

光子晶体 LED 结构优化设计对光提取效率的影响

沈晓霞¹ 蔡履中² 董国艳³ 任亚洲¹

¹ 深圳信息职业技术学院电子与通信学院, 广东 深圳 518172
² 山东大学信息科学与技术学院, 山东 济南 250100
³ 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 为提高光子晶体(PC)发光二极管(LED)的光提取效率,引入 AlGaIn 限制层的表面光子晶体 LED(PCLED)和嵌入型 PCLED 两种模型,分析了两种结构中光波模式的分布,利用角分辨测量方法计算光子晶体对 LED 中各传导模式的提取长度,分析 PC 对各模式的提取能力,通过研究两种结构中 PC 的结构参数对提取长度的影响,认为引入 AlGaIn 限制层的 LED 可以将一部分低阶光波转化为覆盖层模式被 PC 提取。嵌入型 PCLED 中,PC 与 LED 中绝大部分传导模式的分布都有重叠,嵌入型 PC 对所有传导模式都具有较短的提取长度使其能更有效地提高 LED 的光提取效率。

关键词 光子晶体;发光二极管;光提取效率;模式分析

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s106006

Impact of Structure Design of Photonic Crystals on LED Light Extraction Efficiency

Shen Xiaoxia¹ Cai Lüzhong² Dong Guoyan³ Ren Yazhou¹

¹ School of Electronics and Communication, Shenzhen Institute of Information and Technology, Shenzhen, Guangdong 518172, China

² School of Information Science and Engineering (ISE), Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

³ College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Two light emitting diode (LED) structures such as the introducing of AlGaIn confining layer and the embedded photonic crystal (PC) LED are proposed to improve the light extraction efficiency of PC LEDs. The distributions of guided modes propagated in LED are analyzed, and the modal extraction lengths are calculated using high-resolution angle-resolved measurements in order to research the interaction of each guided mode with PCs. The impact of structure parameters design on modal extraction length is considered. The result shows that the introduction of an AlGaIn confining layer in LEDs is effective in extracting a fraction of the optical energy of low order modes, but this approach is limited by the growth of the lattice mismatched AlGaIn layer on GaN. And embedded PC LEDs have superior extraction of the guided light due to spatially overlapped with all guide modes which have the higher interaction between all optical modes.

Key words photonic crystal; light emitting diode; light extraction efficiency; mode analysis

OCIS codes 230.5298; 230.3670; 230.0250

收稿日期: 2013-09-30; **收到修改稿日期**: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(60907005, 61240015, 51102148)、深圳市科技计划项目(JCYJ20120615101957810, JCYJ20120821162230170)、广东省自然基金(S2012010010030)、深圳信息职业技术学院一般项目(YB201007, JY2013124)

作者简介: 沈晓霞(1983—),女,博士,讲师,主要从事光子晶体器件方面的研究。E-mail: shenxx@sziit.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

由于发光二极管(LED)具有功耗低、寿命长、体积小及可靠性强等优点应用越来越广泛,如何提高LED的发光效率成为近年来越来越多研究的热点。一般描述发光二极管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)。理想的LED可以将每个注入有源区的电子都转化为光子,但实际上由于存在许多损耗因素,使得EQE大幅降低。提高LED的发光效率需要同时提高IQE和LEE。提高IQE主要基于增强辐射复合和减弱非辐射复合两个方面。随着金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术和多量子阱(QWs)结构的发展,外延片的IQE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^[1]也都能大幅度提高LED的IQE。目前AlInGaP基和GaAs基LED等的IQE已接近极限,甚至可达100%^[2]。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,如倒装芯片技术^[3]、衬底剥离技术^[4]、异性芯片技术^[5]、图形化衬底技术^[6]、表面粗糙技术^[7]以及光子晶体(PC)等^[8-21]。大量研究证明将PC应用在LED结构中可以有效地提高LED的光提取效率,并且相比表面粗化技术,可以更好地控制出射光的方向。

