

## 利用复合技术提高光子晶体 LED 发光效率的研究

沈晓霞<sup>1</sup> 董国艳<sup>2</sup> 任亚洲<sup>1</sup> 王新中<sup>1</sup> 周志文<sup>1</sup>  
 (<sup>1</sup>深圳信息职业技术学院电子与通信学院, 广东 深圳 518072)  
<sup>2</sup>清华大学材料学院, 北京 100084)

**摘要** 介绍了几种利用复合技术提高光子晶体 LED 出光效率的方法。利用复合技术在 LED 上形成光子晶体结构和微腔结构、全方位反射镜、图形化衬底、AlGaIn 限制层或嵌入式光子晶体层复合的结构, 可以改变 LED 的发光光路与内部导波模式分布, 有效地提高光子晶体 LED 的发光效率。以五种复合结构为例进行分析, 通过实验制备和时域有限差分(FDTD)模拟仿真, 证实了与传统 LED 结构相比, 经过适当优化参数配置, 具有复合结构的 LED 比只具有表面光子晶体的 LED 结构出光效率有显著提高。

**关键词** 光电子学; LED; 嵌入式光子晶体; 全方位反射镜; 微腔; 图形化蓝宝石衬底

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.100006

## Light Extraction Enhancement of Photonic Crystal LEDs with Complex Technology

Shen Xiaoxia<sup>1</sup> Dong Guoyan<sup>2</sup> Ren Yazhou<sup>1</sup> Wang Xinzhong<sup>1</sup> Zhou Zhiwen<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>School of Electric Communication Technology, Shenzhen Institute of Information and Technology, Shenzhen, Guangdong 518072, China)  
<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Several methods to improve the light extraction efficiency of GaN light emitting diode (LED) are introduced. These methods include fabricating a GaN LED with photonic crystal and other structures, such as microcavity, omni-directional reflector, patterned sapphire substrate, AlGaIn confining layer, and embedded photonic crystals. These structures would change the optical design of LEDs and modulate the distribution of guide modes in LEDs to improve the light extraction efficiency. From experiment demonstration and theoretical analysis of five specially designed LEDs, it is found that the characteristics of LED light emission are modulated and the LED light emission intensity is enhanced considerably compared with conventional LEDs.

**Key words** optoelectronics; LED; embedded photonic crystal; omni-directional reflector; microcavity; patterned sapphire substrate

**OCIS codes** 230.0250; 230.3670; 220.4000; 230.5298

## 1 引言

发光二极管(LED)具有功耗低、寿命长、体积小及可靠性强等优点并因而走在了绿色照明领域的前列。LED 的应用越来越广泛, 如何提高 GaN 基 LED 的发光效率也成为近年来众多研究关注的热点。一般描述 LED 的性能常用到以下几个参数: 内量子效率(IQE), 外量子效率(EQE)和光提取效率(LEE)。其中内量子效率可以定义为单位时间内有源区发出的光子数与单位时间内注入 LED 的电子数之比, 外量子效率则是单位时间内进入自由空间的光子数与单位时间内注入 LED 的电子数之比, 而光提取效率是单位时间内进入自由空间的电子数与单位时间内有源区发出的光子数之比, 它们之间的关系可以表示为  $\eta_{\text{external}} = \eta_{\text{int}} \eta_{\text{extraction}}$ 。

**收稿日期**: 2013-04-01; **收到修改稿日期**: 2013-05-07; **网络出版日期**: 2013-08-07

**基金项目**: 国家自然科学基金(60907005)、广东省自然科学基金(S2012010010030)、深圳市科技计划(CYJ20120615101957810, JCYJ20120821162230170)

**作者简介**: 沈晓霞(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光子晶体的制备与光子晶体器件方面的研究。

E-mail: shenxx@szit.edu.cn

理想的 LED 可以将每个注入有源区的电子都转化为光子,并且这些有源区的光子能够全部进入自由空间,即 EQE 为 100%,但实际上由于存在许多损耗因素,如构成 LED 半导体的材料、金属电极、衬底的光吸收、芯片和自由空间存在的折射率差形成的全反射等,使得 LED 的发光效率大幅降低。提高 LED 的发光效率即 EQE 需要提高 IQE 和 LEE。提高内量子效率主要基于增强辐射复合和减小非辐射复合几率两个方面:随着金属有机物化学气相沉积(MOCVD)外延生长技术和多量子阱(MQW)结构的发展,人们在精确控制外延生长、掺杂浓度和减少位错等方面都取得了突破,外延片的内量子效率已有很大提高。另外采用表面等离子体技术和改善电流注入技术<sup>[1]</sup>也都能够大幅度提高 LED 的内量子效率。目前 AlInGaP 基和 GaAs 基 LED 等内量子效率已接近极限,可达 100%<sup>[2]</sup>。因此 LEE 已成为制约 LED 发光效率的重要因素。

