

利用介质光子晶体提高红光发光二极管的光通量的研究*

徐昕伟[†] 崔碧峰 朱彦旭 郭伟玲 李伟国

(北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100124)

(2011年10月12日收到; 2012年1月16日收到修改稿)

本文利用光子晶体的光栅衍射原理, 在发光二极管 (light emitting diode, LED) 上制作了光子晶体结构以提高出光效率. 在红光 LED 器件中引入了 SiO₂ 层的介质光子晶体结构, 并进行了相应的理论分析和实验验证. 结果表明: 介质光子晶体结构对于提高红光 LED 器件的光提取效率有显著效果, 引入介质光子晶体后, 红光 LED 的光通量比普通 LED 增加了 26%.

关键词: LED, 介质光子晶体, 光通量

PACS: 42.70.Qs, 51.70.+f, 78.68.+m

1 引言

LED (light emitting diode) 即发光二极管, 它利用半导体芯片作为发光材料, 当其两端加上正向电压时, 半导体中的载流子复合, 发射光子并释放能量. 它在交通灯、汽车尾灯、室内装饰和景观照明等方面有着广泛的应用^[1-3].

由于半导体发光二极管材料与空气的折射率存在很大的差异, 因此大部分光会因为全反射而被限制在 LED 芯片内部无法出射, 被衬底吸收并产生热能^[4-7]. LED 的低出光效率限制了其应用范围, 如何提高其出光效率一直是科学研究的热点.

1987年, Yablonoitch 和 John 借鉴了半导体晶体及其电子带隙的概念, 分别提出了光子晶体的概念^[8]. 此后, 光子晶体就引起了不同研究领域人员的兴趣.

光子晶体是将不同折射率的介质按周期排列, 利用折射和反射原理, 使光在其中传播并由内部顺利射出, 从而解决光的出射问题^[9,10]. 光子晶

体对于 LED 出光效率方面的有利影响是^[11]: 首先, 光子晶体带隙限制了水平方向的光场传播, 提高了垂直方向上的光出射; 其次, 使对应材料发光波段的光子晶体能带位于光锥内; 最后, 类似光栅衍射结构, 起到了表面粗化的作用. 本文通过在红光 LED 的 SiO₂ 层引入介质光子晶体结构, 来提高红光 LED 的光提取效率.

2 介质光子晶体的理论分析

在实验中使用的红光 LED 的芯片结构如图 1 所示. 其中 ITO 层折射率的是 2.0. 在 ITO 层与空气的交界面上, 全反射现象将抑制入射角大于临界角的光.

全反射的临界角可以通过斯涅耳定律计算得出

$$\sin \omega_c = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

其中 n_1 是入射介质的折射率, n_2 是出射介质的折射率. 如图 2 所示, 只有发出的光角度在红外辐射

* 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (批准号: 2009AA03A1A3), 国家科技支撑计划 (批准号: 2011BAE01B14), 国家自然科学基金 (批准号: 11002013201102) 和北京市教委项目 (批准号: KM201210005004) 资助的课题.

[†] E-mail: xuxinwei@emails.bjut.edu.cn

光锥 ω_c 之内才能从 LED 中出射, 其余都被 LED 吸收并转化为热量. 在本实验中, n_1 为 ITO 层的折射率, 其值为 2.0; n_2 是空气的折射率, 其值为 1.0. 从 (1) 式中可以得出 $\omega_c = 30^\circ$. 这意味着只有局限在 30° 半锥角的光才能出射.

