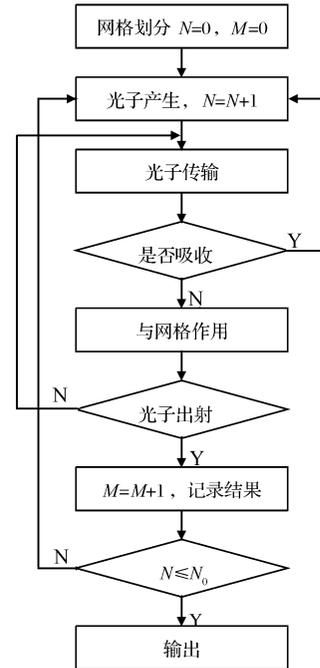


图 4 模拟流程图

Fig. 4 Simulation flow chart

变量 $\text{led_grid}(k)$ ($k = 1, 2, 3 \dots$), 表示第 k 个网格, 变量包括网格各点坐标、网格折射率, 并且网格内的折射率为定值。

3.2 光子产生

引入光子变量 $\text{photon}(i)$ ($i = 1, 2, 3 \dots$), 表示产生的第 i 个光子, 变量包括光子坐标、光子状态参数 P , 并且当 $P = 1$ (光子存活); $P = 0$ (光子被吸收) 时运用假设(a), 产生的光子均匀分布, 分布角度为 $2\pi\gamma$, γ 为 $0 \sim 1$ 均匀分布的随机数。

引入光线变量 $\text{ray}(j)$ ($j = 1, 2, 3 \dots$), 表示第 j 条光线, 变量包括光线强度 I 、光线偏振向量 e 、光线位置向量 r 。

初始化偏振向量为:

$$e_o = xe_{ox} + ye_{yo} \quad (7)$$

这里运用假设(d), 假设 p, s 光各占 50%。

初始化位置向量:

$$r_o = xx_o + yy_o \quad (8)$$

初始化光强单位:

$$I_o = 1 \quad (9)$$

3.3 光子传输

自由飞行的光子将与网格发生作用, 除非光子被吸收, 否则作用后的光子的位置向量为:

$$r_{n+1} = xx_n + yy_n \quad (10)$$

自由飞行的路程为:

$$l_n = |r_{n+1} - r_n| \quad (11)$$

自由飞行时间内光强的衰减规律为:

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Thickness / μm	Refractive index n	Absorption coefficient ^[5] / cm^{-1}	Material
$h_1 = 8$	3.31	10^{-2}	p-GaP
$h_2 = 1$	3.34	10^2	p-AlGaInP
$h_3 = 0.3$	3.34	10^2	n-AlGaInP
$h_4 = 300$	4.0	10^6	n-GaAs substrate

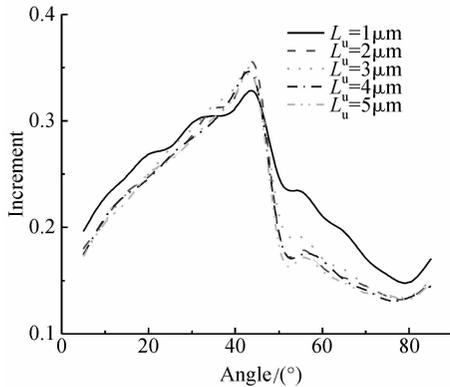


图 5 选定 $L_m = 4\mu\text{m}$ 时对应的图形倾角与光强增量的关系

Fig. 5 Relationship of the light intensity increment when $L_m = 4\mu\text{m}$

$$A_n = \exp(-\alpha_n l_n) \quad (12)$$

3.4 光子与网格作用

光子产生后必然与网格发生作用,每个网格代表一种介质,光子与介质的作用主要有反射、折射和吸收.判断它们的方法如下:

(1)判断是否被吸收:

$P = 1, \rho_p \leq A_n$ (光子存活); $P = 0, \rho_p > A_n$ (光子被吸收)
其中 ρ_p 为 0~1 间指数分布的随机数; A_n 为光子第 n 次飞行时的光强.

(2)判断下一次跟踪反射还是折射光:

$\rho_r \leq R$ (光子被反射); $\rho_r > R$ (光子透射)
其中 ρ_r 为 0~1 间均匀分布的随机数; R 为反射率.

最后根据光子与网格作用后的坐标来判断光子是否出射到器件外,记录下出射光子的方向和位置.再产生新的光子,如此循环,最后得到总的出射光子数.

4 结果与讨论

模拟所采用的材料参数如表 1 所示,模拟的光子数为 10^5 .不同形状对应的图形倾角与光强增量模拟结果如图 5 和图 6 所示.