目前有大量提高 LEE 的研究,绝大部分研究主要基于两个原理:1)调整 LED 的出光结构,如采用表面改性技术<sup>[3]</sup>、倒装芯片技术<sup>[4]</sup>、衬底剥离技术、异性芯片技术<sup>[5]</sup>、图形化衬底技术<sup>[6]</sup>以及光子晶体(PhC) LED 结构等<sup>[7-12]</sup>;2)改变芯片内部的自发辐射,如利用光学微腔效应、表面等离子体激元共振技术以及光子晶体结构等。光子晶体是由折射率不同的介质周期性排列所组成的特殊结构,在 LED 表面作用相当于衍射光栅,可以将 LED 的传导模式耦合出去,以此提高 LEE;同时若将 PhC 置于 LED 有源层附近,也可以利用其能带特性抑制 LED 内的传导模式,并增大有源层内的自发辐射率,因此在 LED 中采用光子晶体结构可以同时通过上述两种途径提高 LED 的 LEE,且能更好地控制出射光的外场分布。若在使用其他技术的 LED 结构的基础上再制作光子晶体结构,能够更多地提高 LED 的出光效率。因此,本文将介绍多种基于光子晶体和其他技术复合而实现的高出光效率 LED。

## 2 表层光子晶体与微腔结构在 LED 中的使用

光学微腔可以提高 LED 的光提取效率<sup>[13]</sup>。图 1(a)所示为厚度很薄的 GaN 层与底部反射镜(Ag 或者 Al)形成的微腔 LED,有源层发出的光束在腔内多次来回反射,只有一定频率的光满足干涉相长的条件,这些光波模式的密度增大,抑制其他波长的模式密度,从而提高了与共振波长相当的模式在有源区的自发辐射率。如图 1(a)所示的结构,在表层刻蚀光子晶体结构后,获得的最大 LEE 可达 40%。

由于微腔的传导模式与 PhC 的能带分布在很大范围内都有重叠,使得绝大部分在 LED 中的导波模式都可以被 PhC 耦合出去。因此 LED 中的微腔效应与 PhC 的衍射效应互不影响,可以同时起作用。含有微腔结构的光子晶体 LED,主要有三个因素影响 LEE: 1)量子阱所在的位置;2)光学微腔的厚度,即 GaN 薄层的厚度;3)底部反射镜的选择。如图 1(a)所示的结构,经计算分析在 GaN 层厚度为 110 nm,量子阱(QW)层距离空气界面 11 nm 时,可获得最高的 LEE。但这种结构的缺点是 Ag 金属层对传导模式的吸收损耗,为了克服这个缺点可以在反射金属和 GaN 缓冲层间加入折射率较低的透明传导材料作为中间层[如氧化铟锡(ITO),折射率约为 2.1,小于 GaN 折射率],如图 1(b)所示的结构获得的最大 LEE 达到 73%。

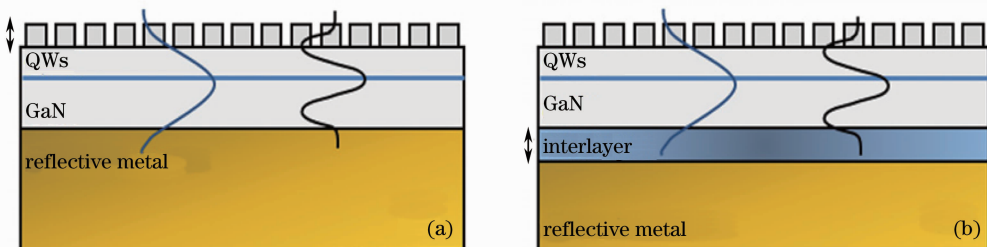


图 1 含有微腔结构与表面光子晶体的 LED 结构示意图。(a)金属材料作为反射层;(b)在 GaN 缓冲层与金属层间置入 ITO 夹层的微腔 LED

Fig. 1 Schematic of the microcavity LED with surface PhCs. (a) PhC LED with reflective metal; (b) PhC LED with ITO interlayer to reduce the metal absorption

## 3 光子晶体与全方位反射镜在 LED 中的使用

全方位反射镜(ODR)近年来也广泛地应用在 LED 结构中,相较分布式布拉格反射镜(DBR),ODR 具有

高反射率、宽光谱范围和对各个入射角均有较高反射率等优点。如图 2 所示,ODR 结构由一层半导体材料、一层折射率较低的介质材料和一层金属材料构成(折射率分别为  $n_s$ 、 $n_i$ 、 $N_m = n_m + ik_m$ )。这种三层的 ODR 可以看作 DBR 与金属的复合反射镜,和 DBR 相同,反射镜的反射率、光谱范围由两种介质材料的折射率之差决定,折射率差别越大,ODR 的反射特性越好,因此可以通过降低  $n_i$  来增大介质间的折射率差,从而提高全方位反射镜的反射特性。在制作 LED 结构时,将 ODR 设置在有源层与衬底之间,可将绝大部分有源层发出的底向光反射回上表面,再通过表层光子晶体耦合成出射光,从而降低衬底和电极等材料的损耗,进一步提高光子晶体 LED 的光提取效率。另外一种 ODR 由周期性排列的  $\text{TiO}_2$  层和  $\text{SiO}_2$  层组成,这种 ODR 类似于二维光子晶体结构,当有源区发出的光频率位于 ODR 的禁带中时,对于所有偏振和所有入射角度的光,ODR 都会起到全反射的作用。相比具有 DBR 结构的 LED 结构,ODR 可以使 LED 的光提取效率提高 80%<sup>[14]</sup>。

在图 3 所示的具有表面二维光子晶体的 LED 示意图中<sup>[15-16]</sup>,集成了  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  ODR 结构。LED 依次由 230 nm 厚的 Si 掺杂 n 型 GaN 缓冲层、InGaN-GaN MQW 有源层、230 nm 厚的 Mg 掺杂的 p 型 GaN 层、300 nm 厚的 ITO 组成的透明导电层以及 14 对  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  组成的 ODR(在波长为 430 nm 时, $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的折射率分别为 2.52 和 1.48)组成。光子晶体结构通过电子束刻蚀法制作在表层 n-GaN 中,光子晶体周期为 209 nm,空气柱直径约 110 nm,刻蚀深度为 170 nm。利用时域有限差分(FDTD)算法对只采用表面光子晶体结构的 LED 和同时采用表面光子晶体和复合 DBR 作为 ODR 的 LED 进行仿真,结果发现采用表面光子晶体结构,可将 LED 的辐射场强提高 2.2 倍;而在有源层和衬底间加入 ODR 结构后,LED 的光提取效率进一步提高,辐射光功率最大增至 3.4 倍。

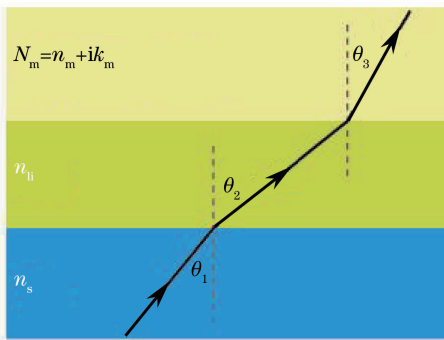


图 2 三层 ODR 结构示意图

Fig. 2 Schematic of triple-layer omni-directional reflector

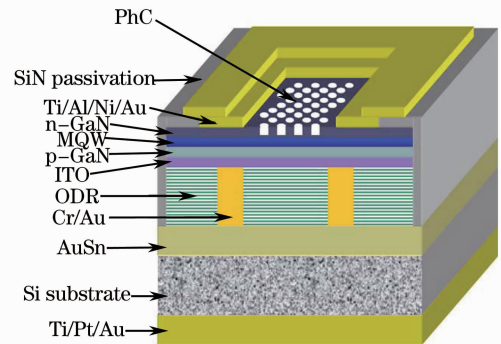


图 3 具有 ODR 的光子晶体 LED 结构示意图

Fig. 3 Schematic of LED with both PhC and ODR

#### 4 光子晶体与图形化衬底在 LED 中的使用

GaN 基 LED 的衬底材料主要有蓝宝石 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、Si 和 SiC。与 SiC 和 Si 相比,蓝宝石的生产技术成熟、稳定性佳,能够运用在高温生长过程中,并且机械强度高,易于处理。但由于它与 GaN 之间存在晶格失配(失配率约为 16%)和热应力失配(蓝宝石和 GaN 的热膨胀系数分别为  $7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  和  $5.59 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ),造成 GaN 外延层在生长过程中产生大量缺陷,致使 LED 的内量子效率较低;与此同时,GaN 与空气间存在全反射现象,又大大削弱了 LED 的外量子效率。针对这两方面的难题,研究人员不断提出解决方案,近期发展起来的图形化衬底技术<sup>[17-25]</sup>则显示了较好的优势。该技术是在蓝宝石衬底上做出具有细微图形结构的图形化蓝宝石衬底(PSS),然后外延生长 GaN。一方面,它能通过降低外延层应力改善晶体生长性能,提高 LED 的内出光效率;另一方面,还能提高 LED 出射光的接触面逸出角,从而提高外出光效率。而随着图形化衬底技术越来越成熟,特别是纳米压印技术<sup>[21-22]</sup>的出现,最近很多研究者将图形化衬底和光子晶体技术相结合,可以得到更高的出光效率。

图 4 所示为具有图形化蓝宝石衬底和表面光子晶体的 LED 结构,在制作过程中,首先通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)将  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  淀积在 ITO 层上, $\text{SiO}_2$  层厚度约为 70 nm, $\text{Si}_3\text{N}_4$  层的厚度根据

制作表面光子晶体高度的需要设定在  $100\sim 900\text{ nm}$  之间。然后通过紫外纳米压印技术在  $\text{SiN}_x$  层上制作二维正方结构光子晶体(光子晶体中介质柱直径  $a=300\text{ nm}$ , 周期  $d=600\text{ nm}$ ), 光子晶体的高度  $h$  与  $\text{SiN}_x$  层厚度一致。图形化衬底中微透镜形状的颗粒呈六角结构排布, 直径约为  $2\text{ }\mu\text{m}$ , 周期约  $3\text{ }\mu\text{m}$ , 高  $1\text{ }\mu\text{m}$ 。为了分析 PSS 和表层 PhC 对 LED 出光效率的影响, 使用 FDTD 法模拟了三种结构的出光效率: 1) 传统的 LED 结构; 2) 具有 PSS 的 LED 结构; 3) 同时具有 PSS 和表面  $\text{SiN}_x$  基 PhC 的 LED 结构, 如图 5 所示, 其中 PhC 的厚度为  $100\sim 900\text{ nm}$ 。通过模拟计算, 发现具有 PSS 的 LED 的光提取效率较传统 LED 提高了  $18.75\%$ 。而在 LED 表层制作二维正方光子晶体结构后, LED 的出光效率更有了明显提高, 其中当 PhC 的高度为  $300\text{ nm}$  时, LED 的出光效率较传统 LED 提高了  $36.33\%$ 。虽然在 FDTD 模拟时, 由于并没有考虑出射光子的循环和再吸收, 仿真结果会稍有偏差, 但依然可以证明, 图形化蓝宝石衬底技术和光子晶体技术相结合可以较好地提高 LED 的出光效率。

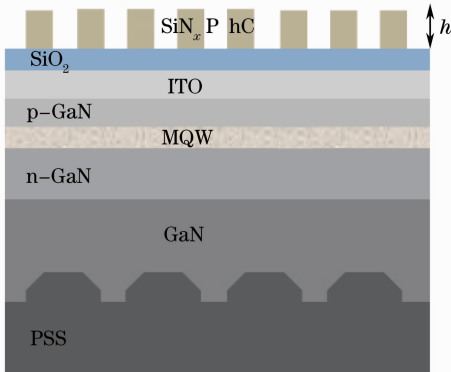


图 4 具有 PSS 和表面 PhC 的 LED 结构示意图  
Fig. 4 Schematic of LED with PhC and patterned sapphire substrate

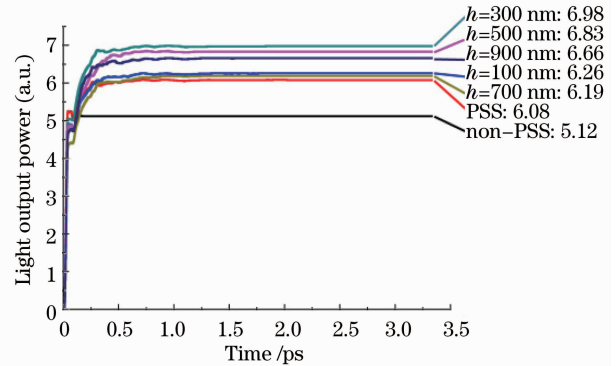


图 5 FDTD 模拟传统 LED、只具有 PSS 的 LED、具有 PSS 和表面  $\text{SiN}_x$ -PhC 三种结构的光提取效率  
Fig. 5 FDTD simulation results on light extraction efficiency of the conventional LED

此外图形化衬底按照图形的尺寸可以划分为微米级 PSS(MPSS, 线条尺寸为微米级)和纳米级 PSS(NPSS, 线条尺寸为纳米级)。MPSS 和 NPSS 在制作方法上的不同主要体现在掩蔽层图形的制作上, NPSS 的掩蔽层制作主要有三种方法: 纳米压印、自组装和纳米球光刻, 而 NPSS 的图形形状主要有纳米柱、金字塔、纳米洞。很多实验和理论表明, NPSS 对 LED 光提取效率的提高更为有效<sup>[26-27]</sup>, 这也是我们以后工作的方向。

## 5 使用光子晶体与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 限制层来提高 LED 的提取效率

表面光子晶体在 LED 结构中类似于衍射光栅, 主要是对 LED 中的高阶模式起作用, 但仍然有  $40\%$  以上的低阶模式不能被有效地提取出射, 因此 LED 的光提取效率并不能显著地提高。若将折射率低于 GaN 的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  限制层置于有源层下方, 则可以将一部分低阶模式的传导波限制在距离表面光子晶体较近的区域, 增大表层光子晶体对低阶模式的提取, 从而提高 LED 的光提取效率。

图 6 为含有  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  限制层的光子晶体 LED 示意图, 含有  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  限制层的 LED 结构中的光波模式分为四种: 高阶模式, 覆盖层模式(CLM), 低阶模式(这种模式只在底层 GaN 材料内传导)以及衬底模式(主要在衬底中传导)。  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  限制层将一部分低阶模式的光波耦合到限制层中, 称为覆盖层模式, 这些模式抑制了有源层能量向低阶模式的转化, 并且更容易被表层光子晶体结构提取成出射波。限制层中 Al 元素的含量越高、限制层的厚度越大, 就有越多的低阶模式会被耦合到限制层中, 但随着  $\text{AlGa}_{1-x}\text{N}$  的厚度的增大也会导致  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  与 GaN 间产生越来越多的位错, 从而影响 LED 的内量子效率, 因此这种方法并不能非常有效地提高 LED 的出光效率。经计算,  $600\text{ nm}$  厚的  $\text{AlGa}_{1-x}\text{N}$  限制层最多可以将  $30\%$  的低阶模式转化为覆盖层模式。为了将更多的低阶模式耦合成为出射波, 增大表面 PhC 的刻蚀深度, 如图 6(b) 所示, 计算分析得出刻蚀深度太小时, 有源区的能量大部分转化为低阶导模, 局限在 GaN 层中, 不能被表面 PhC 提取; 当刻蚀深度太大时, GaN 层内支持的导模数量减少, 高阶模式被截断, 也不利于光提取效率的增大, 只有当光

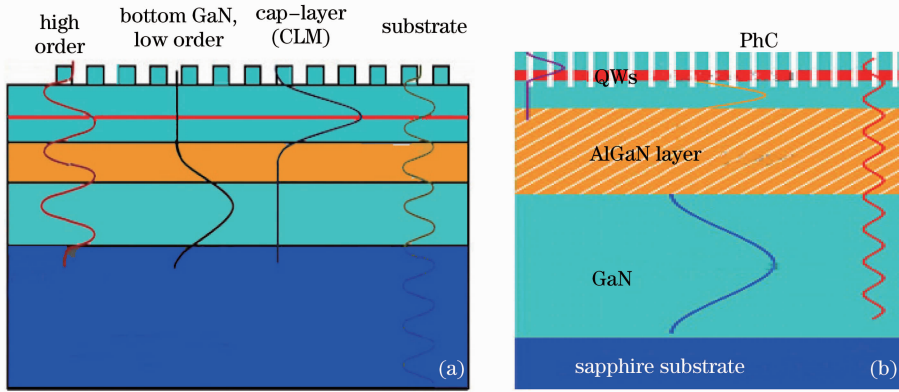


图 6 具有 AlGaIn 限制层的光子晶体 LED 结构示意图以及四种传导模式在 LED 内的分布。(a) 表面 PhC 刻蚀深度不穿过有源区；(b) 表面 PhC 的刻蚀深度穿过有源区

Fig. 6 Schematic of PhC LED with AlGaIn confining layer and modes supported in the structure. (a) LED with shallow etched PhC; (b) LED with deep etched PhCs through QWs

子晶体的刻蚀深度约为  $\lambda/n_{\text{PhC}}$  时,光提取效率具有最大值,约为 27.86%。

## 6 双层光子晶体在 LED 中的使用

### 6.1 在倒装 LED 芯片的衬底和缓冲层上分别制作 PhC

倒装型 GaN 基 LED 在 p 电极上方镀一层厚的银作为反射镜,通过电极凸点与硅基片上的凸点键合。有源层发出的光反射后经过蓝宝石衬底进入空气,这样出射光不经过 p 面,避免了电极的遮挡和吸收损失;并且蓝宝石的折射率小于 GaN 的折射率( $n_{\text{sapphire}} = 1.78$ ,  $n_{\text{GaN}} = 2.5$ ),光出射的临界角较大,出射光增多,因此倒装芯片结构可以提高 LED 的光提取效率。而将光子晶体刻蚀在蓝宝石衬底上,可以将更多的光波耦合出去。同时由于光子晶体的带隙性质,将光子晶体结构刻蚀在底部 GaN 材料上,适当地设置结构参数,光子晶体的作用相当于底部反射镜。因此可以在倒装芯片的 LED 的顶部和底部同时制作 PhC 结构来提高 LED 的出光效率,顶部的 PhC 相当于衍射光栅,将大部分出射光耦合出去;底部 PhC 的作用则类似于全反射镜,将底向出射光反射回 LED 内部。

为验证以上分析,通过 FDTD 模拟分析了图 7 所示的四种结构的光提取效率:1)传统的倒装 LED 结构;2)倒装 LED 的蓝宝石衬底上制作 PhC 结构;3)同时在倒装 LED 的衬底上制作 PhC 结构,在底部添加金属反射镜;4)在倒装 LED 的表面和底部同时制作 PhC 结构。计算结果如图 8 所示,从图中可以明显地看

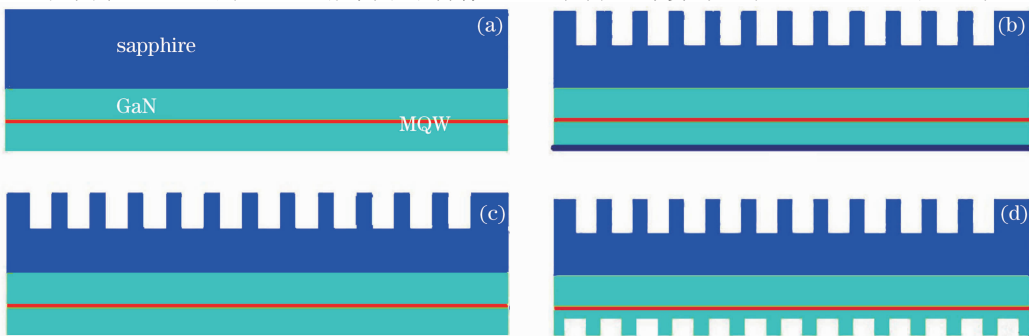


图 7 四种倒装 LED 芯片结构示意图。(a) 普通倒装 LED 结构；(b) 倒装 LED 表面制作二维 PhC 散射层；(c) 倒装 LED 表面二维 PhC 散射层和底部金属反射镜；(d) 倒装 LED 表面和底部同时制作二维 PhC 散射层