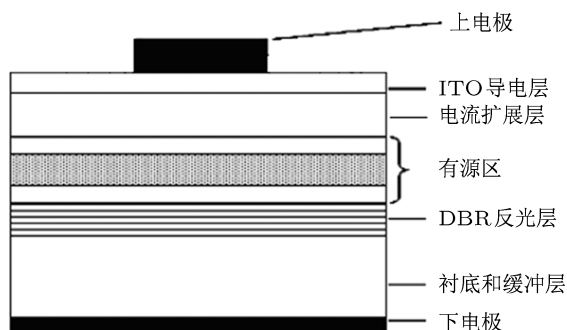


图 1 红光 LED 结构图

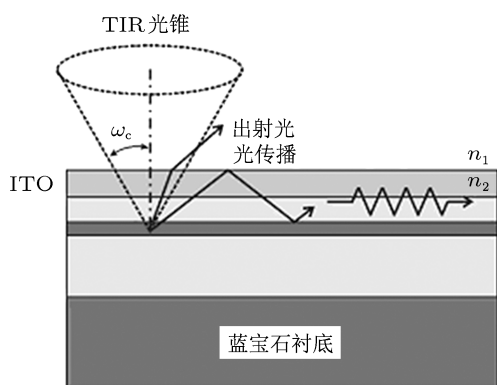


图 2 传统 LED 中的光传播

当在 ITO 层上在生长一层同样厚度的 SiO_2 层后, 根据 (1) 式, 将 n_2 代入 SiO_2 的折射率 1.45, 可得 $\omega_c = 46.5^\circ$; 再计算由 SiO_2 层出射到空气中的光, 此时 $n_1 = 1.45, n_2 = 1$, 可得 $\omega_c = 43.6^\circ$. 即只有入射角小于 43.6° 的光可以出射. 而光在 ITO 层与 SiO_2 层之间传播时, 入射角小于 46.5° 的光可以出射, 因此逆向推导得出若使入射到 SiO_2 层的光的入射角小于 43.6° 则入射到 ITO 层的光的入射角要小于 30° , 这与不生长 SiO_2 层得出的全反射临界角 30° 是一致的.

全反射的临界角可以通过在红光 LED 的 SiO_2 层引入介质光子晶体结构得以增大, 因此更多的光

线可以出射. 图 3 为红光 LED 的 SiO_2 层引入介质光子晶体后的结构图.

下面考虑如何设计介质光子晶体的结构和周期. 如图 4 所示, 六角晶格可认为与包含三个光栅的结构同周期, 每两个光栅之间的方向角为 120° ^[12]. 在图 4 中, p 为光栅周期, a 为晶格常数, 小圆圈是格点.

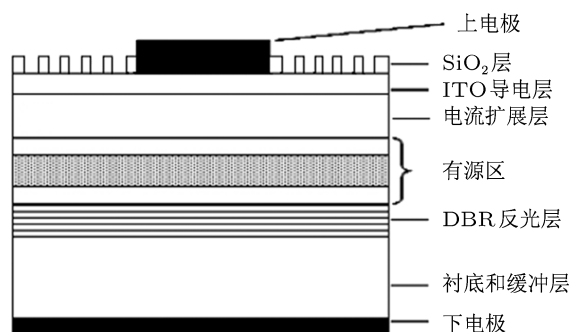


图 3 引入 SiO_2 层介质光子晶体后的红光 LED 结构图

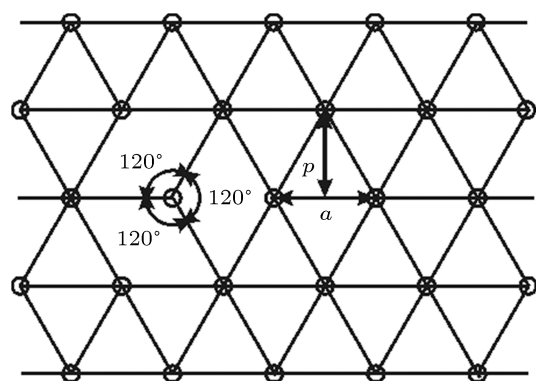


图 4 二维六角晶格示意图

p 与 a 的关系如下所示:

$$a = \frac{2\sqrt{3}}{3}p. \quad (2)$$

红光 LED 的 SiO_2 层引入介质光子晶体后的侧视图如图 5 所示. 这里的 α_1 和 α_2 所示的分别是入射角和出射角, p 是光栅周期. 在 SiO_2 层内, 当 LED 中光的入射角大于全反射的临界角时可以从器件中衍射出来. 如果具有适当的晶格常数, 即使是光

的入射角 α_1 接近 90° 也可以从表面出射. 这可以通过下面的分析解释.

