

# 表面为二维光子晶体结构的 AlGaInP 系 发光二极管的研究\*

陈依新<sup>1)†</sup> 郑婉华<sup>2)</sup> 陈 微<sup>2)</sup> 陈良惠<sup>2)</sup> 汤益丹<sup>1)</sup> 沈光地<sup>1)</sup>

1) (北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100124)

2) (中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2009 年 12 月 17 日收到; 2010 年 3 月 5 日收到修改稿)

近年来, GaN 基光子晶体发光二极管(light emitting diode, LED)的研究已经取得了一定的进展, 利用光子晶体的光子带隙效应和光栅衍射原理, 在 LED 上制作光子晶体结构将会提高出光效率. 本文为了提高 AlGaInP 系 LED 的光提取效率, 分析了常规 LED 光提取效率受到限制的原因, 将光子晶体结构引入了 AlGaInP 系 LED 的器件结构设计, 通过理论分析与实验验证, 结果显示: 光子晶体结构对于提高 AlGaInP 系 LED 的光提取效率同样起到了明显的效果, 引入光子晶体后, LED 的输出光强比常规结构 LED 平均提高了 16%.

**关键词:** AlGaInP 系 LED, 光子晶体, 光提取效率, 光强

**PACC:** 7280E, 7360F, 7155E, 7360L

## 1. 引 言

目前, 利用金属有机物气相淀积(MOCVD)技术在 GaAs 衬底上生长 AlGaInP 材料系的波长覆盖黄色到红色的 LED 已经成为一个可靠而普遍的选择, 其应用领域包括: 交通灯、信号灯、汽车灯、景观灯、全彩室内外显示屏、背光源, 甚至通用照明等<sup>[1]</sup>. 这些年来, GaAs 基 AlGaInP 系外延材料的生长已基本成熟, 可以使得 AlGaInP 系 LED 的内量子效率接近 100%, 可是其外量子效率却一直很低, 通常不到 5%, 主要原因之一就是外延材料的折射率与空气折射率有着很大的差距, 通常情况下, 由于 Snell 定律的存在, 有源区产生的光子只有将近  $1/4n^2$  的部分能够从表面或侧面发射到体外,  $n$  表示半导体材料的折射率<sup>[2]</sup>, 如对于 GaAs,  $n = 3.9$ , 只有入射角  $17^\circ$  的光子能发射到体外(约 2%, 若有源区下面有高反射层, 如 DBR, 则可达 4%), 其余的光子因不能发射到体外, 在体内被吸收而且转变成热, 导致器件性能下降. 因此, 获得高性能 AlGaInP 系 LED 的关键途径是提高器件的光提取效率. 在介电系数

呈周期性排列的三维介电材料中, 由于存在周期性, 在其中传播的光波的色散曲线将成带状结构, 带与带之间有可能会出类似于半导体禁带的光子带隙(photonic band gap)<sup>[3]</sup>. 光子晶体(photonic crystal)就是多种介质周期排列而成的有光子带隙的人工晶体<sup>[4]</sup>. 光子晶体是折射率呈周期性的结构, 可以从能带角度上对光场进行调制. 光子晶体对于 LED 出光效率的有几个方面的有利影响<sup>[5]</sup>: 光子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; 使对应材料发光波段的光子晶体能带位于光锥内; 类似光栅衍射结构, 起到表面粗化的作用. 本文通过在 LED 器件中引入二维光子晶体结构, 利用上述有利影响来提高 AlGaInP 系 LED 的光提取效率.

## 2. 理论分析

在 LED 表面 GaP 上刻蚀规则的可见光波长量级的周期孔状结构, 即形成了空气-GaP 的周期介电结构. 通过设计空气孔的大小, 孔与重复周期的比例, 可以在平行于量子阱方向的光子带隙. 即在

\* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA03A121, 2008AA03Z402), 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB604902, 2006CB921705), 北京市自然科学基金(批准号: 4092007)资助的课题.

† E-mail: cheniyixin\_410@emails.bjut.edu.cn; whzheng@semi.ac.cn

平行于衬底的方向上,光子无法传播,使光子只能由垂直于衬底的方向出射,减少了光子在 LED 芯片内的传播和耗散,从而实现了 LED 外量子效率的提高,通过光致发光实验,理论上可以提高 LED 的光提取效率 2 倍多<sup>[6]</sup>. 本文采用三维有限时域差分 (finite difference time domain, FDTD) 的方法来对光子晶体结构进行设计,由于光子晶体对 LED 的影响是多方面的,因此对于光子晶体周期和孔径的设计可以有较大的范围. 主要研究了 200 nm 到 2  $\mu\text{m}$  周期的光子晶体在不同深度下的光提取效率的增强效果,表 1 和表 2 (光子晶体周期为  $a$ , 深度为  $d$ , 增强因子为  $f$ ) 为理论分析的计算结果,表明光子晶体

的引入会提高 LED 的光提取效率,结果显示:在小周期光子晶体结构下 LED 的光提取效率具有更明显的增强效果,当  $a = 0.6 \mu\text{m}$ ,  $d = 0.6 \mu\text{m}$  时,获得最大的光提取效率增加,其幅度可达到 54%,大大地提高了 LED 的光提取效率.

表 1 较大周期下出光效率的增强因子(单位: $\mu\text{m}$ )

$f$	$a = 0.8$	$a = 1$	$a = 1.5$	$a = 2$
$d = 0.2$	1.34	1.12	1.23	1.08
$d = 0.4$	1.03	1.12	1.22	1.01
$d = 0.6$	1.00	1.05	0.88	0.98
$d = 0.8$	1.01	1.01	0.73	0.97

表 2 较小周期下出光效率的增强因子(单位: $\mu\text{m}$ )

$f$	$a = 0.2$	$a = 0.25$	$a = 0.3$	$a = 0.35$	$a = 0.4$	$a = 0.45$	$a = 0.5$	$a = 0.6$	$a = 0.7$
$d = 0.2$	1.21	1.23	1.23	1.32	1.29	1.31	1.24	1.4	1.34
$d = 0.4$	1.27	1.36	1.31	1.32	1.28	1.28	1.25	1.42	1.03
$d = 0.5$	1.19	1.37	1.27	1.31	1.38	1.41	1.24	1.23	1.29
$d = 0.6$	1.12	1.35	1.32	1.33	1.51	1.38	1.36	1.54	1
$d = 0.7$	1.14	1.36	1.32	1.44	1.37	1.31	1.35	1.5	1.1
$d = 0.8$	1.22	1.29	1.3	1.37	1.41	1.41	1.42	1.41	0.97

### 3. 二维光子晶体表面结构 LED 芯片的制备

光子晶体的制作一般采用以下四种方法:1) 电子束光刻和感应耦合等离子体干法刻蚀 (ion coupling plasma, ICP) 相结合的技术,具有波长短、分辨率高、焦深长、易于控制和修改灵活等优点,且不受衍射效应的限制,但光刻速度相对较低、效率低而且制作区域小,适合于科学研究<sup>[7]</sup>;2) 激光全息光刻法,利用光的干涉和衍射特性,通过特定的光束组合方式,来调控干涉场内的光强度分布,并用感光材料记录下来,从而产生光刻图形.3) 干法刻蚀法,用 SiN 作为掩膜层,先利用光刻工艺将图形转移到光刻胶上,再用 RIE 将图形转移到 SiN 层,最后利用 ICP 将图形转移到表面上<sup>[8]</sup>.4) 纳米压印光刻技术,采用激光束或电子束的方法将结构复杂的纳米结构图案制作在模板上,然后用预先图案化的模板使聚合物材料变形,进而在聚合物上形成图案结构的一种微纳加工方法,主要包括热压印、紫外压印和微接触印刷等<sup>[9]</sup>.

本文采用的是电子束曝光和 ICP 刻蚀相结合的技术.光子晶体的尺寸必须在波长量级才能对相应

的光场起调制作用,由于制备的 AlGaInP 系红光 LED,光子晶体的尺度在百纳米量级,普通光学曝光达不到要求的精度,故需采用精度更高的电子束曝光.采用了 Raith 150 电子束曝光机,可达精度为 20 nm. 另外,图形转移方面,采用了 ICP 刻蚀设备将电子束胶上的图形转移到 GaP 材料上.具体制备工艺步骤如下:

1) 外延片清洗,电子束胶(电子抗蚀剂)的涂覆;

2) 在台面上进行电子束图形的套刻,经过电子束扫描过的电子抗蚀剂发生分子链重组,使曝光图形部分的抗蚀剂发生化学性质改变,以形成光子晶体的图样;

3) 显影和定影,获得高分辨率的电子抗蚀剂曝光图形;

4) 图形转移,利用 ICP 设备在 GaP 窗口层刻蚀出光子晶体图样;

5) 去胶清洗,完成光子晶体的制作.

本实验设计了两种周期结构的光子晶体,一种周期为 1.5  $\mu\text{m}$ ,另一种周期为 0.8  $\mu\text{m}$ ,填充因子均为 0.3,由于表面 GaP 较薄,ICP 刻蚀深度不能太深,为了避免破坏表面的横向电流扩展,光子晶体

的深度设定为  $d = 0.3 \mu\text{m}$ . 从 1000 倍放大显微镜下观察,光子晶体的表面结构示意图分别为:图 1(a)

周期为  $1.5 \mu\text{m}$  和图 1(b)周期为  $0.8 \mu\text{m}$  的光子晶体,所制备的光子晶体的表面结构满足设计的要求.

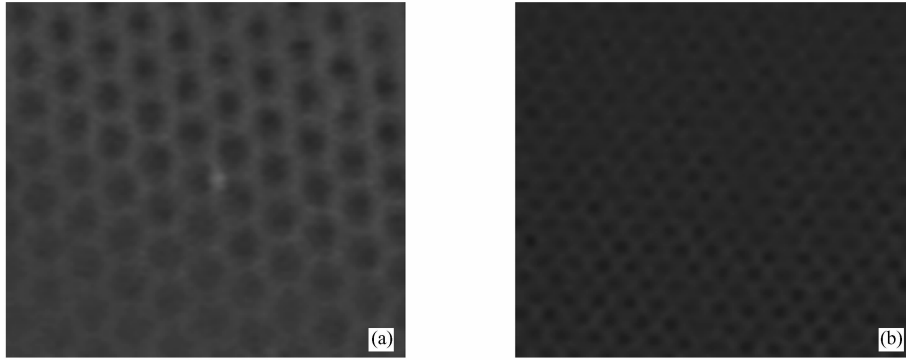


图 1 不同周期的光子晶体表面示意图 (a)  $1.5 \mu\text{m}$  周期;(b)  $0.8 \mu\text{m}$  周期

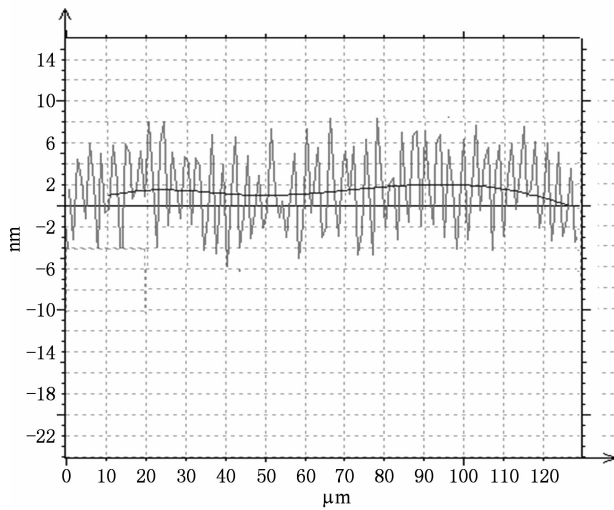


图 2 光子晶体结构表面平整度的分析

在台阶仪上进行表明平整度测量,结果如图 2 所示:扫描范围  $120 \mu\text{m}$  时,高低差距最大为  $13 \text{ nm}$ ,拟合曲线模拟的是表面的平整度,平均高低差小于  $2 \text{ nm}$ ,表面具有光子晶体结构的 GaP 表面具有较好的平整度,仅在 GaP 表面下形成了光子晶体结构,

对材料表面几乎没有产生损坏.

将带有表面光子晶体结构的外延片进行芯片工艺的制备,首先蒸镀上一层薄的 ITO 导电光增透膜,主要是为了增强电流扩展层的电流,同时由于 ITO 的折射率处于半导体与空气之间,可以提高 LED 的出光效率,然后再分别制备 p 型 AuZnAu 和 n 型 AuGeNi 金属电极并退火,切割成单个管芯,管芯周期为  $200 \mu\text{m}$ ,具有光子晶体结构的 LED 制备完成,其结构如图 3(b)所示.为了进行对比,以验证光子晶体结构对 LED 光提取效率的影响,我们制备了具有相同外延结构的常规 LED 作为对比,唯一的区别是常规 LED 没有引入光子晶体结构,其结构如图 3(a)所示.

### 4. 测试结果与分析

将常规 LED 及具有光子晶体结构的 LED 进行光电性能的测试分析,表 3 是常规 LED 及光子晶体 LED 的电-光性能对比测试结果:引入光子晶体后,LED 的正向电压较常规 LED 稍微有所增加,平均增

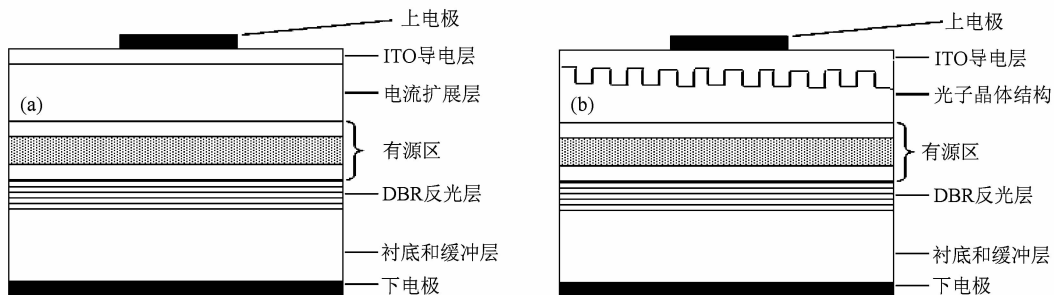


图 3 LED 结构示意图 (a) 常规结构;(b) 光子晶体结构

表 3 常规 LED 及光子晶体 LED 的电-光性能对比结果

类型	指标			
	电压/V	光功率/mcd	光强/mcd	主波长/nm
常规 LED	2.02	1.69	135	618.8
	2.03	1.71	129	619.2
	2.01	1.68	132	619.0
光子晶体 LED (1.5 $\mu\text{m}$ 周期)	2.08	1.86	148.6	618.7
	2.11	1.90	140.9	618.5
	2.11	1.82	146.2	619.0
光子晶体 LED (0.8 $\mu\text{m}$ 周期)	2.10	1.97	156.6	618.5
	2.13	2.01	149.8	618.7
	2.12	1.95	153.0	618.4

加了 0.08 V,原因是光子晶体的引入对电流扩展层产生了一定的影响,导致表面 GaP 的横向电阻增加,因而正向偏压略有升高;由于采用了相同的外延片结构,因此器件的发光波长几乎一致,在此基础上,我们比较了这两种结构 LED 的光功率及光强,结果显示:两种光子晶体结构 LED 较常规 LED 均有所增加,其中光子晶体周期为 1.5  $\mu\text{m}$  的 LED 平均增加了  $f_{a=1.5} = 1.10$ ,光子晶体周期为 0.8  $\mu\text{m}$  的 LED 增加得更多,平均为  $f_{a=0.8} = 1.16$ ,说明了光

子晶体结构提高了 LED 的出光效率,但与理论计算值不完全一致,第一,如图 1 所示,在光子晶体的制备时,由于工艺条件的漂移会导致工艺参数的变化,因此所制备的光子晶体图形并不像理论上的那样规整,周期为  $a = 1.5 \mu\text{m}$  和  $a = 0.6 \mu\text{m}$  的两种器件的光提取效率增强因子  $f$  都相应地下降了;第二,从理论计算和实验结果分析两方面来看, $f_{a=0.8}$  都大于  $f_{a=1.5}$ ,具有很好的方向一致性,说明了工艺的优化会进一步的提高光子晶体结构 LED 的光提取效率。

## 5. 结 论

本文对光子晶体结构 AlGaInP 系 LED 进行了理论分析、结构的设计以及实验验证,利用光子晶体的光子带隙效应和光栅衍射原理,能够提高 AlGaInP 系 LED 的光提取效率,实验结果与理论计算值保持方向上的一致性,引入光子晶体后,LED 的光提取效率及发光强度较常规结构 LED 平均提高了 16%。

感谢北京工业大学光电子实验室的刘莹、赵永东、张晓佳、李慧敏、冀立恒等对本实验的支持和帮助。

- [1] Yen C H, Liu Y J, Huang N Y, Yu K H, Chen T P, Chen L Y, Tsai T H, Lee C Y, Liu W C 2008 *IEEE Photonics Technology Letters* 1923
- [2] Kim D H, Cho C O, Roh Y G, Heonsu Jeon, Yoon Soo Park, Jaehye Cho, Jin Seo Im, Cheolsoo Sone, Yongjo Park, Won Jun Choi, Park Q H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 203508. 1-3
- [3] Ryu H Y, Hwang J K, Lee Y J, Lee Y H 2002 *IEEE J. Quantum Electron* **8** 231
- [4] Luo S J 2009 *Science Union forum* **7** 84 (in Chinese) [罗世俊 2009 科协论坛 **7** 84]
- [5] Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D 2000 *IEEE J. Quantum*

*Electron* **36** 1123

- [6] Lin H, Liu S, Zhang X S, Liu B L, Ren X C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 959 (in Chinese) [林瀚、刘守、张向苏、刘宝林、任雪畅 2009 物理学报 **58** 959]
- [7] Sajeev J 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [8] Bifeng Rong, Huub W M, Salemink, Roeling E M, Rob van der Heijden, Fouad Karouta, Emile van der Drift 2007 *J. Vac. Sci. Technol. B* **25** 2632
- [9] Hyun Kyong Cho, Junho Jang, Jeong-Hyeon Choi, Jaewan Choi, Jongwook Kim, Jeong Soo Lee, Beomseok Lee, Sun-Kyung Kim 2006 *Optics Express* **14** 8654

## AlGaInP LED with surface structure of two-dimensional photonic crystal\*

Chen Yi-Xin<sup>1)†</sup> Zheng Wan-Hua<sup>2)</sup> Chen Wei<sup>2)</sup> Chen Liang-Hui<sup>2)</sup> Tang Yi-Dan<sup>1)</sup> Shen Guang-Di<sup>1)</sup>

1) (*Beijing University of Technology and Opto-Electronic Technology Laboratory, Beijing 100124, China*)

2) (*Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(Received 17 December 2009; revised manuscript received 5 March 2010)

### Abstract

Some progress in the research of GaN based LED with photonic crystal structure has been made recently. Based on the photonic crystal's photonic band gap effect and photon grating diffraction principle, the extraction efficiency of LED with photonic crystal can be improved. In this paper, the restriction on AlGaInP LED's extraction efficiency is analyzed, and the photonic crystal is introduced in to the AlGaInP LED to improve the extraction efficiency. The theoretical analyses and the experiment results show that the output luminous intensity of LED with photonic crystal is improved by 16%, which results from some effect of the GaN based LED with photonic crystal.

**Keywords:** AlGaInP LED, photonic crystal, light extraction efficiency, luminous intensity

**PACC:** 7280E, 7360F, 7155E, 7360L

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2006AA03A121, 2008AA03Z402), the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2006CB604902, 2006CB921705), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4092007).

† E-mail: cheniyixin\_410@emails.bjut.edu.cn; whzheng@semi.ac.cn