Fig. 7 Cross-sectional views of the flip-chip GaN LED with four configurations. (a) Conventional LED; (b) LED with PhC on the sapphire; (c) LED with PhC on the sapphire and a bottom mirror; (d) LED with PhCs on top sapphire and bottom GaN slabs

出,后三种结构的 LEE 都获得了较大的提高,在表面 PhC 的刻蚀深度相同的情况下 ( $t/d_1 = 0.8$ , 其中  $t$  为表面光子晶体的刻蚀深度,  $d_1$  为蓝宝石衬底的厚度), 由于第 4 种结构底部的 PhC 距离 LED 有源层很近, PhC 的能带结构使得有源层发出的光大部分被 PhC 耦合进泄漏模式发射出去, 因此获得了更高的光提取效率<sup>[10]</sup>。

## 6.2 表层 PhC 和嵌入式 PhC 在 LED 中的使用

在 LED 表层的光子晶体通过对光的散射和衍射可以提高 LED 的 LEE, 但表层的 PhC 只对 LED 中的高阶传导模式起作用。相比较而言, 嵌入式的 PhC 结构既可以更好地提取高阶模式的传导模, 同时又可与 LED 中的低阶导波相互作用, 将其耦合为泄漏模式, 因为嵌入式的光子晶体结构层可以改变原结构中的模式分布, 形成新的 CLM, CLM 可以抑制有源层的能量向低阶模式转化。但 CLM 自身也会携带大量能量, 并局限在靠近有源区的 GaN 层中, 因此在具有嵌入式 PhC 层的 LED 表面制作 PhC 可以通过散射将 CLM 的能量提取出来<sup>[28-29]</sup>。

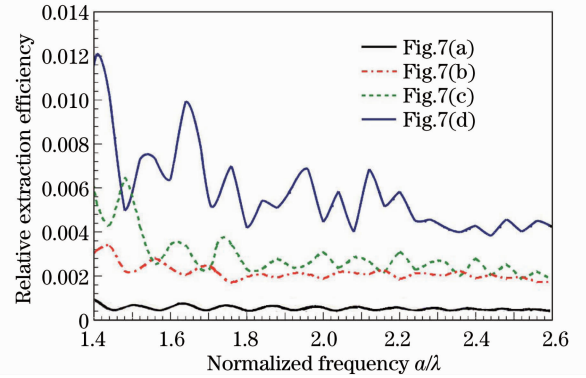


图 8 图 7 所示四种倒装 LED 芯片结构光提取效率的频谱分布图

Fig. 8 Comparison of extraction efficiency among the four configurations shown in Fig. 7

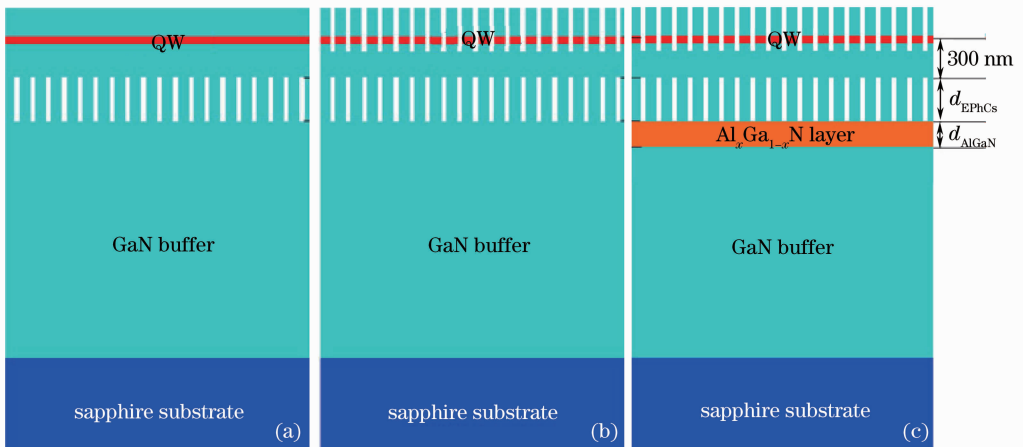


图 9 (a) 具有嵌入式 PhC 的 LED 示意图; (b) 具有表面 PhC 和嵌入式 PhC 的 LED 结构示意图; (c) 同时具有双层 PhC 和  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  限制层的 LED 示意图

Fig. 9 Schematic of PhC LEDs. (a) LED with surface PhC; (b) LED with surface and embedded PhCs; (c) LED with both  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  confining layer and surface and embedded PhCs