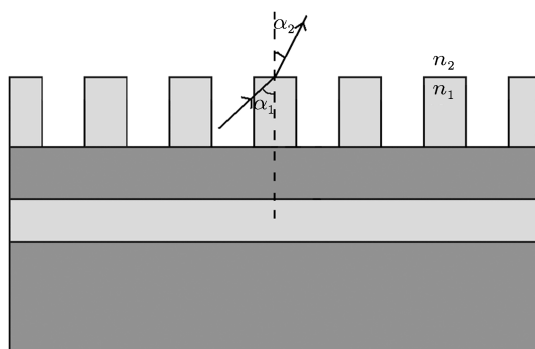


图5 SiO₂层中引入介质光子晶体后的LED侧视图

光栅衍射公式为

$$n_1 \sin \alpha_1 - n_2 \sin \alpha_2 = m \frac{\lambda}{p}, \quad (3)$$

其中 m 为衍射倍数, 这里只考虑当 $m = +1$ 时的情况. 在本实验中 $n_1 = 1.5, n_2 = 1.0$, (3) 式变为

$$p = \frac{\lambda}{1.5 \sin \alpha_1 - \sin \alpha_2}. \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (2) 式得出

$$a = \frac{2\sqrt{3}\lambda}{3(1.5 \sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)}. \quad (5)$$

由于光的衍射角小于 $\pm 90^\circ$, 我们可以分别设 $\alpha_2 = +90^\circ$ 和 $\alpha_2 = -90^\circ$, 通过相关计算得出 a 的最大值和最小值为

$$a_{\max} = \frac{2\sqrt{3}\lambda}{3(1.5 \sin \alpha_1 - 1)}, \quad (6)$$

$$a_{\min} = \frac{2\sqrt{3}\lambda}{3(1.5 \sin \alpha_1 + 1)}. \quad (7)$$

为了确保光能从 LED 中射出, 介质光子晶体的晶格常数 a 必须满足 $a_{\min} < a < a_{\max}$. 代入 $\lambda = 620 \text{ nm}$, 得 $a_{\max} = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$, $a_{\min} = 0.7 \text{ }\mu\text{m}$; $p_{\max} = 1.24 \text{ }\mu\text{m}$, $p_{\min} = 0.62 \text{ }\mu\text{m}$.

考虑到如果设计尺寸过小, 光刻将无法实现, 因此本实验中分别取 $m = 8$ 和 $m = 4$, 设计三种光子晶体结构. 计算得出的当 $m = 8$ 时, $4.96 < p < 9.92$; 当 $m = 4$ 时, $2.48 < p < 4.96$. 最终设计方案如下: 第一种是光栅周期为 $8.4 \text{ }\mu\text{m}$

的方形结构, 第二种是光栅周期为 $8.4 \text{ }\mu\text{m}$ 的三角形结构, 第三种是光栅周期为 $4.2 \text{ }\mu\text{m}$ 的方形结构.

3 引入介质光子晶体结构的红光 LED 芯片的制备

本文采用光刻法在 SiO₂ 层上刻蚀出光子晶体结构. 主要工艺步骤如下:

- 1) 外延片清洗;
- 2) 生长 ITO 层;
- 3) 生长 SiO₂ 层, 生长正面电极;
- 4) 在 SiO₂ 层上分别进行三种光子晶体结构的套刻, 以形成光子晶体的图样;
- 5) 去胶清洗;
- 6) 磨片, 生长背面电极, 合金.

本实验设计了三种光子晶体结构, 第一种是光栅周期为 $8.4 \text{ }\mu\text{m}$ 的方形结构, 第二种是光栅周期为 $8.4 \text{ }\mu\text{m}$ 的三角形结构, 第三种是光栅周期为 $4.2 \text{ }\mu\text{m}$ 的方形结构. 介质光子晶体表面结构如图 6 所示.

