

纳米压印技术在 LED 器件制备中的应用

庄喆 刘斌* 张荣 李烨操 谢自力 陈鹏 赵红 修向前 郑有料

(南京大学电子科学与工程学院江苏省光电信息功能材料重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要 纳米压印技术(NIL)是一种机械制备纳米图形的微加工技术,它具有设备简单、易于操作、重复性好和成本低等优点。同时,它可以大面积制备高分辨率的纳米图形,使得大批量低成本地生产微纳器件成为可能。而固态照明工程目前是被全世界所关注的重要领域,制备出高效 III-V 化合物半导体发光二极管(LED)来代替现有的传统照明工具已经掀起了照明技术的革命,以实现高质量、绿色的照明。重点介绍了纳米压印技术的发展和工艺过程,并详细论述纳米压印技术在无机和有机 LED 制备中的应用,实现纳米结构 LED 以及表面光子晶体结构,从而提高 LED 的发光效率。

关键词 光学制造;纳米压印技术;发光二极管;纳米结构;外量子效率;光子晶体

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.020002

Application of Nanoimprint Lithography for the Fabrication of Light-Emitting Diodes

Zhuang Zhe Liu Bin Zhang Rong Li Yecao Xie Zili Chen Peng Zhao Hong
Xiu Xiangqian Zheng Youdou

(*Jiangsu Provincial Key Laboratory of Photonic and Electronic Materials Science and Technology, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China*)

Abstract Nanoimprint lithography (NIL) is a nano-size scale fabrication technology which could fabricate patterns mechanically with such advantages as simple machines, easy operation, good repeatability and low costs. Meanwhile, it can achieve precise nanopatterns on whole 2-inch or 4-inch wafers (1 inch=25.4 mm), which makes it possible to fabricate nano-size optoelectronic devices with high throughput and low costs. On the other hand, solid state lighting using compound semiconductor materials is an attractive field both in academia and industry of the world. High-efficiency light-emitting diodes (LED) are taking place of traditional lighting sources, in order to realize high-quality, green lighting. This review covers the basic principles and process of nanoimprinting, with an emphasis on the application of nanoimprinting for the new inorganic and organic LED, achieving the nano-LED structures and photonic crystals to improve the efficiency of optoelectronic devices.

Key words optical fabrication; nanoimprint lithography; LED; nanostructure; extraction efficiency; photonic crystals

OCIS codes 220.4241; 230.3670; 050.5298; 230.5298

1 引言

对于纳米科学与技术而言,在各种不同材料上实现从微米、亚微米向纳米量级结构的发展是至关重要

收稿日期: 2012-08-10; **收到修改稿日期**: 2012-09-19; **网络出版日期**: 2013-01-07

基金项目: 国家 973 计划(2011CB301900, 2012CB619304)、国家 863 计划(2011AA03A103)、国家自然科学基金(60990311, 60820106003, 60906025, 60936004, 61176063)、江苏省自然科学基金(BK2008019, BK2011010, BK2010385, BK2009255, BK2010178)和南京大学研究生科研创新基金资助课题。

作者简介: 庄喆(1988—),男,硕士研究生,主要从事氮化镓基纳米结构 LED 器件的制备工艺以及发光性质等方面的研究。E-mail: zhuangzhenju@gmail.com

导师简介: 张荣(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事半导体低维结构和相关材料与器件、半导体照明和半导体自旋电子学等方面的研究。E-mail: rzhang@nju.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: liubin.nju@gmail.com

的。目前利用已经有很多纳米光刻技术实现的高精确度纳米图形,比如 X 射线曝光技术、电子束曝光技术和扫描探针光刻技术等,但是它们都无法大面积低成本地制备纳米结构。而纳米压印技术(NIL)的出现,无疑给实现这一目标带来了曙光。纳米压印技术是 1995 年由美国普林斯顿大学的 Chou 等^[1]率先提出的,这是一种不同于传统光刻技术的新图形转移技术。传统的光刻技术主要是利用电子和光子改变光刻胶的物理化学性质,从而得到相应的微、纳米图形。纳米压印技术不使用光线或者辐照使光刻胶感光成形,而是直接利用物理学的机理机械地在光刻胶上构造纳米尺寸图形。正是由于这种机械作用,使得纳米压印技术不会受到光子衍射和电子散射的限制,可以大面积地制备纳米级图形。同时,由于这项技术所用的设备简单,制备时间短,压印模板可以重复使用,使得应用该技术制备纳米图形所需的成本较低。

由于这种技术的优越性,将其应用于固态照明领域将变得非常重要,在实现低成本的同时在发光二极管(LED)中引入纳米结构,更好地提高发光效率。所以,进一步了解纳米压印技术及其在固态照明领域的相关应用非常必要。本文介绍纳米压印技术的基本原理、重要因素以及发展现状,并论述该技术在固态照明领域中提高 LED 发光效率的应用。

2 纳米压印工艺

纳米压印技术自提出以后发展迅速,在欧美和日本等地引起了很大的关注,目前国内也有很多课题组在从事这方面的研究。在过去十几年里的飞速发展后,它已经成为了 50 nm 以下的重要光刻技术之一,美国麻省理工学院(MIT)在 2003 年将其列为影响世界的十大技术之一^[2]。目前,这项技术的最先进水平已经达到 5 nm^[3]。

早前的纳米压印技术主要是热塑纳米压印技术(HEL),分为两个过程:纳米压印和图形转移。在压印过程中,将一块表面已经制备好纳米图形的硬模板在一定的温度和压强下压在涂有光刻胶的衬底上,从而在光刻胶上形成高低不平的形貌,即纳米图形。而在硬模板突起压入光刻胶的部分下仍然有很薄的一层光刻胶(残余胶),主要是为了防正模板与衬底直接接触,保护模板上的纳米图形结构,使模板可以重复使用。而在大多数情况下,这一层薄光刻胶需要使用各向异性的氧等离子体刻蚀去除,比如反应离子刻蚀(RIE)。在图形转移过程中,主要通过各向异性刻蚀技术[比如 RIE 和电感耦合等离子体(ICP)刻蚀]将纳米图形转移到衬底上,然后去除衬底表面的光刻胶就可以在衬底上得到纳米图形了。整个纳米压印的基本过程如图 1 所示。

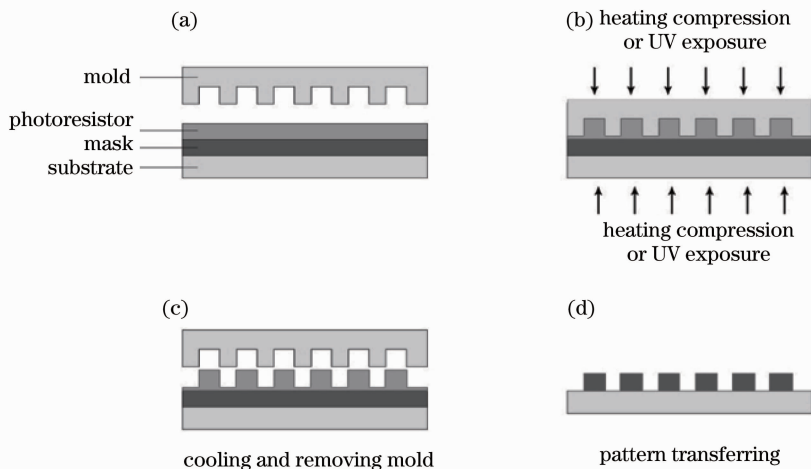


图 1 纳米压印实验过程

Fig. 1 Schematic of the NIL process

Chou 等^[4,5]应用高分辨率的电子束曝光技术以及剥离和 RIE 制备了直径为 10 nm、周期为 40 nm、高为 60 nm 的 SiO₂ 点阵模板,并且用该模板成功地在硅衬底的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)上压印出了对应的纳米图形,如图 2 所示。可以看出,纳米压印技术能够大面积高分辨率地复制出纳米图形。当然,由于纳米压印技术是基于机械作用的,完全不同于传统的光刻技术,所以它也面临的一些问题和挑战,例如光刻胶与模

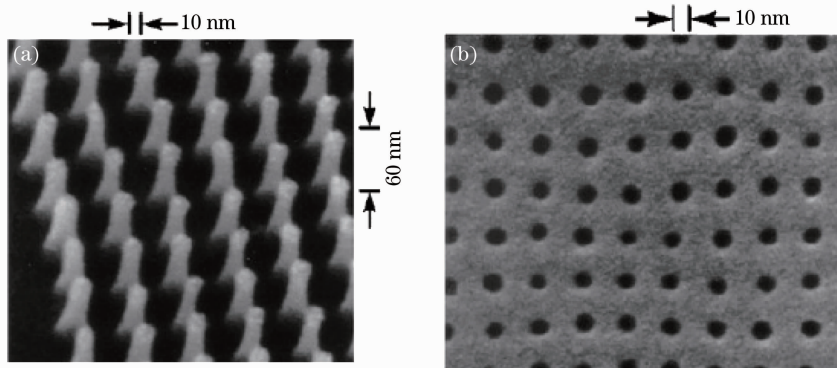


图2 (a)直径10 nm的圆柱阵列的扫描电子显微镜图像；(b)用该模板在掩模胶上压印后得到的扫描电子显微镜图像^[4,5]

Fig. 2 (a) Scanning electron microscopic (SEM) image of a fabricated mold with a 10 nm diameter array;

(b) SEM image of hole arrays imprinted on PMMA by using such a mold^[4,5]

板的脱离等。

随着研究的不断深入,一些新的改革技术也随之诞生,它们很大程度上带动了纳米压印技术的发展,而改进工艺后的纳米压印技术也为人们所广泛应用。这些改进的纳米压印技术主要有滚轴纳米压印技术(RNIL)^[6]、基于紫外光的纳米压印技术(UV-NIL)^[5,6]、纳米压印和光刻相结合的微加工技术(CNP)^[5,6]及反纳米压印技术(R-NIL)^[5,6]等,当然,还有很多的方法正在被科研工作者开发。这些改良的纳米压印工艺技术各有各的优点,原理基本是一致的,只是工艺更加简单、实用和廉价。

对于纳米压印技术来说,最重要的就是以下两点:1)需要具有高分辨率纳米图形的模板;2)需要能够在变形固化后形成高分辨率图形的合适的光刻胶。只要这两点能够兼容好,再加上合适的实验条件,就可以制备出高质量的纳米图形。下面介绍纳米压印技术所用的模板以及对应的光刻胶。

2.1 纳米压印模板

在纳米压印中,模板是非常重要的,因为模板上的分辨率决定了光刻胶上图案的分辨率。由于纳米压印技术是利用压力作用在光刻胶上面形成纳米图形的,所以纳米压印模板必须使用硬材料制作,而且模板必须稳定,可以重复使用。为此,纳米压印模板主要有以下几个特点:高硬度,小的热膨胀系数,好的抗黏滞性能。当然,并不排斥使用一些表面图形坚硬的具有弹性的模板。这种模板整体具有弹性而局部却很坚硬,这样对于那些不平整的衬底而言,能够更好地使模板与衬底紧密接触而不需要使用很大的压力,对于压印是有利的。在脱模过程中,为了避免模板与聚合物胶粘连在一起,常采用在表面形成自组装分子层(SAM)的方法。除此之外,模板的耐用性能一个重要的影响因素是表面涂层的抗疲劳性能和稳定性,这是一个关键的问题,决定着压印技术能否在工业上得到应用。

模板的制备可以采用多种方式实现,常用的有电子束、极紫外光、聚焦离子束或反应离子刻蚀等,也可采用传统的机械刻划形成。常用的模板材料有硅/二氧化硅、镍、石英玻璃模板(硬模)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)模板(软模),具体的制备工艺在很多文献中都已经提及。图3(a)~(c)给出了一些模板图形,它们都是应用光栅模板和两次压印技术得到的^[5]。当然,还可以制备一些非常复杂的三维纳米图形模板,如图3(d)所示应用聚焦离子束(FIB)技术制备得到的模板图形。

2.2 纳米压印光刻胶

光刻胶是纳米压印技术中另一个重要的影响因素。由于压印过程是一个机械过程,所以当光刻胶处于玻璃态时,需要有很好的流动性才能保证制备图形的均匀性。光刻胶一般具有以下几个特点:1)聚合物胶可以在外界压力作用下发生流动,即聚合物是非晶态的。2)聚合物的热膨胀系数和压力收缩系数要小,使聚合物图形在降温撤模后的形变较小。3)聚合物相对于衬底要有较高的干法刻蚀选择性。当然,对于不同的压印技术,可能需要使用不同的材料作为光刻胶,而且也有越来越多的新材料被开发用于压印光刻胶,具体见文献^[5]。

同样,为了防止光刻胶和模板粘连,光刻胶的改性是必须的。要求光刻胶与衬底黏接较好,而与模具黏

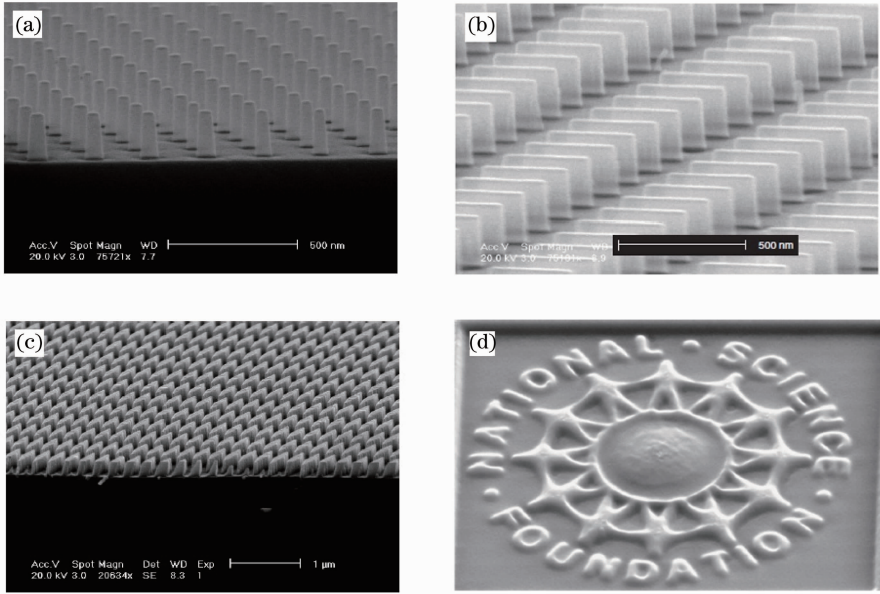


图3 不同尺寸大面积模板的扫描电子显微镜图像。(a)用相同光栅模板旋转 90° 压印两次得到的柱阵列；(b)用两块不同周期的光栅模板压印两次得到的块阵列；(c)用相同的光栅模板旋转 60° 压印两次得到的菱形阵列；(d)应用聚焦离子束制备的模板^[5]

Fig. 3 SEM images of large-area molds with arrays of different sizes. (a) A pillar array produced by imprinting twice with the same grating mold but orthogonal direction; (b) a bar array produced by two grating molds with different periods; (c) diamond-shaped array produced by two imprints that use the same grating mold but are oriented at an angle of 60° ; (d) mold fabricated by using FIB, showing a gray-scale pattern^[5]

接较差,可用氟基添加剂(1,1,2,2H 过氟辛基)-三乙氧基硅烷改性。除了旋涂单层光刻胶在衬底外,还可以使用多层工艺,即在衬底预先旋涂其他光刻胶如 PMGI,它有与衬底的结合性能良好的优点且有平整衬底的作用,适合于剥离工艺。

3 纳米压印在 LED 器件制备中的应用

垂直取向的一维纳米线或纳米柱半导体晶体阵列受到研究者的广泛关注。这种一维垂直结构的光电子器件具有很大的潜在优势。在 LED 器件中,同平面结构相比,垂直一维半导体纳米线(柱)阵列降低了内外界面间的反射,增加了表面接触面积,从而提高了 LED 的发光效率。另外,这种纳米线(柱)结构减小了异质外延界面间的应力,有利于抑制大晶格失配条件下外延生长中的不良效应。应用这种纳米线(柱)结构还可以制备出不同量子阱结构的有源层,从而实现复合多波长的发光过程,获得新型无荧光粉的白光 LED 芯片,这对于固态照明应用至关重要。

气液固(VLS)方法制备无机材料纳米线结构是目前广泛使用的一种技术方法,例如 Lai 等^[7]应用低温固相法生长了垂直的 ZnO 纳米线,直径在 $100\sim 600$ nm 之间,并以此为结构制备了垂直 LED 器件,证明了这种器件以纳米线阵列来诱导光波导发射。然而它有一个不可避免的缺点就是使用金属作为催化剂可能对所生长的半导体纳米线造成污染,甚至可能改变半导体纳米线 p-n 结的性质。而通过选择性生长方法制备有序纳米阵列则不会存在这样的问题。当然,选择性生长有序的纳米阵列一个很重要的步骤就是需要制备出有序的纳米图形,只有高分辨率的有序纳米图形才能保证纳米阵列的高质量。对于纳米图形的制备,传统的光刻技术已经难以企及,需要更高分辨率的光刻技术,如 X 射线光刻技术、极紫外光刻技术和电子束曝光技术等。采用极紫外光刻技术,随着波长的减小,出现了许多新的技术难题,如分辨率及材料的选择。电子束光刻(EBL)具有非常高的分辨率,但其生产时间太长;X 射线光刻虽然可以实现高产率,但成本高昂。而纳米压印技术可以在保证高质量图形的同时,做到耗时短、成本低和高产出。Martensson 等^[8]在 2004 年报

道了基于纳米压印技术制备纳米线阵列的方法,并成功地调控纳米线的直径和周期。他们应用纳米压印技术制备出了纳米图形,并结合金属有机物气相外延技术(MOVPE)技术和 VLS 生长方法制备出了 InP 纳米线阵列,与应用 EBL 技术制备出的纳米线阵列进行比较,证明这两种方法制备出的纳米线都是高质量的,且差别不大。所以,应用纳米压印技术替代电子束曝光技术制备高质量的纳米线阵列是可行的。另外,这种方法也同样适用于其他的 III-V 族化合物纳米线的制备。基于这种纳米线阵列结构,瑞典 Lund 大学在硅衬底和磷化镓衬底上大面积制备了 GaAs/InGaP 的纳米线 LED,虽然发光效率不高,但是这种在硅片上集成纳米点光源的方法可能会成为未来光电集成的重要实现手段^[9]。近两年,这种垂直结构的 III-V,II-VI 族化合物半导体 LED 研究得到了很大的发展。2011 年,Hong 等^[10]在 n 型 GaN/蓝宝石上制备出了 GaN 纳米柱,报道的 GaN 纳米柱的平均长度、直径和周期分别是 520 nm、220 nm 和 550 nm,并在纳米柱上包裹 InGaN/GaN 有源层,实现了 GaN 基可见光 LED 的多色发光,并且通过控制生长有源层厚度,可以实现显色可控,这对实现 GaN 基 LED 的全色显示具有重要价值。同时他们还在 Si 衬底上制备了 ZnO 的纳米柱结构,报道的 ZnO 纳米柱的直径由掩模孔的直径决定,范围在 200~600 nm 之间,应用 ZnO 和 GaN 异质结构生长制备出了类似的 LED 结构,这使得在硅片上实现可见光微纳 LED 成为可能^[11]。而在 2010 年,该小组通过自组装技术和 ICP 刻蚀并结合石墨烯材料电极制备出了 GaAs/AlGaAs 超晶格纳米柱阵列的混合型 LED,该 LED 中纳米柱长度为 2 μm ,直径为 400 nm,并且由于二维石墨烯的光吸收和光反射都很小,从而在电流有效注入的同时也保证了发光效率^[12]。这种结合了纳米柱和二维石墨烯结构的新型器件可能为光电子器件的设计开辟了一条新的思路。可以看到,这些器件的纳米结构尺寸都在纳米压印的技术范围之内。所以,纳米压印必然会成为这种纳米 LED 的重要实验技术,同时它也为这种器件走向产业化提供了可能。当然,对于不同的纳米线(柱)结构,可能需要应用不同的纳米压印技术(比如使用紫外压印、热压印等),需要使用不同的压印模板,采取不同的 RIE 或 ICP 刻蚀条件,同时,采用金属有机物化学气相外延(MOCVD)和分子束外延(MBE)技术生长一维纳米线(柱)的工艺也有别于传统的薄膜生长工艺,需要研究和开发。

目前的 LED 外量子效率仍然相对较低,这在很大程度上限制了 LED 在照明领域的发展,而通过一些有效的途径可以很好地提高 LED 的发光效率。纳米压印技术不仅可以应用于 LED 材料结构的生长,而且在提高其光提取效率时也有很重要的应用。我们知道,由于 LED 器件中半导体材料/空气界面存在全反射,大大降低了它的出光效率,导致总发光效率降低。在这方面,研究者们想了很多的方法来提高其外量子效率,例如生长分布式布拉格反射层结构、表面粗化技术、异性芯片技术、采用光子晶体结构、倒装芯片技术、激光剥离技术和透明衬底技术等^[13]。Okamoto 等^[14]应用表面等离激元方法提高了 InGaN 量子阱 LED 的出光效率。Chao 等^[15]从理论上证明了对于倒装 GaN 镓 LED 来说,在蓝宝石衬底和 GaN 表面引入光子晶体可以很好地提高其出光效率。Wierer 等^[16]则应用测试光子晶体 LED 效率和 S 矩阵模拟计算证明了光子晶体确实有利于增强 LED 的光提取效率。在国内,上海交通大学在 LED 的 GaN 层引入二维正方排列圆柱形光子晶体,采用时域有限差分方法从理论上研究了光子晶体的几何参数随机扰动对于 LED 出光效率的影响,并利用禁带理论分析了出光效率增强的机理^[17]。中国科学院半导体研究所应用常规的光刻工艺在 LED 器件表面上制备了二维的光子晶体,使得器件的出光效率提高了 38%^[18]。当然,国内外研究者在 LED 中制备光子晶体方面还做出了很多重要的研究工作,而纳米压印技术也成为了他们制备光子晶体的重要实验手段。台湾研究人员制备了图形化蓝宝石衬底上的 GaN 基 LED,同时在这个 LED 的 n 型 GaN 层中运用纳米压印技术制备了二氧化硅的光子准晶结构,发光效率比普通 LED 提高了 48%^[19]。另外,很多研究组通过紫外等纳米压印和 ICP 刻蚀技术在 LED 的 GaN 表面制备出了规则的纳米结构,从而很好地提高了 LED 的出光效率^[19~24]。其中,Byeon 等^[24]通过紫外纳米压印在 2 inch(1 inch=25.4 mm) p 型 GaN 上实现了二维光子晶体结构,这也充分展现了纳米压印在大规模制备纳米图形方面的优势。当然,还有一些研究组用纳米压印在 LED 结构最顶层的氧化铟锡(ITO)层^[25]或者 TiO₂ 层^[26]制备了二维光子晶体,这样同样可以提高 LED 的出光效率,而且这种方法不会造成有源层离子刻蚀损伤。

纳米压印技术除了无机材料中具有重要用途外,同样也可以应用于一些有机材料。研究证明,运用纳米压印直接在有机发光材料上进行图形化不会改变有机发光材料的发光性质^[27],而且具有一维周期纳米结构的有机发光材料的发光效率会比没有该结构的提高两倍以上^[28],这就为制备有机发光材料纳米结构器件

提供了一种重要的技术手段。而基于这项技术,许多研究组在有机发光二极管(OLED)的制备中做出了很多重要工作。美国德克萨斯大学的 Trivedi 等^[29]应用低温下的纳米压印技术得到了高密度的纳米光栅 OLED 器件,实现了最小电荷传输下 OLED 的电隔离和孤立光发射。Kang 等^[30]应用纳米压印技术制备了半透明金属电极,而这种电极比 ITO 更有利于应用在 OLED 器件中。当然,纳米压印制备出的光子晶体同样可以很好地提高 OLED 的出光效率,如在玻璃衬底上引入光子晶体^[31],或者在玻璃衬底上的聚合物层中制备纳米结构^[32,33]等。

4 结束语

纳米压印技术的发展,使得低成本制备超高分辨率的周期性纳米图形变为现实。应用纳米压印技术制备纳米结构的 LED,在保证结构质量、提高发光效率的同时也实现了低成本和高产出,为这种新型一维纳米结构的 LED 器件实现工业应用具备了可行性。相信随着纳米压印技术的不断发展和成熟,它必将广泛地应用于纳米科学领域和工业化生产,成为下一代光刻技术的重要实验手段之一。

参 考 文 献

- 1 S. Y. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom. Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(21): 3114~3116
- 2 Technology Review. 10 emerging technologies that will change the world [J]. *MIT Technol. Rev.*, 2003, (106): 36
- 3 M. D. Austin, H. X. Ge, W. Wu *et al.*. Fabrication of 5 nm line width and 14 nm pitch features by nanoimprint lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(26): 5299~5301
- 4 S. Y. Chou, P. R. Krauss, W. Zhang *et al.*. Sub-10 nm imprint lithography and applications[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1997, **15**(6): 2897~2904
- 5 L. J. Guo. Nanoimprint lithography: methods and material requirements[J]. *Adv. Mater.*, 2007, **19**(4): 495~513
- 6 王占国, 陈立泉, 屠海令. 中国材料工程大典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 588~605
- 7 E. Lai, W. Kim, P. D. Yang. Vertical nanowire array-based light emitting diodes[J]. *Nano Research*, 2008, **1**(2): 123~128
- 8 T. Martensson, P. Carlberg, M. Borgstrom *et al.*. Nanowire arrays defined by nanoimprint lithography[J]. *Nano Lett.*, 2004, **4**(4): 699~702
- 9 C. P. T. Svensson, T. Martensson, J. Tragardh *et al.*. Monolithic GaAs/InGaP nanowire light emitting diodes on silicon [J]. *Nanotechnology*, 2008, **19**(30): 305201
- 10 Y. J. Hong, C. H. Lee, A. Yoon *et al.*. Visible-color-tunable light-emitting diodes[J]. *Adv. Mater.*, 2011, **23**(29): 3284~3288
- 11 C. H. Lee, Y. J. Hong, Y. J. Kim *et al.*. GaN/ZnO Nanotube heterostructure light-emitting diodes fabricated on Si[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, **17**(4): 966~970
- 12 J. M. Lee, J. W. Choung, J. Yi *et al.*. Vertical pillar-superlattice array and graphene hybrid light emitting diodes[J]. *Nano Lett.*, 2010, **10**(8): 2783~2788
- 13 Feng Yi, Enhancement of the external quantum efficiency of GaN-based light emitting diodes [J]. *OME Information*, 2010, **27**(1): 23~28
冯 异. GaN 基发光二极管外量子效率研究进展[J]. 光机电信息, 2010, **27**(1): 23~28
- 14 K. Okamoto, I. Niki, A. Shvartser *et al.*. Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaN quantum wells[J]. *Nature Mater.*, 2004, **3**(9): 601~605
- 15 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
- 16 J. J. Wierer, A. David, M. M. Megens. III-nitride photonic-crystal light-emitting diodes with high extraction efficiency [J]. *Nature Photon.*, 2009, **3**(3): 163~169
- 17 Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diode with photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 233~236
陈 健, 王庆康, 李海华. 光子晶体结构参数的随机扰动对光子晶体 LED 出光效率的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 233~236

- 18 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
- 19 H. W. Huang, J. K. Huang, S. Y. Kuo *et al.*. High extraction efficiency GaN-based light-emitting diodes on embedded SiO₂ nanorod array and nanoscale patterned sapphire substrate[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(26): 263115
- 20 W. M. Zhou, G. Q. Min, Z. T. Song *et al.*. Enhanced efficiency of light emitting diodes with a nano-patterned gallium nitride surface realized by soft UV nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2010, **21**(20): 205304
- 21 H. Ono, Y. Ono, K. Kasahara *et al.*. Fabrication of high-intensity light-emitting diodes using nanostructures by ultraviolet nanoimprint lithography and electrodeposition[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, **47**(2): 933~935
- 22 S. H. Kim, K. D. Lee, J. Y. Kim *et al.*. Fabrication of photonic crystal structures on light emitting diodes by nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2007, **18**(5): 055306
- 23 K. J. Byeon, S. Y. Hwang, H. Lee. Fabrication of two-dimensional photonic crystal patterns on GaN-based light-emitting diodes using thermally curable monomer-based nanoimprint lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(9): 091106
- 24 K. J. Byeon, E. J. Hong, H. Park *et al.*. Full wafer scale nanoimprint lithography for GaN-based light-emitting diodes [J]. *Thin Solid Films*, 2011, **519**(7): 2241~2246
- 25 K. J. Byeon, H. Park, J. Y. Cho *et al.*. Fabrication of photonic crystal structure on indium tin oxide electrode of GaN-based light-emitting diodes[J]. *Phys. Stat. Sol. A*, 2011, **208**(2): 480~483
- 26 T. A. Truong, L. M. Campos, E. Matioli *et al.*. Light extraction from GaN-based light emitting diode structures with a noninvasive two-dimensional photonic crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(2): 023101
- 27 S. Y. Chou, J. Wang, X. Y. Sun *et al.*. Direct nanoimprint of submicron organic light-emitting structures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(18): 2767~2769
- 28 D. Pisignano, M. F. Raganato, L. Persano *et al.*. The luminescence quantum yield of organic one-dimensional periodic nanostructures[J]. *Nanotechnology*, 2004, **15**(8): 953~957
- 29 K. Trivedi, U. S. Bhansali, B. Gnade *et al.*. The fabrication of high density nanochannel organic light emitting diodes with reduced charge spreading[J]. *Nanotechnology*, 2009, **20**(40): 405204
- 30 M. G. Kang, L. J. Guo. Nanoimprinted semitransparent metal electrodes and their application in organic light-emitting diodes[J]. *Adv. Mater.*, 2007, **19**(10): 1391~1396
- 31 K. Ishihara, M. Fujita, I. Matsubara *et al.*. Organic light-emitting diodes with photonic crystals on glass substrate fabricated by nanoimprint lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(11): 111114
- 32 H. H. Cho, B. Park, H. J. Kim *et al.*. Solution-processed photonic crystals to enhance the light outcoupling efficiency of organic light-emitting diodes[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(21): 4024~4028
- 33 S. Jeon, J. W. Kang, H. D. Park *et al.*. Ultraviolet nanoimprinted polymer nanostructure for organic light emitting diode application[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(22): 223307