含有嵌入式 PhC 和双层光子晶体的 LED 结构示意图分别如图 9(a)、(b) 所示, 通过 FDTD 模拟 LED 的 LEE 随表面 PhC 层的刻蚀深度  $d$ 、嵌入式 PhC 层厚度  $d_{\text{EPhCs}}$  及其距有源层的距离  $D$  的分布, 发现在合适的配置下, CLM 可以从有源层获得较大能量并有效地与顶层光子晶体耦合。图 9(a)、(b) 两种结构的 LEE 随嵌入式 PhC 的厚度  $d_{\text{EPhCs}}$  的分布在图 10 中给出, 从图中可以看出具有表层 PhC 和嵌入式 PhC 的 LED 结构使 LEE 提高了 7 倍以上。若在嵌入式光子晶体下方置一  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  薄层, 可以阻止有源层产生的低阶模式向 GaN 缓冲层中以及缓冲层四周泄漏, 并将这些模式转化成为可被表面 PhC 提取的 CLM 模式, 从而更有效地提高 LED 的 LEE, 这种结构的示意图在图 9(c) 中给出。经计算在嵌入式 PhC 的厚度为 410 nm,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  限制层厚度为 190 nm, Al 元素含量  $x = 20\%$  时, LEE 达到了峰值, 相较传统 LED, LEE 提高将近 8 倍, 比没有  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  限制层时提高近 10%。并且由于这种结构并不要求限制层的厚度和  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  中 Al 的含量, 因此也避免了结构间位错的产生, 减小了对 LED 内量子效率的影响。这种优化的结构设置为高性能 GaN 基 LED 的设计制造提供了重要的理论参考依据。

## 7 结束语

分析了多种复合技术对光子晶体 LED 结构出光效率的影响。在 LED 中采用光子晶体结构,既可以改变其出光结构,又可以改变有源区的自发辐射和 LED 内部导波模式的分布,即从位置来说,光子晶体可以刻蚀到 p-GaN 层、有源层、n-GaN 层甚至到衬底。由于提高 LED 出光效率的机理不同,多种技术的复合使用不会相互影响,因此本文分析了采用其他技术(如光学微腔、图形化衬底、全方位反射镜、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  限制层以及嵌入式光子晶体结构等)的同时,再结合表面光子晶体技术以更大提高 LED 出光效率。研究表明,采用复合技术的光子晶体 LED 结构确实在不同程度上提高了 LED 的光提取效率,尤其是具有嵌入式 PhC 和  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  限制层的 LED,在优化参数配置下,LEE 相比较传统结构的 LED 提高 8 倍以上。相信以上研究及其结果将对光子晶体 LED 的制备和发展提供重要的参考和指导,促进这一新技术尽快在我国得到应用和发展,并推动 LED、光子晶体及相关研究的发展。

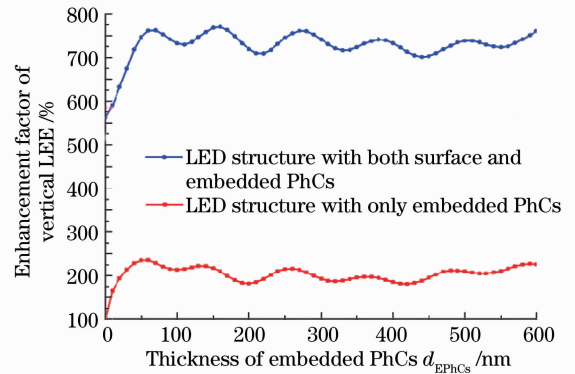


图 10 两种结构的 LEE 提高倍数随嵌入式 PhC 的厚度  $d_{\text{EPHCs}}$  的分布

Fig. 10 Enhancement factor of vertical LEE as a function of embedded PhCs depth  $d_{\text{EPHCs}}$

