

LED 芯片取光结构研究现状与发展趋势 *

万珍平¹, 赵小林², 汤 勇¹

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640; 2. 邵阳学院 机械与能源工程系, 湖南 邵阳 422004)

摘 要: LED 芯片取光结构是指在 LED 芯片上窗表面、台面四周、衬底、侧面等表面上加工出能改变光线传播方向, 提高 LED 芯片出光效率的微结构。取光结构是提高 LED 芯片发光效率的关键技术之一。分析了各类取光结构的取光原理, 详细论述了取光结构的研究现状, 分析了取光结构的未来发展趋势。目前, 主要是通过图形衬底、表面粗化、倾斜侧面、光子晶体及其复合取光结构来提高 LED 芯片的出光效率, 出光效率一般可提高 25% 以上, 有的甚至可提高 195%。未来取光结构研究重点应集中在复合取光结构、多芯片集成封装模块的取光结构、高效率 and 低成本的制造方法以及由功能驱动取光结构设计并按要求控制其成形。

关键词: LED 芯片; 取光结构; 发光效率

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)03-0006-07

Situation Development of LED Chips on Light Extraction Structure

WAN Zhen-ping¹, ZHAO Xiao-lin², TANG Yong¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640;
2. Department of Mechanical and Energy Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422004, Hunan)

Abstract: Light extraction structure of light-emitting diode (LED) Chips is a type of microstructure fabricated on the top surface of LED, periphery of the LED's mesa, substrate and sidewall that can change light propagation and improve light extraction efficiency. Light extraction structure is one of the crucial technologies of enhancing luminous efficiency of LED chips. Light extraction principle of different light extraction structures was analyzed and recent research on light extraction structure was dissertated. Currently, the enhancing light extraction of LED is achieved through patterned sapphire, roughened surface, inclined sidewall, photonic crystal and their integration. Generally, 25% improvement or above in efficiency can be attained. Some light extraction structures can significantly improve the light extraction efficiency by 195%. The probable further trend of the research on light extraction structure was discussed. The prior research areas for the future study of light extraction structure are coupling light extraction structure, light extraction structure applied for module of multi-chip package, high efficient manufacturing method with low cost, and function-driven design of light extraction structure and fabrication in the light of design requirements.

Key words: LED chips; light extraction structure; luminous efficiency

0 引 言

发光二极管 (Light Emitting Diode 简称 LED) 具有体积小、寿命长、电光效率高、节能环保等优点, 被认为是继白炽灯、荧光灯之后的新一代绿色光源。据统计, 目前照明用电占全球总

用电量的 19%, 利用现有的 LED 高效照明解决方案至少可节约 40% 的能耗, 每年可减少 5.55 亿吨二氧化碳排放。然而, 目前 LED 发光效率低, 单灯功率不足, 是限制 LED 应用于普通照明的主要瓶颈。LED 的发光效率取决于内量子效

收稿日期: 2012-04-06; **修回日期:** 2012-05-26; **基金项目:** * 国家自然科学基金(51075155, U0834002)

作者简介: 万珍平(1971—), 男(汉), 湖南衡阳人, 博士, 副教授; **研究方向:** 表面功能结构先进制造

网络出版日期: 2012-06-04 08:28; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120604.0828.001.html>

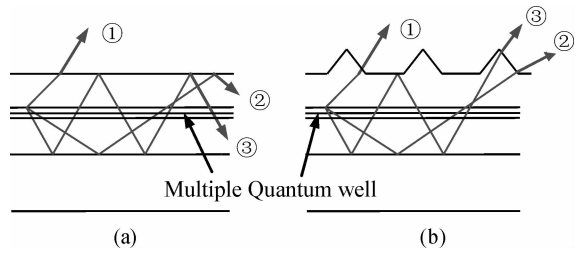
引文格式: 万珍平, 赵小林, 汤勇. LED 芯片取光结构研究现状与发展趋势 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 6-12.