光子晶体是由折射率不同的介质周期性排列组成的特殊结构,在LED中的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^[11-12]。绝大部分研究工作中的PC结构都置于LED表面,但表面光子晶体主要是对LED中的高阶模式起作用,仍然有占出射光总能量40%以上的低阶光波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。本文提出了两种结构来克服表面光子晶体LED(PCLED)的缺点:1)在表面PCLED中引入折射率较低的AlGaIn限制层,提高LED的光提取效率;2)在LED的有源层(AR)下方嵌入PC结构,形成嵌入型PCLED,可以更有效地提高LED的光提取效率。传统的研究工作中,光提取效率的提高都是通过测量LED外部的输出功率得到,但是这种方法只能反映PC对LED内所有传导模式作用的全局效应。本文采用高分辨率角分辨光谱测量方法探测LED中各种传导模式的提取长度,了解PC对每一个模式的提取作用,分析LED的结构参数,比较了两种方法的分析结果,得到优化配置。

2 光子晶体对光波模式的提取长度

在PCLED结构中,由于LED和PC自身结构并不是无限延伸的,必然导致从AR出射的光波是具有一定线宽的扩展光源,因此在LED结构中传播的光可以分解为一系列传导模式,这些传导模式能够以任何角度入射到表面PC。当其中的某些模式以特定角度入射到PC和衬底上时,会形成相长干涉,被PC提取出射后就会出现衍射峰,如图1所示。为了衡量PC对每一个传导模式的提取能力,通过测量模式的提取长度 $L_{\text{extraction}}$ 来分析PC对出射光波的提取机理,优化参数设置。LED中每一个传导模式都可以表示为: $\mathbf{E}^n(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0^n \exp(i\mathbf{k}_n \cdot \mathbf{r})$ (其中 $\mathbf{k}_n = \mathbf{k}_{//,n} + \mathbf{k}_{z,n}$, n 表示第 n 个传导模式,后面分析过程中省略)。由于PC结构中介质的折射率在空间呈周期性排列,在求解电磁波方程时在其倒格子空间可以引入倒格矢,被PC提取出射的传导模式平面内的波矢可以表示为 $\mathbf{k}_{//,m} = \mathbf{k}_{//} + m\mathbf{G}$ (m 为整数),根据布洛赫定理,LED中的每一个传导模式都可以写成一系列简谐振动的组合,即: $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_m \mathbf{E}_m \exp[i(\mathbf{k}_{//,m} \cdot \mathbf{r}_{//} + k_z z)]$ (其中 $\mathbf{k}_{//} = k_x \mathbf{e}_x + k_y \mathbf{e}_y$, $\mathbf{r}_{//} = x \mathbf{e}_x + y \mathbf{e}_y$ 是平面内的波矢和空间位置矢量, k_z , z 是垂直于平面的分量)。如图1所示的当传导模式的波矢位于全反射的光锥内,或者传导模式在平面内的波式分量小于其在空气中的波矢时,即 $|\mathbf{k}_{//,m}| < k_0$ 时,传导模式被辐射到了空气中,这种模式称为泄露模式,在LED结构内部该模式能量呈指数形式衰减,相当于在布洛赫波矢中引入了虚部 k'' ,即 $I = |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 = |\mathbf{E}_0|^2 \exp(-2k'' r_{//})$,这个模式的提取长度可以定义为 $L_{\text{extraction}} = 1/2k''$ 。模式能量在空间中呈指数形式衰减,在倒格空间可以用其共轭矢量 \mathbf{k} 来表示,利用傅里叶变换得到洛伦兹方程: $F(k) = 4k'' |\mathbf{E}_0|^2 / (4k''^2 + k^2)$,其半峰全宽

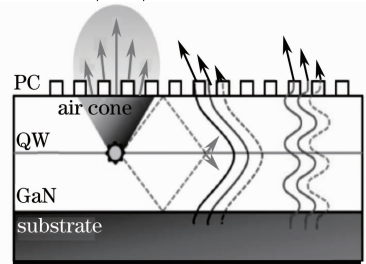


图1 GaN基光子晶体LED内直接出射光波和被表面光子晶体提取的传导模式的示意图

Fig. 1 Schematics of the directly emitted light and the PC extraction of guided modes as they propagate inside the GaN-based LED

$W_{FWHM} = \Delta k_{//} = 4k'' = 2/L_{\text{extraction}}$ 。利用高分辨率角分辨光谱测量方法观测 LED 的远场辐射求出 $\Delta k_{//}$ ，从而确定每一种导波模式的提取长度。

对 LED 和 PC 的结构参数进行合适的配置，如 AR 的位置、PC 的厚度及晶格常数和填充比等，增强 PC 与 LED 内传导模式间的相互作用，获得较小的模式提取长度，得到较高的光提取效率^[17-18]。在很多研究工作中，光提取效率都是通过测量 LED 外部的输出功率得到，但是这种方法只能反应 PC 对 LED 内所有传导模式作用的全局效应。测量光提取长度可以反应出 PC 对每一个传导模式的提取作用，因此将通过改变 LED 和 PC 的结构参数，分析各种结构中传导模式的提取长度，研究不同 LED 结构中 PC 提高的 LEE 的工作机理，以此获得最佳的配置条件。

3 引入 AlGaIn 限制层的表面光子晶体 LED

为了增强表面 PC 与 LED 内低阶传导模式的相互作用，在 LED 的 AR 下方引入折射率低于 GaN 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 限制层，限制层的引入改变了传导模式在 LED 内的分布，同时也会影响表面 PC 对这些传导模式的提取长度。如图 2 所示具有限制层的 PC LED 结构示意图， $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 限制层将一部分低阶模式的光波限制在距离表面 PC 较近的区域，从而获取较短的提取长度，相应地更容易被 PC 提取，并且这些光波模式被限制在 AR 附近也会更容易被 AR 中的 QWs 激发。LED 把这个低阶模式限制在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 以上的区域（简称为覆盖层），这个模式称为覆盖层模式（CLM）。除此之外 LED 中的传导模式还可以分为三种：高阶模式、衬底模式和分布在底部 GaN 层中的低阶模式（与 PC 和 AR 间的相互作用微弱，不易被提取，称为提取带隙），几种模式的分布情况在图 2 中给出。

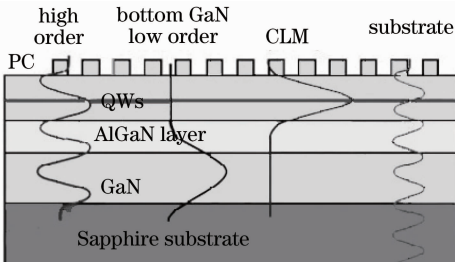


图 2 四种传导模式在具有 AlGaIn 限制层的 PCLED 内的分布

Fig. 2 Schematic of PCLED with AlGaIn confining layer and modes supported in the structure

在 LED 中引入 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 限制层能够将一部分不易被提取的低阶模式限制在上层 GaN 层，转化为 CLM，但限制层对高阶模式和衬底模式并没有很大的影响。将一电偶极子置于 LED 的 AR 中，通过计算每个方位角内的辐射能流密度来模拟 LED 辐射光波的角分布，如图 3 所示的传统结构的 LED 和具有 600 nm 厚的 $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 限制层的 LED 的出射光的模拟分布分别在中垂线左右两边。AR 发射出的光可以分为两部分：一部分波矢位于光锥内的光波可以直接出射到空气中；另一部分由于 GaN 和空气界面的全反射被限制在 LED 中形成传导模式。如图 3 所示 4 种类型的传导模式分布的区域不同，高阶模式、衬底模式、底部 GaN 模式以及 CLM 之间的分界面在图中用黑色虚线标出，称之为空气线、衬底线以及限制层线[所在的角度分别对应于 GaN 和空气、蓝宝石衬底之间、以及 AlGaIn 间的全反射角： $\theta_1 = \arcsin(n_{\text{air}}/n_{\text{GaN}}) = 24^\circ$ ； $\theta_2 = \arcsin(n_{\text{Sapphire}}/n_{\text{GaN}}) = 46.35^\circ$ ； $\theta_3 = \arcsin(n_{\text{AlGaIn}}/n_{\text{GaN}}) = 77.32^\circ$]。从图 3 可以看出两种 LED 结构在光锥内光波模式的分布，以及衬底模式和底部 GaN 模式的分布都没有很大的区别，即 AlGaIn 限制层对这三种传导模式没有很大的影响，但在 AlGaIn 层之下的低阶模的分布却有了显著变化：普通 LED 结构在这个区域存在多个传导模式，具有限制层的 LED 在这个区域内只存在一个模式 CLM。

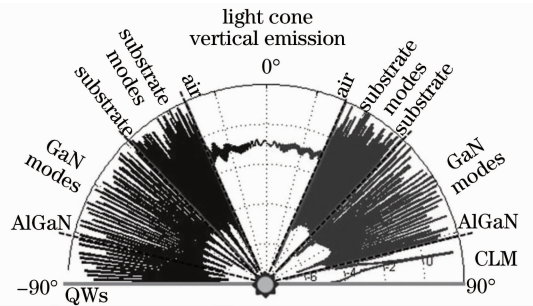


图 3 LED 有源层发射光波的角辐射模拟
Fig. 3 Radiation angle simulation of the light emitting in AR of LED

每个模式的光能都可以通过对相应方位角内的能流密度积分得到，在 PCLED 中引入 AlGaIn 限制层后，相应的每个模式的能量也会重新分布，同样表面 PC 对每个模式的提取作用也会发生变化，图 4 给出了三种不同 LED 结构中 PC 对每个传导模式的提取长度的计算结果。模拟计算所选取的 LED 结构中三角结构 PC 的填充比约为 35%，晶格常数为 200 nm，刻蚀深度为 250 nm，限制层之上的覆盖

层厚度为 300 nm, 波长为 460 nm, 限制层中 Al 的含量为 20% (即 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 中 $x=0.2$)。三种 LED 结构分别为没有限制层的传统 LED, 含有 300 nm 和 600 nm 厚的 AlGaIn 限制层的 LED。计算模式在 PC 中能量的衰减, 确定沿 ΓM 方向传播的波矢的虚部从而求得该模式的提取长度。LED 中每一个传导模式用有效折射率 $n_{\text{eff}} = k_{\parallel}/k_0$ (k_0 为光波在空气中的波矢) 表示。

从图 4 可以看出, 黑色四方点线表示的无限制层 LED 结构中 PC 对高阶模式的提取长度很短, 但 $n_{\text{eff}} > 2.32$ 的区域 (图中黑色直线右侧区域) 所对应的低阶模, 提取长度快速增长, 意味着对于这部分光波模式, PC 的提取作用机理减弱, 这部分能量因为 LED 内的掺杂层吸收或 QWs 的重吸收被耗散, 不能辐射到空气中^[19]。引入 AlGaIn 限制层后, 在 $n_{\text{eff}} < 2.32$ 的范围内三种结构的提取长度变化很小, 将这个范围内的传导模式称为高阶模式, 而在 $n_{\text{eff}} > 2.32$ 的范围内三种结构中 PC 对光波的提取长度有显著变化, 一部分低阶模式的光波提取长度增大 (提取带隙, 主要分布在限制层下的 GaN 层中), 这部分光波被 PC 提取的能力降低, 出射到空气中的能量减少; 而只有一个低阶模式 CLM 的提取长度减小, 相应地 PC 对该模式的提取能力增强, 大部分该模式的能量被辐射到空气中。引入 300 nm 和 600 nm 的 $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 层后, CLM 出射的能量分别占 AR 出射总能量的 9.3% 和 14.8%。

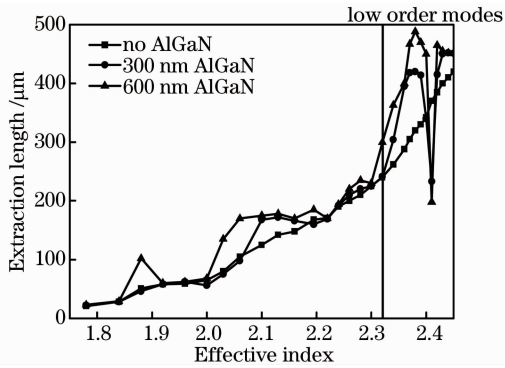


图 4 三种 PCLED 结构中各传导模式的提取长度与导模有效折射率的关系变化

Fig. 4 Calculated modal extraction length versus effective index of the guided modes for three PCLED structures

由图 4 分析可以看出在表面 PC 结构中引入低折射率限制层可以有效地将一部分低阶光波耦合到限制层之上的覆盖层中, 转化为 CLM 被 PC 提取。此外虽然限制层中 Al 元素的含量越高、限制层的厚

度越大, 理论上就有越多的低阶模式能量被耦合到覆盖层中, 但随着 AlGaIn 的厚度增大会导致 AlGaIn 与 GaN 间越来越多的位错产生, 影响 LED 内的量子效率, 因此这种方法不能非常有效地提高 LED 的出光效率, 经计算, 600 nm 厚的 AlGaIn 限制层最多可以将 30% 的低阶模式的能量转化为 CLM。

4 嵌入型光子晶体 LED 结构

在 LED 表层的 PC 通过对光的散射和衍射可以提高 LED 的 LEE, 但表层的 PC 只对 LED 中的高阶传导模式起作用。相比较而言, 由于 LED 中绝大部分传导模式的分布都与嵌入型的 PC 有很大范围的重叠, 因此嵌入型的 PC 结构既可以更好地提取高阶模式的传导模, 又可与 LED 中的低阶导波相互作用, 将其耦合为泄漏模式。图 5 给出了具有嵌入型的 PCLED 结构示意图, LED 中的传导模式分为三种: 容易被提取出射的高阶模式, 分布在底部 GaN 中的低阶模式以及被限制在嵌入型 PC 结构之上的 CLM。

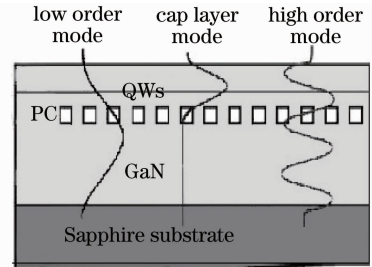


图 5 具有嵌入型光子晶体 LED 结构示意图, 以及传导模式在 LED 内的分布

Fig. 5 Schematic of LED with embedded PC and modes supported in the structure

为了分析具有嵌入型 PC 的 LED 的结构参数优化对每一个传导模式提取作用的影响, 需要分析 LED 内所有模式的提取长度与各结构参数之间的关系。嵌入型的 PC 结构对大部分模式都可以提取出射, 为了减小计算量, 只分析最不容易被提取的模式, 即提取长度最长的模式 CLM。从图 5 可以看出, 嵌入型的 PC 将 CLM 限制在其上的覆盖层中, 最容易被 AR 触发, 但 CLM 的分布只有在波节位置与 PC 重叠, CLM 与 PC 间的相互作用最弱, PC 对 LED 内所有其他模式的提取作用都比对覆盖层模式强。因此只要调整结构参数使 CLM 获得最短的提取长度, 即最大的提取效率, 则可以得到最佳配置的嵌入型 PCLED。

图 6(a) 和 (b) 分别给出了 LED 中各传导模式

的提取长度与 PC 厚度、填充比之间的关系,计算时采用的波长为 460 nm,嵌入型的 PC 下方 GaN 层的厚度为 4 μm 。图 6(a)中采用的 PC 结构的填充比为 35%,从图中可以看出在 PC 之上的覆盖层厚度分布是 450 nm 和 600 nm 两种情况下 PC 对 CLM 最短的提取长度出现在 PC 厚度为 80~100 nm,随着 PC 厚度增加提取长度呈震荡增长的趋势,震荡的原因是 PC 厚度的变化导致不同的布洛赫模式被耦合成为 CLM^[20]。选择 PC 厚度为 100 nm 时,CLM 提取长度随 PC 填充比的变化在图 6(b)中给

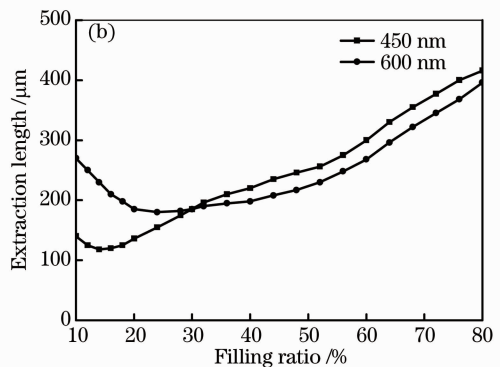
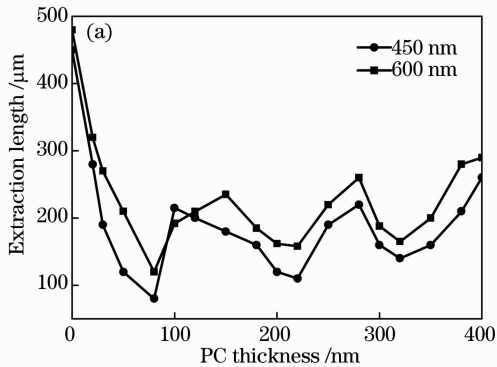


图 6 CLM 模式的提取长度随(a)PC 厚度以及(b)填充比分布

Fig. 6 Calculated extraction length of the CLM as a function of (a) the PC thickness and (b) filling factor

在前文的分析中已知表面 PCLED 和嵌入型 PCLED 结构都能够有效地提取高阶模式的光波,但绝大部分低阶传导模的光波不能被表面 PC 提取,极大地限制了表面 PCLED 的光提取效率。相较而言嵌入型的 PC 对 LED 内所有的传导模式都具有较好的提取作用,所以对嵌入型的 PCLED 主要分析低阶光波模式的提取。图 6 给出了嵌入型 PCLED 中提取能力最弱的 CLM 的提取长度分布,图 7 给出了 PC 对 GaN 模式即低阶传导模式的提取长度,其中每个传导模式用其有效折射率表示,提取长度分布在 60~100 μm 范围内,比图 4 所示的表面 PCLED 中的 CLM 的提取长度还要短,说明嵌入型 PC 可以有效地提高 LED 光提取效率。此外表面 PCLED 中的 CLM 分布在 AlGaIn 限制层之上的覆盖层中,与 LED 的 AR 有很大范围的重叠,因此对一些特定的波段,AR 对 CLM 的吸收损耗甚至超过 PC 对 CLM 的提取作用,即 AR 对光波的吸收长度小于 PC 的提取长度。而在嵌入型 PCLED 中,有源层对所有的传导模式都没有很强的限制作用,即 AR 对所有模式的吸收长度都很大,吸收损耗较小。因此嵌入型 PC 能够有效地提高 LED 的光提取效率,这是 PC 对传导模式较短的提取长度以及

出,发现最短的提取长度 120 μm 出现在覆盖层厚度为 450 nm、PC 填充比为 14% 的结构中。从图中可以分析得出在 LED 结构中引入厚度薄、填充比低的嵌入型 PC 时,PC 对 CLM 具有较短的提取长度,即具有较强的衍射提取能力。这是因为 PC 结构对 CLM 和底部 GaN 模式的限制较弱,使得 CLM 和 GaN 模式分布可以扩展到 PC 中,被 PC 的衍射作用提取,出射到空气中,从而获得较高的光提取效率。

AR 对其较长的吸收长度共同作用的结果。

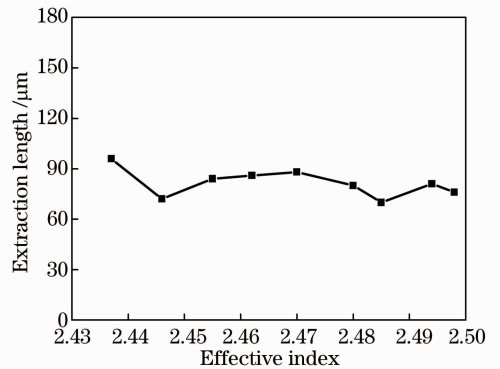


图 7 嵌入型 PCLED 结构中低阶传导模式的提取长度与传导模式的有效折射率的变化关系

Fig. 7 Extraction length versus the effective index n_{eff} for the lower guided modes in embedded PCLEDs

5 结 论

通过计算模式的提取长度来分析各种结构中 PC 对 LED 光提取效率的影响,分析了两种改进的 LED 结构来提高 PC 对低阶光波的提取作用。一种是在 AR 下方引入 AlGaIn 限制层,研究表明这种方法并不能非常有效地提高 LED 的出光效率。另一种结构则是在 LED 中引入嵌入型的 PC,研究表明

嵌入型 PC 能够有效地提高 LED 的光提取效率。此外在实验制作过程中,相比较表面 PCLED,刻蚀嵌入型 PC 要在生长 AR 之前完成,避免刻蚀过程中对 AR 可能造成的损伤;并且嵌入型 PCLED 表面平滑,更容易制作电极,因此使用嵌入型 PC 技术制作具有高出光效率的 LED 极具应用潜力。

参 考 文 献

- 1 Liu C C, Chen Y H, Houg M P, *et al.*. Improved light-output power of GaN LEDs by selective region activation[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(6): 1444–1446.
- 2 Nishida I, Saito H, Kobayashi N. Efficient and high-power AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diode grown on bulk GaN [J]. Appl Phys Lett, 2001, 79(6): 711–712.
- 3 Ferguson I T, Narendran N, DenBaars S P, *et al.*. Third international conference on solid state lighting[C]. SPIE, 2004, 5187: 260–266.
- 4 Daisuke M, Masahiko S, Masashi Y, *et al.*. Over 200 mW on 365 nm ultraviolet light emitting diode of GaN-free structure[J]. Phys Status Solidi A, 2003, 200(1): 114–117.
- 5 Schad S, Scherer M, Seyboth M, *et al.*. Extraction efficiency of GaN-based LEDs[J]. Phys Status Solidi A, 2001, 188(1): 127–130.
- 6 Lee Y J, Lu T C, Kuo H C, *et al.*. High brightness AlGaInP-based light emitting diodes by adopting the stripe-patterned omnidirectional reflector[J]. Semiconductor Science and Technology, 2006, 21(2): 184–189.
- 7 Fujii T, Gao Y, Sharma R, *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.
- 8 Noda S, Fujita M. Light-emitting diodes: photonic crystal efficiency boost[J]. Nature Photonics, 2009, 3(3): 129–130.
- 9 Wierer J J, Krames M R, Epler J E, *et al.*. InGaIn/GaN quantum-well heterostructure light-emitting diodes employing photonic crystal structures[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(19): 3885–3887.
- 10 Matioli E, Weisbuch C. 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.
- 11 David A, Meier C, Sharma R, *et al.*. Photonic bands in two-dimensionally patterned multimode GaN waveguides for light extraction[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(10): 101107.
- 12 McGroddy K, David A, Matioli E, *et al.*. Directional emission control and increased light extraction in GaN photonic crystal light emitting diodes [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(10): 103502.
- 13 Wierer J J, David A, Megens M. III-nitride photonic-crystal light-emitting diodes with high extraction efficiency[J]. Nature Photonics, 2009, 3(3): 163–169.
- 14 Lai C F, Chao C H, Kuo H C, *et al.*. Directional light extraction enhancement from GaN-based film-transferred photonic crystal light-emitting diodes [J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(12): 123106.
- 15 Matioli E, Rangel E, Iza M, *et al.*. High extraction efficiency LED based on embedded air-gap photonic-crystals[J]. Appl Phys Lett, 2010, 96(3): 031108.
- 16 Matioli E, Fleury B, Rangel E, *et al.*. High extraction efficiency GaN-based photonic-crystal light-emitting diodes: comparison of extraction lengths between surface and embedded photonic-crystals[J]. Appl Phys Express, 2010, 3: 032103.
- 17 David A, Fujii T, Moran B, *et al.*. Photonic crystal laser lift-off GaN light-emitting diodes [J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(3): 133514.
- 18 Matioli E, Iza M, Choi Y S, *et al.*. GaN-based embedded 2D photonic crystal LEDs: numerical optimization and device characterization[J]. Phys Status Solidi C, 2009, 6(s2): S675–S679.
- 19 Matioli E, Fleury B, E Rangel, *et al.*. Measurement of extraction and absorption parameters in GaN-based photonic-crystal LEDs[J]. J Appl Phys, 2010, 107(5): 053114.
- 20 David A, Benisty H, Weisbuch C. Optimization of light-diffracting photonic-crystals for high extraction efficiency LEDs [J]. J Display Technol, 2007, 3(2): 133–148.
- 21 Huang Saijun, Ye Zhicheng, Lu Jiangang, *et al.*. Position dependence of extraction efficiency in organic light-emitting diodes with photonic crystal structure[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(6): 062302.

栏目编辑:王晓琰