## 参 考 文 献

- 1 C-C Liu, Y-H Chen, M-P Houg, *et al.*. Improved light-output power of GaN LEDs by selective region activation [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(6): 1444–1446.
- 2 T Nishida, H Saito, N Kobayashi. Efficient and high-power AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diode grown on bulk GaN [J]. Appl Phys Lett, 2001, 79(6): 711–712.
- 3 T Fujii, Y Gao, R Sharma, *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.
- 4 H S Venugopalan, X Gao, T Zhang, *et al.*. Fabrication of high-lumen InGaIn flap chip LEDs [C]. SPIE, 2004, 5187: 260–266.
- 5 S Schad, M Scherer, M Seyboth, *et al.*. Extraction efficiency of GaN-based LEDs [J]. Phys Stat Sol (A), 2001, 188(1): 127–130.
- 6 Y J Lee, T C Lu, H C Kuo, *et al.*. High brightness AlGaInP-based light emitting diodes by adopting the stripe-patterned omni-directional reflector [J]. Semicond Sci Technol, 2006, 21(2): 184–189.
- 7 Hongwei Liu, Qiang Kan, Chunxia Wang, *et al.*. Light extraction of GaN LEDs with 2-D photonic crystal structure [J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(10): 918–920.
- 8 L Chen, A Nurmikko. Fabrication and performance of efficient blue light emitting III-nitride photonic crystals [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(17): 3663–3665.
- 9 D H Kim, C O Cho, Y G Roh, *et al.*. Enhanced light extraction from GaN-based light-emitting diodes with holographically generated two-dimensional photonic crystal patterns [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(20): 203508.
- 10 C H Chao, S L Chuang, T-L Wu. Theoretical demonstration of enhancement of light extraction of flip-chip GaN light-emitting diodes with photonic crystals [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(9): 091116.
- 11 Z Xu, L Cao, Q Tan. Enhancement of the light output of light-emitting diode with double photonic crystals [J]. Opt Commun, 2007, 278(1): 211–214.
- 12 A J Danner, B Wang, S-J Chua, *et al.*. Fabrication of efficient light-emitting diodes with a self-assembled photonic crystal array of polystyrene nanoparticles [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(1-4): 48–50.
- 13 E Matioli. Impact of photonic crystals on LED light extraction efficiency: approaches and limits to vertical structure designs [J]. J Phys D: Appl Phys, 2010, 43(35): 354005.
- 14 C H Lin, C F Lai, T S Ko, *et al.*. Enhancement of InGaIn-GaN indium-tin-oxide flip-chip light-emitting diodes with  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  multilayer stack omnidirectional reflector [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(19): 2050–2052.
- 15 C H Lin. Enhanced vertical extraction efficiency from a thin film InGaIn-GaN light emitting diode using a 2D photonic crystal and an omni-directional reflector [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(10): 836–839.

- 16 Xu Qingtao, Li Kang, Kong Fanmin, *et al.*. Enhancing extraction efficiency from GaN-based LED by using an omnidirectional reflector and photonic crystal [J]. *Optoelectronics Lett*, 2009, 5(6): 405–408.
- 17 Kyeong-Jae Byeon, Joong-Yeon Cho. Fabrication of  $\text{SiN}_x$ -based photonic crystals on GaN-based LED devices with patterned sapphire substrate by nanoimprint lithography [J]. *Opt Express*, 2012, 20(10): 11423–11432.
- 18 Zhou Shizhong, Lin Zhiting, Wang Haiyan. Research progress of patterned sapphire substrate for GaN-based light-emitting diodes [J]. *Semiconductor Technology*, 2012, 37(6): 417–424.
- 19 Lee K S, Kwack H S, Hwang J S, *et al.*. Spatial correlation between optical properties and defect formation in GaN thin films laterally overgrown on cone-shaped patterned sapphire substrates [J]. *J Appl Phys*, 2010, 107(10): 103506.
- 20 K Tadatomo, H Okagawa, Y Ohuchi. High output power InGaN ultraviolet light-emitting diodes fabricated on patterned substrates using metalorganic vapor phase epitaxy [J]. *Jpn J Appl Phys: Part 2-Letters*, 2001, 40(6B): 583–585.
- 21 Ee Y K, Li X H, Biser J. Abbreviated MOVPE nucleation of III-nitride light-emitting diodes on nano-patterned sapphire [J]. *J Cryst Growth*, 2010, 312(8): 1311–1315.
- 22 Su Y K, Chen J J, Lin C L, *et al.*. Structural analysis of nitride-based LEDs grown on micro-and nanoscale patterned sapphire substrates [J]. *Phys Stat Sol (C)*, 2010, 7(7/8): 1784–1786.
- 23 H Y Lin, Y J Chen, C C Chang, *et al.*. Pattern-coverage effect on light extraction efficiency of GaN LED on patterned-sapphire substrate [J]. *Electrochem Solid-State Lett*, 2012, 15(3): H72–H74.
- 24 Y Li, S You, M Zhu, *et al.*. Defect-reduced green GaInN/GaN light-emitting diode on nanopatterned sapphire [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98(15): 151102.
- 25 W Cao, J M Biser, Y-K Ee, *et al.*. Dislocation structure of GaN films grown on planar and nanopatterned sapphire [J]. *J Appl Phys*, 2011, 110(5): 053505.
- 26 Y D Wang, K Y Zang, S J Chua, *et al.*. Improvement of microstructural and optical properties of GaN layer on sapphire by nano scale lateral epitaxial overgrowth [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(21): 211908.
- 27 M T Wang, K Y Liao, Y L Li. Growth mechanism and strain variation of GaN material grown on patterned sapphire substrates with various pattern design [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(14): 962–964.
- 28 Gao Hui, Kong Fan-Min, Li Kang, *et al.*. Structural optimization of GaN blue light LED with double layers of photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(12): 127807.  
高 晖, 孔凡敏, 李 康, 等. 双层光子晶体氮化镓蓝光发光二极管结构优化的研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(12): 127807.
- 29 Hui Gao, Kang Li. Improving light extraction efficiency of GaN-based LEDs by  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  confining layer and embedded photonic crystals [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2012, 18(6): 1650–1660.