率和外量子效率的乘积。随着外延生长技术和多量子阱结构的发展, 超高亮度发光二极管的内量子效率已有了非常大的改善, 如波长为 625 nm 的 AlGaInP 基超高亮度发光二极管的内量子效率已接近 100%^[1], 待提高空间不大。因此, 芯片的外量子效率(或称出光效率)几乎决定了 LED 芯片的发光效率。LED 芯片的取光结构是提高芯片出光效率的有效途径, 取光结构是指利用半导体或 MEMS 制造工艺, 在 LED 芯片表面或内部各界面加工出能改变光线传播方向的微结构, 使原本不能逸出芯片表面的有源层发出的光子逸出芯片表面, 从而提高芯片出光效率。文中详细论述了当前 LED 芯片取光结构研究现状, 并分析了 LED 取光结构未来发展的趋势。

1 LED 芯片取光结构概述

LED 芯片出光效率低的主要原因之一是外延材料的折射率远大于空气折射率, 使有源区产生的光由于全内反射不能从 LED 中有效地发射出去, 从而导致 LED 的外量子效率很低。如对于目前应用广泛的 GaN 基 LED, GaN 的折射率为 2.5, 临界角为 23.6°, 即只有入射角小于 23.6° 的光子能逃逸出 LED, 其余光子发生全反射最终被 LED 吸收。对于 AlGaInP 系 LED, GaP 的折射率为 3.4, 临界角只有 17°。根据 Snell 定律, 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), 对于 GaN 基 LED, 只有 4% 的光子能够射出 LED, 采用环氧树脂封装后, 也只有百分之十几的光子能够逃逸出去; 对于 AlGaInP 系 LED, 只有 2% 的光子能够逸出 LED, 采用环氧树脂封装后, 发光效率也在 10% 以下。其余的光子因不能发射到体外, 在体内被吸收转变成热, 导致器件性能下降。因此, 如何提高 LED 的出光效率, 是 LED 的关键技术之一。取光结构是提高 LED 芯片出光效率的有效方法, 其原理在于取光结构能够改变光线传播方向, 使大于入射临界角而在芯片内部发生全反射的光线逸出芯片表面, 相当于扩大了逸出锥, 原理如图 1 所示。图 1 中, ①、②、③代表光线, 光线②和③由于入射角大于临界角发生全反射而不能逸出芯片, 如图 1(a)所示; 图 1(b)表示在芯片表面加工出取光结构后, 使光线②和③改变传播方向而逸出芯片, 从而使

有源层发出的光子能够有效地被取出, 同时又不损伤材料的电学和光学特性。



(a) Total internal reflection when incidence angle of ray is superior to the critical angle of the escape cone
(b) Light extraction structure can be used to direct some of totally internally reflected light to the top escape cone of the LED surface

图 1 取光结构取光原理

Fig. 1 Schematic drawing of light extraction

2 LED 芯片取光结构研究现状

为提高 LED 芯片的出光效率, 国内外学者做了大量研究工作, 已经研究出多种取光结构用于提高 LED 芯片的出光效率。

2.1 图形衬底

从芯片有源层发出的光, 大约一半射向上方, 一半射向下方。对于 GaN 基 LED, 一般用蓝宝石作衬底, 射向下方的光线只有极少部分被蓝宝石衬底反射后回到上方射出, 大部分由于全反射而被芯片内部吸收。对于 AlGaInP 系 LED, 为了晶格匹配, 选择了 GaAs 作为外延生长衬底, GaAs 衬底的缺点是吸收光, 大约有一半的光被衬底吸收。因此, 如何使射向下方的光线逸出芯片, 对提高芯片外量子效率起着至关重要的作用。解决的方法是使用图形衬底技术, 图形衬底提高出光效率原理如图 2 所示。若是平面衬底, 有源层向下发出的光经衬底反射后, 大部分在芯片内部形成全反射而不能射出, 如图 1(a)所示。如在基板表面分布一些表面微结构, 则可改变向下发出的光线的反射方向, 从而使光线逸出芯片, 光的提取原理示意图如图 2 所示。

Huang^[2]等用纳米印压光刻技术在 GaN 基 LED 基板上制备出纳米孔阵列, 如图 3 所示, 纳米孔尺寸为 240 nm, 间距为 450 nm。试验结果表明, 在 20 mA 的注入电流下, LED 的输出功率提高 33%。Lee^[3]等用电感耦合型等离子体反

应离子刻蚀在蓝宝石衬底上制备出圆锥体阵列,如图 4 所示。在该衬底上制备出的 GaN 基 LED,在 20 mA 的注入电流下,输出功率相对于传统光滑衬底提高了 35%。Wuu^[4] 等使用硫酸和磷酸的混合溶液湿法刻蚀出具有金字塔图形的蓝宝石衬底,如图 5 所示,相对于传统的蓝宝石衬底,输出功率提高 25%。

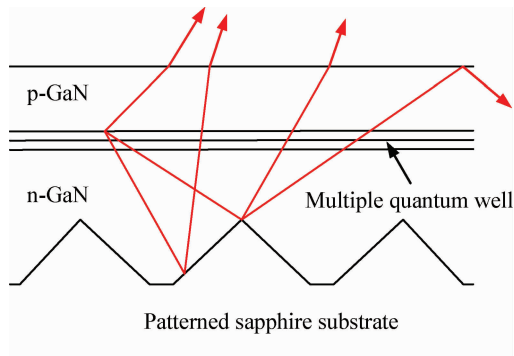


图 2 图形衬底提高出光效率原理示意图

Fig. 2 Schematic drawing of efficiency enhancement of light extraction in LED with patterned sapphire substrate

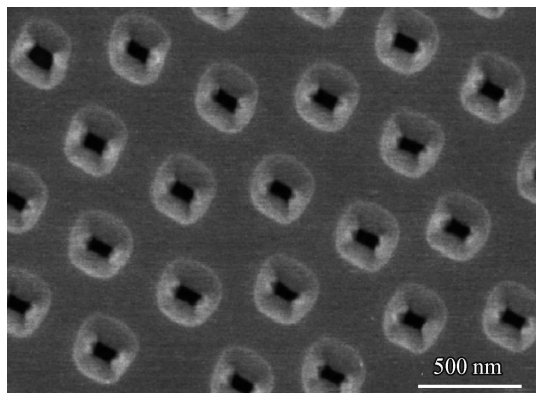


图 3 具有纳米孔阵列的蓝宝石衬底

Fig. 3 Nano-hole patterned sapphire substrate

在衬底上制备分布布拉格反射镜是用得较多的另一种图形衬底。有较高反射性能的分布布拉格反射镜通常由一个 $1/4$ 波长的高、低指数重复周期选层所组成。分布布拉格反射镜反射了射向下方的大部分光,最高反射率超过 95%。Lin^[5] 利用电子束蒸发器在波长为 400 nm 的近紫外 InGaN/AlGaIn LED 基板上沉积了材料为 $\text{SiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ 的分布布拉格反射镜。结果表明,具有分布布拉格反射镜的 LED 在 20 mA 注入电流下,光输出功率比传统 LED 提高 39%。

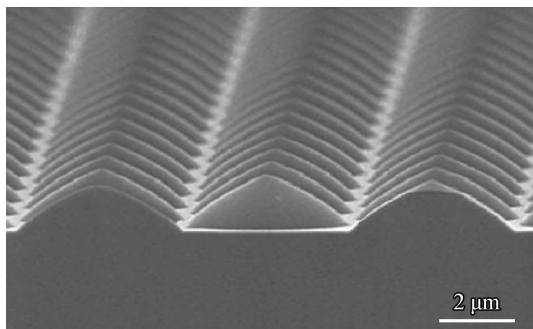


图 4 具有圆锥体阵列的蓝宝石衬底

Fig. 4 Cone-shape-patterned sapphire substrate

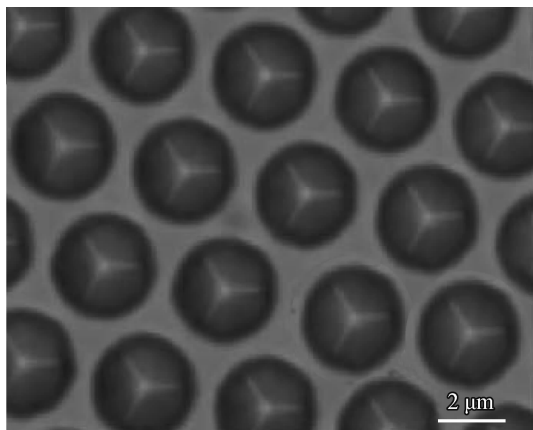


图 5 金字塔图形衬底

Fig. 5 Pyramidal patterned sapphire substrate

2.2 表面粗化

如果 LED 的上窗表面是光滑的平面,即使非常透明,当有源层发出的光向上传播到上表面与空气的界面处时,由于半导体和空气的折射率差异较大,全反射非常严重,只有很少一部分光线能够逸出芯片。但如在芯片上表面加工出一些微细结构,则可大大提高出光效率,出光原理如图 6 所示。这一技术被称为表面粗化。

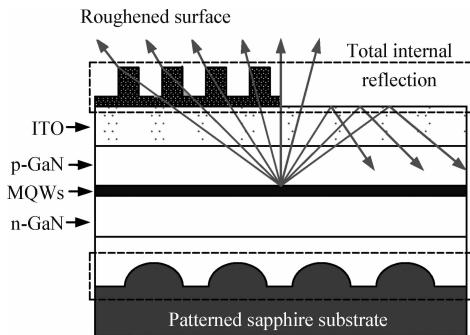


图 6 表面粗化提高出光效率原理示意图

Fig. 6 Schematic principle of the improvement of the light extraction efficiency by roughened surface

Lee^[6]利用化学湿法刻蚀(磷酸和盐酸的混合液, 腐蚀 20 s)在 AlGaInP 基 LED 芯片上表面制备出类三角形的纳米表面粗化结构, 如图 7 所示。经过优化的纳米粗化结构, 在 20 mA 的注入电流下, LED 输出功率可提高 80%。亦可通过控制 LED 芯片 p-GaN 的生长温度, 在上表面 p-GaN 层生长时自然形成表面粗化结构。图 8 是在 850 °C 下金属有机物化学气相沉积得到的 LED 表面粗化结构^[7], 具有这种表面粗化结构的 LED 输出功率可提高 48.6%。Lin^[8]利用晶化刻蚀工艺在 GaN 基 LED 的 n-GaN 背面刻蚀出倒金字塔形的表面粗化结构, 如图 9 所示, 具有这种结构的 LED 的输出功率可提高 47%。

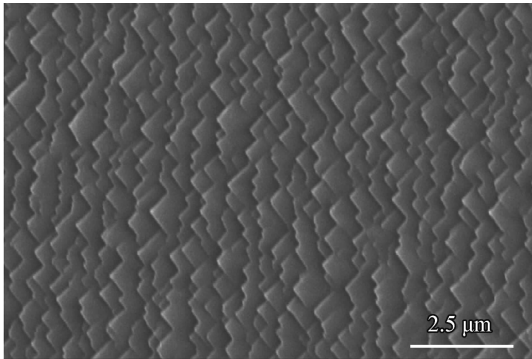


图 7 纳米表面粗化结构
Fig. 7 Nano-roughened surface

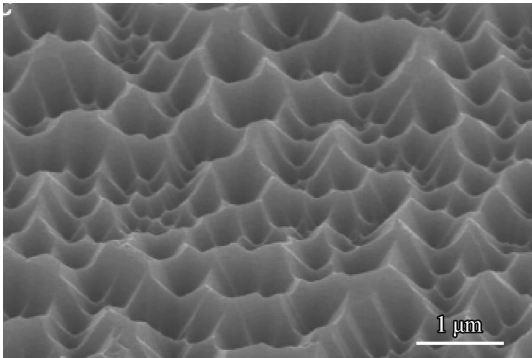


图 8 表面粗化的 p-GaN 层
Fig. 8 Surface of LED with roughed P-GaN

樊晶美等^[9]通过在不同条件下湿法腐蚀激光剥离后的 N 极性面的 GaN 材料, 获得了表面粗化后的垂直结构 LED, 研究了不同粗化形貌下器件光学性能的变化, 得到最优化的湿法腐蚀条件: 经由质量分数为 30%、温度为 60 °C 的 KOH 溶液腐蚀后, 未封装的垂直结构 LED 芯片的光

提取效率增加了近 1 倍。刘思南^[10]等使用化学湿法腐蚀对 AlGaInP 基红光 LED 窗口层 GaP 表面进行粗化, 结果表明, 器件的外量子效率得到了约 29% 的提高。

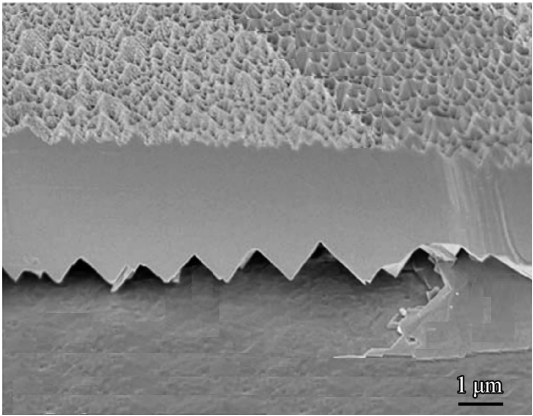


图 9 n-GaN 背面表面倒金字塔结构
Fig. 9 Roughened patterned backside on the n-GaN surface

2.3 倾斜侧面

当有源层发出的光传播到芯片侧面时, 如芯片侧面是垂直的, 则由于全反射, 大部分射向侧面的光线不能逸出, 但如芯片侧面有倾角, 则这些光子可能逸出芯片内部, 如图 10 所示。这样, 射向芯片侧面的光线被提取出来, 从而提高出光效率。

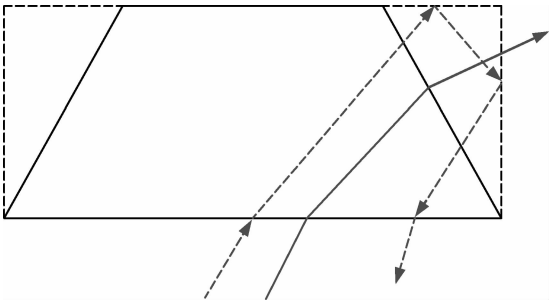


图 10 倾斜侧面取光原理示意图
Fig. 10 Schematic drawing of the light may be extracted from the oblique sidewall

Kao^[11]用电感耦合反应离子刻蚀制备出侧面倾角为 22° 的 LED 芯片。与标准芯片相比, 该芯片将输出功率从 3 mW 提高到 5 mW, 提高 70%。Hui^[12]用激光微加工技术制造具有 50° 侧向倾角的 LED 芯片 (如图 11), 再在侧面镀上一层高反射率的银膜。这种 LED 芯片通过倾斜侧面银膜的多次反射, 使光子返回到逸出锥, 从而能够取出被标准芯片的 GaN 层和衬底吸收的光

线。结果表明,在 30 mA 的注入电流下,该芯片输出功率由标准芯片的 2.6 mW 提高到 7.67 mW,提高了 195%。这表明,在 LED 芯片侧面加工出一定的倾角,亦能大幅度提高出光效率。

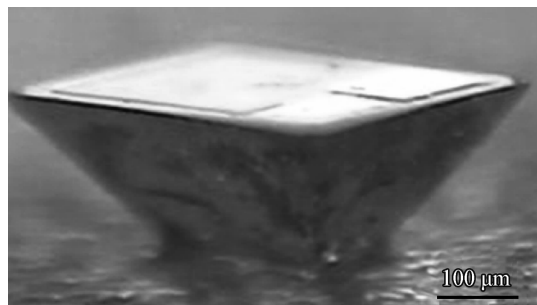


图 11 侧面倾斜角为 50° 的 LED 照片
Fig. 11 Optical image of the LED with 50° inclined sidewalls

2.4 光子晶体

无论是图形衬底、表面粗化技术,还是改变芯片侧面倾角,提高出光效率的基本原理都是将有源层发出的光集中到狭窄的逸出锥。除了把各向同性产生的光子引导到逸出锥外,也可利用光子晶体来提高光的提取效率。Baba^[13]认为光子晶体提高 LED 输出功率的原因主要在于以下 3 个方面:一是光子晶体类似“稀释的半导体”,具有较低的折射率,从而扩大了逸出锥;二是由于光子晶体的衍射和强烈的散射作用,使得侧向传播的光改变传播方向,变为垂直方向射出,如图 12 所示;三是由于光子晶体的光子禁带,横向辐射被抑制。Baba^[13]制备出了如图 13 的二维光子晶体,大幅提高了出光效率。

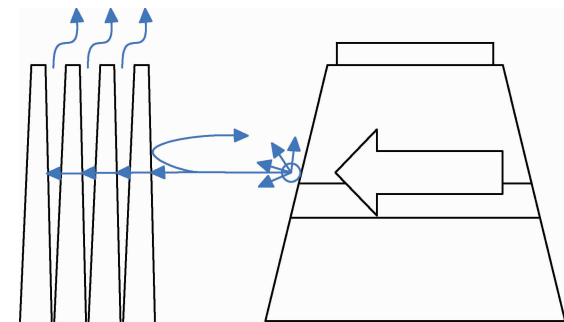


图 12 光子晶体使向侧面传播的光线变为垂直方向射出
Fig. 12 Illustration of light propagation from the sidewall

Kim^[14]应用激光全息技术在 GaN 基 LED 上窗表面制备出晶格常数为 300、500、700 nm 的圆孔阵列二维光子晶体,如图 14 所示。试验结

果表明,晶格常数为 500 nm 的光子晶体提高输出功率 1 倍以上。Kim^[15]用纳米印压光刻技术在 GaN 基绿光 LED 上表面制备圆孔阵列结构光子晶体,结构孔的直径为 93 nm,晶格常数为 328 nm,该光子晶体使光输出功率提高了 78%。

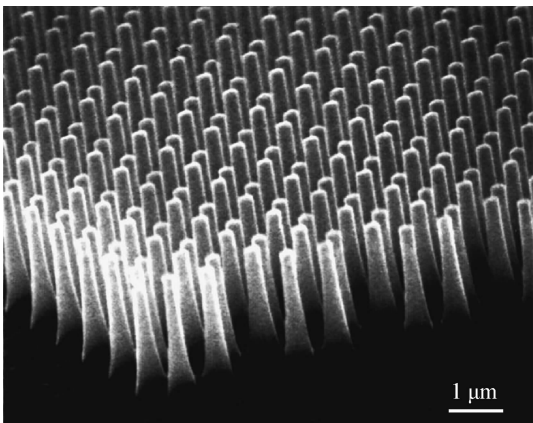


图 13 二维光子晶体 SEM 照片
Fig. 13 SEM views of two-dimensional photonic crystal

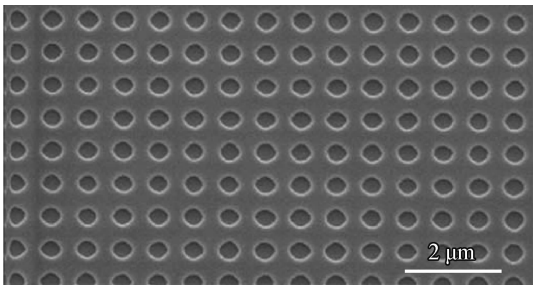


图 14 基于微孔阵列的二维光子晶体 SEM 照片
Fig. 14 SEM image for photonic crystal of two-dimensionally arrayed air-hole

殷子豪等^[16]通过理论分析计算表明,表面覆盖 ITO 层的六角排列圆形光子晶体能提高 GaN 基蓝光 LED 出光效率 2 倍。陈健等^[17]研究了晶格常数为 412 nm、占空比为 0.7 的正方排列和六角排列的圆形光子晶体对出光效率的影响。无光子晶体时,标准 GaN 基蓝光 LED 出光效率大约为 5%,引入正方和六角排列光子晶体后出光效率分别为 30%和 36%。陈依新等^[18]采用电子束光刻和感应耦合等离子体干法刻蚀相结合的技术,在 AlGaInP 系 LED GaP 上刻蚀规则的可见光波长量级的周期孔状结构,即形成空气-GaP 组成的光子晶体。引入光子晶体后,LED 的光提取效率及发光强度较常规 LED 平均提高 16%。

2.5 复合取光结构

图形衬底、表面粗化、芯片侧面倾角可分别将有源层发出的射向下方、上表面和侧面的、原本发生全反射的光线改变传播方向,引导到逸出锥射出芯片而被有效利用。实际上,这些技术可复合使用,更大程度提高出光效率。Kang^[19]比较了4种不同组合表面粗化结构的出光效率。其中,样品A是传统LED芯片结构,样品B是在ITO透明层上加工出半球状的表面粗化结构,样品C是在p-GaN层上加工出表面粗化结构,样品D是在p-GaN层和ITO透明层表面均加工出半球状的表面粗化结构。研究表明,样品B、C、D输出功率比样品A在20 mA的注入电流下分别提高23.8%、45.6%和70%。提高的原因在于更多的光线被取出。这表明复合取光结构能够更大程度提高出光效率。

Lee^[20]集成了图形衬底、上表面印压出金字塔或倒金字塔微结构,并在微结构上加工出纳米粗化结构。图15是表面经过纳米粗化处理的倒金字塔。结果表明,表面具有金字塔结构的LED芯片与传统芯片相比,输出功率提高33%;纳米粗化表面能进一步提高输出功率5%。Huang^[21]用湿法刻蚀方法在GaN基LED倒装芯片蓝宝石衬底上加工出倾斜的侧面和粗化的表面(图16)。测试结果表明,传统倒装芯片输出功率为9.3 mW,而该芯片的输出功率为14.2 mW,即外量子效率提高比传统倒装芯片提高52%。

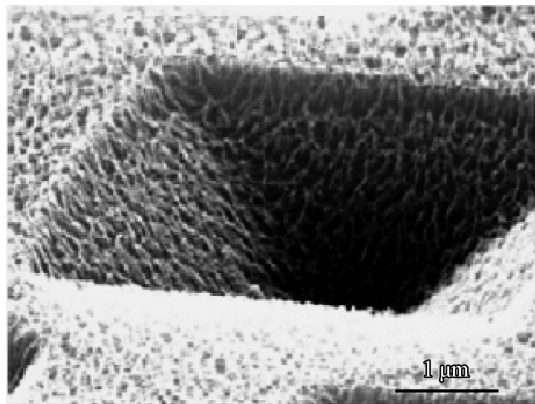


图15 表面具有纳米粗化结构的倒金字塔取光结构
Fig. 15 Inverted pyramid with nano-roughened surface

3 LED芯片取光结构发展趋势

LED芯片取光结构的研究引发了制造、光

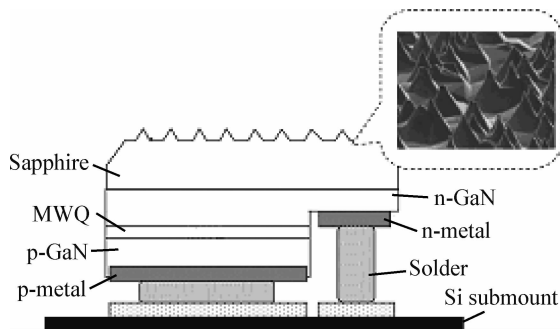


图16 具有倾斜侧面和表面粗化结构的倒装芯片
Fig. 16 Flip-chip structure of LED with beveled side-walls and roughened surface

学、材料等多学科交叉的科学问题,随着LED芯片取光结构研究的不断深入,其深度和广度进一步拓展,并将在以下几方面取得突破:

(1) 取光结构设计制造的一体化。目前对于取光结构的研究还局限在找到一种取光结构制造方法。利用这种方法在芯片的上窗层、衬底、侧面等部位加工出一定的结构,然后测试基于这种结构的芯片的出光效率。一方面,无法判定何种取光结构具有较高的光提取效率,也不清楚取光结构的最优结构参数;另一方面,难以通过控制制造工艺参数,获得要求的取光结构。因此,按功能要求设计取光结构,然后根据结构形状和参数进行制造是该技术领域发展的方向,实现由功能需求设计取光微结构特征参数,并按要求控制取光结构成形的目的。

(2) 取光结构的复合化。目前还集主要中在各单项取光结构及其制造。为获得更高的出光效率,集成多种取光结构的芯片将是未来的发展趋势之一。难点在如何对多种取光结构进行组合、设计和优化以及研究出相应的制造方法。

(3) 多芯片集成封装模块取光结构的制造。单灯功率不足是限制LED用于普通照明的瓶颈之一,多芯片集成封装是获得大功率LED光源的有效途径之一,通过将多个小尺寸芯片串联或并联可以获得足够的光通输出。由于采用工艺成熟稳定的小芯片集成,成本较低,有利于LED光源模块在通用照明领域的推广应用。但多芯片集成封装同样引发多个芯片发出的光在封装模块内发生强烈的全反射而不能射出封装模块,最终被封装材料、基板和芯片本身吸收,导致整体发光效率大幅下降。因此,如何设计、制造多芯片集成封装模块取光结构是未来的研究方向。

(4) 取光结构的高效低成本制造。尽管取光结构能够大幅提高芯片的出光效率,但是只有通过高效低成本的制造方法才能促使取光结构在 LED 芯片中的大规模、低成本应用,从而推动 LED 照明技术的发展及其产业化。

4 结 论

LED 光源的出现和发展,将引发照明领域的一场革命。然而,LED 用于普通照明还面临发光效率低、单灯功率不足的瓶颈,虽然国内外在取光结构方面已有很多研究,但较分散且缺乏系统理论研究,还不能为取光结构具体应用提供完善的理论指导。如何根据功能需求设计取光结构并提出高效低成本的制造方法是提高 LED 芯片出光效率、推动 LED 光源在普通照明领域大规模应用的关键,建立相应理论亦是未来发展的需要。随着我国“国家半导体照明工程”实施,LED 在技术和产业发展方面必将取得重大突破。

参考文献

- [1] 李刚. 半导体照明发光二极管(LED)芯片制造技术及相关物理问题 [J]. 物理学和高新技术, 2005, 34(11): 827-833.
- [2] Huang H W, Lin C H, Huang J K, et al. Investigation of GaN-based light emitting diodes with nano-hole patterned sapphire substrate (NHPSS) by nano-imprint lithography [J]. Materials Science and Engineering B, 2009, 164(2): 76-79.
- [3] Lee J H, Lee D Y, Oh B W, et al. Comparison of InGaN-based LEDs grown on conventional sapphire and cone-shape-patterned sapphire substrate [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(1): 157-162.
- [4] Wu D S, Wang W K, Wen K S, et al. Fabrication of pyramidal patterned sapphire substrates for high-efficiency InGaN-based light emitting diodes [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2006, 153(8): G765-G770.
- [5] Lin W Y, Wu D S, Huang S C, et al. Enhanced output power of near-ultraviolet InGaN/AlGaN LEDs with patterned distributed Bragg reflectors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58(1): 173-179.
- [6] Lee Y J, Lu T C, Kuo H C, et al. Nano-roughening n-side surface of AlGaInP-based LEDs for increasing extraction efficiency [J]. Materials Science and Engineering B, 2007, 138(2): 157-160.
- [7] Lai F I, Hsieh Y L, Lin W T. Enhancement in the extraction efficiency and resisting electrostatic discharge ability of GaN-based light emitting diode by naturally grown textured surface [J]. Diamond and Related Materials, 2011, 20(5/6): 770-773.
- [8] Lin C F, Lin C M, Chen K T, et al. Blue light-emitting

diodes with a roughened backside fabricated by wet etching [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(20): 201102.

- [9] 樊晶美, 王良臣, 刘志强. 表面粗化对 GaN 基垂直结构 LED 出光效率的影响 [J]. 光电子·激光, 2009, 20(8): 994-996.
- [10] 刘思南, 邹德想, 张剑铭, 等. 表面粗化提高红光 LED 的光提取效率 [J]. 固体电子学研究与进展, 2008, 28(2): 245-247.
- [11] Kao C C, Kuo H C, Huang H W, et al. Light-output enhancement in a nitride-based light-emitting diode with 22 undercut sidewalls [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(1): 19-21.
- [12] Hui K N, Hui K S, Lee H, et al. Enhanced light output of angled sidewall light-emitting diodes with reflective silver films [J]. Thin Solid Films, 2011, 519(8): 2504-2507.
- [13] Baba T, Inoshita K, Tanaka H, et al. Strong enhancement of light extraction efficiency in GaInAsP 2-D-arranged microcolumns [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(11): 2113-19.
- [14] Kim D H, Cho C O, Roh Y G, et al. Enhanced light extraction from GaN-based light-emitting diodes with holographically generated two-dimensional photonic crystal patterns [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(20): 203508-1-3.
- [15] Kim J Y, Kwon M K, Park S J, et al. Enhancement of light extraction from GaN-based green light-emitting diodes using selective area photonic crystal [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(25): 251103-1-3.
- [16] 殷子豪, 王庆康. 光子晶体几何结构设计对 LED 出光效率影响的研究 [J]. 量子光学学报, 2009, 15(4): 358-363.
- [17] 陈健, 李小丽, 李海华, 等. 基于正方和六角排列结构光子晶体对发光二极管出光效率的研究 [J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6216-21.
- [18] 陈依新, 郑婉华, 陈微, 等. 表面为二维光子晶体结构的 AlGaInP 系发光二极管的研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(11): 8083-87.
- [19] Kang J H, Ryu J H, Kim H K, et al. Comparison of various surface textured layer in InGaN LEDs for high light extraction efficiency [J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3637-47.
- [20] Lee Y C, Ni C H, Chen C Y. Enhancing light extraction mechanisms of GaN-based light-emitting diodes through the integration of imprinting microstructures, patterned sapphire substrates, and surface roughness [J]. Optics Express, 2010, 18(S4): A489-A498.
- [21] Huang S H, Horng R H, Wen K S, et al. Improved light extraction of nitride-based flip-chip light-emitting diodes via sapphire shaping and texturing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(24): 2623-25.