4 测试结果及分析

将使用普通结构的红光 LED 与分别引入了三种不同的介质光子晶体结构的红光 LED 进行光电参数的测试, 上图为测试结果. 该结果表明: 引入了介质光子晶体结构的红光 LED 与使用普通结构的红光 LED 相比, 其光通量均有所增加. 当加正向电流 20 mA 时, 引入周期为 $8.4 \text{ }\mu\text{m}$ 的方形阵列介质光子晶体的 LED 光通量增加了 8.5% ; 引入周期为 $8.4 \text{ }\mu\text{m}$ 的三角阵列介质光子晶体的 LED 光通量增加了 15% ; 引入周期为 $4.2 \text{ }\mu\text{m}$ 的方形阵列介质光子晶体的 LED 光通量增加了 26% . 这是因为从光子晶体排列考虑, 三角阵列比方形阵列能更有效提高 LED 的光提取效率; 从周期大小考虑, 小周期比大周期能更有效提高 LED 的光提取效率. 以上实验结果表明在 LED 中引入介质光子晶体结构可以有效提高 LED 的光提取效率. 另外, 在 LED 中引入介质光子晶体结构后, 由于光提取更加充分, 发热减小, 其线性度明显改善.

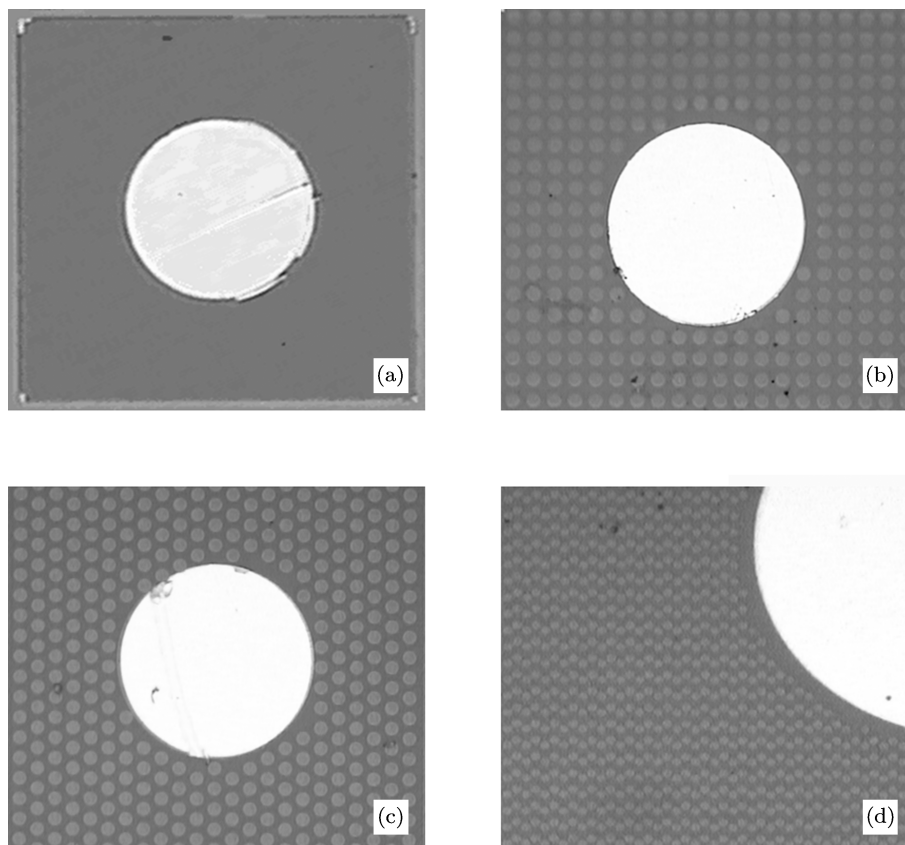


图 6 介质光子晶体表面结构图 (a) 不含光子晶体; (b) 光栅周期为 $8.4 \mu\text{m}$ 的方形结构; (c) 光栅周期为 $8.4 \mu\text{m}$ 的三角型结构; (d) 光栅周期为 $4.2 \mu\text{m}$ 的方形结构

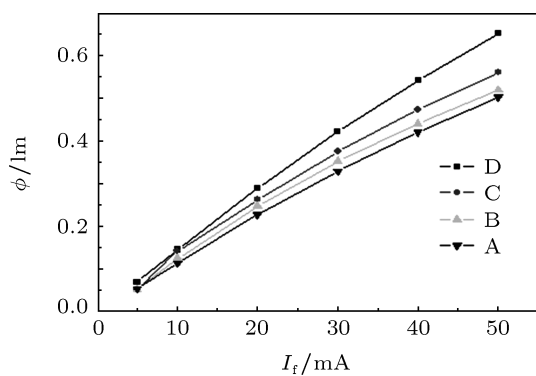


图 7 红光 LED 通电后电流与光通量的关系图 A 为不含光子晶体; B 为光栅周期为 $8.4 \mu\text{m}$ 的方形结构; C 为光栅周期为 $8.4 \mu\text{m}$ 的三角型结构; D 为光栅周期为 $4.2 \mu\text{m}$ 的方形结构

5 结论

本文对在红光 LED 中引入介质光子晶体结构进行了理论分析、相关结构设计以及实验的验证. 利用介质光子晶体光栅衍射原理, 能有效提高红光 LED 的光提取效率. 引入周期为 $4.2 \mu\text{m}$ 的方形阵列介质光子晶体后, 其光通量增加了 26%.

感谢北京工业大学光电子技术实验室的老师和青年技术人员在实验上给予的支持和帮助.

[1] Aurelien David, Henri Benisty, Claude Weisbuch 2007 *Journal of Display Technology* **3** 133
 [2] Zhang J M, Zou D S, Xu C, Zhu Y X, Liang T, Da X L, Shen G D 2007 *Chin. Phys.* **16** 1135

[3] Lu H M, Chen G X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 037807
 [4] Szymanska N H, Hughesa F, Pike E R 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 69
 [5] Matterson B J, Lupton J M, Safonov A F 2001 *Adv Mater* **13** 123
 [6] Zhang J M, Zou D S, Xu C, Guo W L, Zhu Y X, Liang T, Da X L,

- Li J J, Shen G D 2007 *Chin. Phys.* **16** 3498
- [7] Zhang Y Y, Fan G H 2011 *Chin. Phys. B* **20** 078504
- [8] Fan S H, Joannopoulos P R V J D, Schubert E F 2001 *Proceedings of SPIE* **3002** 67
- [9] Luo S J 2009 *Science Union Forum* **7** 84 (in Chinese) [罗世俊 2009 科协论坛 7 84]
- [10] Chen Jian, Li Xiaoli, Li Haihua, Wang Qingkang 2009 *Chin. Phys. B* **18** 6216
- [11] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D 2000 *IEEE J. Quantum Electron* **36** 1123
- [12] Zhang X S, Liu S, Ren X C, Liu Y, Chen X Y 2008 *Proceedings of SPIE* **6353** 30

Research of dielectric photonic crystal on red LED to increase luminous flux*

Xu Xin-Wei[†] Cui Bi-Feng Zhu Yan-Xu Guo Wei-Ling Li Wei-Guo

(Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 12 October 2011; revised manuscript received 16 January 2012)

Abstract

According to the photon grating diffraction principle, the extraction efficiency of LED with photonic crystal can be improved. In this paper, the dielectric photonic crystal is introduced into the SiO₂ layer of the red LED to improve the extraction efficiency. The theoretical analyses and experimental results show that the LED with dielectric photonic crystal can well achieve the extraction efficiency. The luminous flux of new type LED is improved by 26% compared with the normal red LED.

Keywords: LED, dielectric photonic crystal, luminous flux

PACS: 42.70.Qs, 51.70.+f, 78.68.+m

* Project supported by the 863 Program (Grant No. 2009AA03A1A3), the National Key Technologies Research and Development Program (Grant No. 2011BAE01B14), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11002013201102), and the Scientific Research Project of Beijing Educational Committee (Grant No. KM201210005004).

[†] E-mail: xuxinwei@emails.bjut.edu.cn