由图 5 和图 6 的模拟结果可知,在 40° 左右可以得到比较大的光强提高.选定 $L_u = 2\mu\text{m}, L_m = 4\mu\text{m}, \alpha = 40^\circ$ 、周期为 $2\mu\text{m}$ 的表面形状进行粗化实验,并对粗化处理后的 LED(未进行环氧树脂封装)进行光强分布测试,测试仪器为杭州远方仪器有限公司的 LED620-

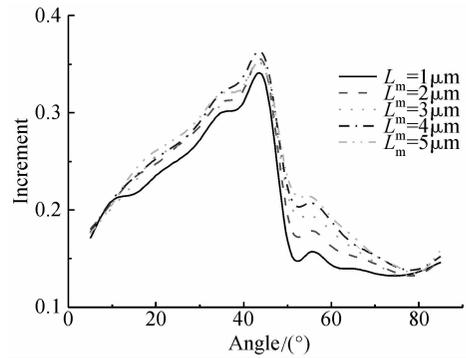


图 6 选定 $L_u = 2\mu\text{m}$ 时对应的图形倾角与光强增量的关系

Fig. 6 Relationship of the light intensity increment when $L_u = 2\mu\text{m}$

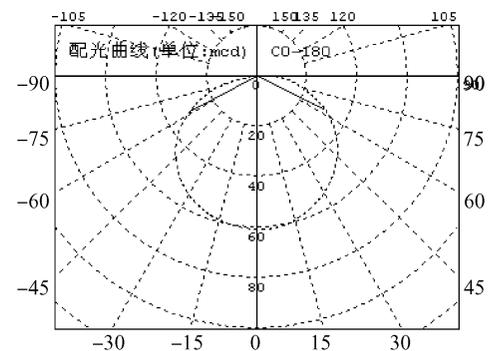


图 7 常规 LED 器件的光强分布

Fig. 7 Conventional LED light intensity distribution

LED 光强分布测试仪.测试结果如图 7 和图 8 所示.

由表 2 可以得到:(1)正向电压升高了 0.02V ,原因是:粗化在 GaP 层进行,GaP 为高掺杂层,粗化后增加了 GaP 层的电阻.(2)光强增加了 20.56% ,与模拟结果相差 15% 左右,分析其原因:(1)由于进行了表面粗化,

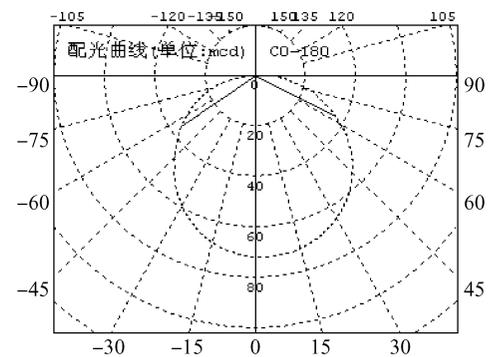


图 8 粗化后的 LED 器件的光强分布

Fig. 8 LED light intensity distribution with surface texture

表 2 常规 LED 与粗化后 LED 器件参数对比

Table 2 Comparison of conventional LED and LED with surface texture

	常规 LED 器件	粗化后 LED 器件
工作电流/mA	19.98	19.98
正向电压/V	1.95	1.97
轴向光强/mcd	60.8	73.3

破坏了原来的电流扩展作用,使电光转换效率降低了。(2)实验制作的表面图形与理论模型存在差异,腐蚀、刻蚀仪器的精度一般为 5%左右。(3)在模拟过程中引入了一些假设来简化模拟过程,并且本文模拟的是二维器件模型,而实际的器件是三维结构的,这也使得模拟结果与实验结果产生偏差。

5 结论

通过对红光 LED 表面粗化的模拟计算,分别得到腐蚀深度为 $4\mu\text{m}$,腐蚀宽度为 $2\mu\text{m}$,光强增量与图形倾角的变化关系,当倾角为 $40^\circ \pm 5^\circ$,光强可以提高 30%以上,并且通过实验使 LED 光强提高 20.56%。可见蒙特卡罗法可以很好地模拟 LED 的发光特性,表面粗化可以有效地提高 LED 的光提取效率,粗化的形状和尺寸

直接影响着粗化后的结果。

参考文献

- [1] Streubel K, Linder N, Wirth R, et al. High brightness AlGaInP light-emitting diodes. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2002, 8(2):323
- [2] Lee S J. Analysis of light-emitting diodes by Monte Carlo photon simulation. *Appl Opt*, 2001, 40(9):1430
- [3] Zabelin V, Zakheim D A, Gurevich S A. Efficiency improvement of AlGaInN LEDs advanced by ray-tracing analysis. *IEEE J Quantum Electron*, 2004, 40(12):1675
- [4] Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Liu Jinsong. *Physical optics and applied optics*. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Publisher, 2000; 28, 279 (in Chinese) [石顺祥, 张海兴, 刘劲松. *物理光学与应用光学*. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000; 28, 279]

Effects of Surface Texture on the Light Emission of Red LEDs^{*}

Song Xiaowei[†], Li Jianjun, Han Jun, Deng Jun, Chen Yixin, Sun Hao, Jiang Wenjing, and Shen Guangdi

(*Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*)

Abstract: This paper will discuss the influence of the surface texture on the optical properties of LEDs by using the Monte Carlo method to simulate two dimensional red LEDs. The surface texture, which has a $4\mu\text{m}$ etching depth, $2\mu\text{m}$ etching width, 40 degree obliquity, and $2\mu\text{m}$ cycle, is formed by chemical etching. The experimental result indicates that the light-intensity increased by 20.56%. After analyzing the result of this simulation and experiment, we conclude that this method of introducing the surface texture has an effective impact on the light-intensity of LEDs

Key words: surface texture; Monte Carlo; light-emitting diode

PACC: 0710C

Article ID: 0253-4177(2008)07-1365-04

^{*} Project supported by the Talent Promoting Education Plan of Beijing, the National Natural Science Foundation of China (No. 60407009), the Natural Science Foundation of Beijing (No. 4032007), and the Beijing Municipal of Education Commission

[†] Corresponding author. Email: davidsung1983@gmail.com

Received 24 December 2007, revised manuscript received 22 January 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics