

表面微腔光子晶体 LED 的光提取特性

胡永禄, 刘道柳, 王 博, 吴俊芳, 李 潮

华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510640

摘要 提出并研究了一种基于表面微腔光子晶体的发光二极管(LED), 利用多个谐振腔出射光之间的相干耦合作用产生束流准直效应, 从而在提高光提取效率的同时, 也改善了出射光的空间指向性。通过对表面光子晶体 LED 结构进行优化设计, 使得表面微腔光子晶体 LED 的光提取效率较完整光子晶体 LED 提高了 77.3%, 而较普通平板 LED 提高了 1.8 倍以上。同时, 微腔光子晶体 LED 相对普通平板 LED 和完整光子晶体 LED 来说具有更加明显的远场能量汇聚效应, 让出射光具有更好的空间指向性。

关键词 光学器件; 发光二极管; 光提取效率; 光子晶体; 表面微腔; 三维时域有限差分法

中图分类号 O472+.3; TN312+.8 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0623004

Characteristics of Light Extraction for Surface-Microcavity Photonic Crystal LED

Hu Yonglu, Liu Daoliu, Wang Bo, Wu Junfang, Li Chao

*School of Physics and Optoelectronic Technology, South China University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510640, China*

Abstract In this paper, we propose and study a light-emitting diode (LED) based on the surface-microcavity photonic crystal (PC). The beaming-collimation effect is generated by the coherent-coupling interaction of the emergent light from the multiple resonant cavities. As a result, the light extraction efficiency of LED is improved, as well as the spatial directivity of emergent light. By optimizing the structure of the surface PC LED, the light extraction efficiency of the surface-microcavity PC LED is 77.3% higher than that of the perfect PC LED, and 1.8 times higher than that of the normal slab LED. Simultaneously, the proposed surface-microcavity PC LED has more obvious far-field energy converging effect than perfect PC LED and normal slab LED. This feature ensures the emergent light with better spatial directivity.

Key words optical devices; light-emitting diode; light extraction efficiency; photonic crystal; surface-microcavity; three-dimensional finite difference time domain method

OCIS codes 230.3670; 160.5298; 230.3120

1 引 言

发光二极管(LED)是一种功耗低、寿命长的绿色固态光源,其应用十分广泛。但是,传统 LED 的内量子效率与外量子效率之间存在显著的差距,标准的可见光 LED 的内量子效率接近 100%,而外量子效率因受全内反射及横向导波的影响不足 5%,有源层发射的光子绝大部分无法有效地提取出来,使其应用受到了极大的限制。因此如何提高 LED 的光提取效率成为了一个亟需解决的关键问题。目前提高 LED 光提取效率的主要途径有表面粗化、倒装焊芯片、光子晶体(PC)、激光衬底剥离等技术,其中光子晶体技术由于在提高光提取效率方面的巨大潜力和优越性而受到极大关注^[1-3]。2006 年美国加州大学圣巴巴拉分校通过使用激

收稿日期: 2016-12-29; **收到修改稿日期:** 2017-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(11304099)、广东省自然科学基金(s2013040015639)

作者简介: 胡永禄(1990—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体发光二极管方面的研究。E-mail: 493362139@qq.com

导师简介: 李 潮(1976—),男,博士,副教授,主要从事微纳光子学及非线性光学方面的研究。

E-mail: lichao@scut.edu.cn(通信联系人)

光剥离技术去掉蓝宝石衬底后,在 GaN 层上使用反应离子蚀刻法和电子束刻蚀制备出第一个光子晶体辅助出光的 LED^[4];2009 年初,Philips Lumileds 的 Wierer 等^[5]宣布在 GaN 基 LED 上直接刻蚀出表面三角晶格结构,制造出当时光提取效率最高的光子晶体 LED,其光提取率高达 73%,最高亮度是一般 LED 的 2 倍。

借助表面光子晶体提高 LED 芯片的光提取效率,主要是应用了光子晶体周期栅格的衍射效应^[6-8],因此,当前研究和最多的是具有完美周期结构的表面光子晶体 LED。然而,如果在这些完美表面光子晶体中引入点缺陷,以形成表面光子晶体微腔,则由于表面微腔对光的强局域效应,很可能对 LED 的光提取效率和空间分布产生较为显著的影响。实际上,利用微腔结构改善光辐射特性已在其他光学领域获得证实。例如,南京大学的王牧研究组^[9-10]以及意大利的 Ballarini 等^[11-12]最近报道了利用法布里-珀罗(F-P)腔谐振模与激子跃迁的耦合效应,显著地改善了有机发光材料的光辐射特性。此外,虽然 Francardi 等^[13]在 LED 有源层引入光子晶体 L3 微腔,有效地提高了 LED 自发辐射效率,但目前对表面光子晶体微腔 LED 研究甚少。本文将在此基础上,进一步研究光子晶体表面微腔结构对 LED 光提取效率和出射光空间分布的影响。

2 表面光子晶体微腔 LED 的工作原理与结构设计

LED 的光提取效率不高主要是由于半导体材料和周围介质的高折射率差引起的,而光子晶体作为一种具有光子禁带、光子局域、光栅衍射等特性的人工电磁材料则能很好地解决上述 LED 光提取效率不高的问题。通过选择合适的光子晶体参数(周期、占空比、厚度等),将光子带隙中心波长设置在发射光的波长,由于光子带隙的作用,从有源区发射出的光在水平方向上不能传播,而在垂直方向上光子晶体不能限制光的传播,从而提高了 LED 光的垂直提取率。同时,表面光子晶体结构也是一种光栅结构,将光栅的周期设置成与光波长相当^[14],当传导光和光栅结构发生作用时,光波矢平面内的分量会受到调制,从而使传导光落在出射光锥内,被耦合为出射光,如图 1 所示。如果进一步在光子晶体中引入微腔结构,则带隙中将出现很高的态密度,与微腔谐振频率相吻合的光子会被局域在狭小的微腔空间内,并使自发辐射的能量大部分耦合入缺陷模中,而光子禁带内其他模式则被抑制。因此,微腔结构能使 LED 有源层发出的光高效地向外辐射。另外,若在表面光子晶体中引入多个微腔,由于多个谐振腔出射光之间的相干耦合作用,则可能产生束流准直效应^[15-17],从而在提高光提取效率的同时,出射光的空间指向性也将获得改善。

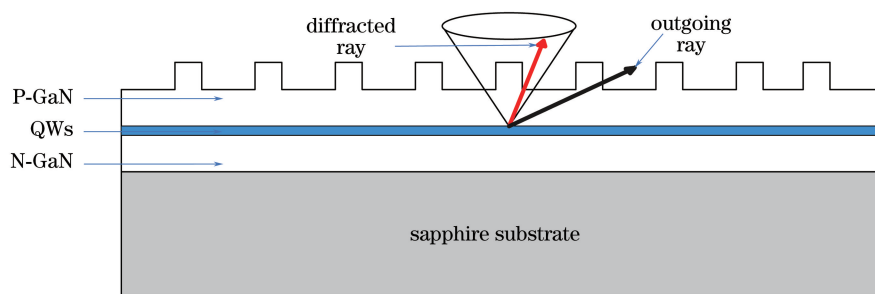


图 1 表面光子晶体 LED 光栅衍射效应图

Fig. 1 Grating diffraction effect of surface PC LED

为研究光子晶体表面微腔结构对 LED 光提取效率和空间分布的影响,主要运用三维(3D)时域有限差分法(FDTD)进行仿真实验研究。为不失一般性,采用如图 2 所示的 LED 结构^[18],包括蓝宝石衬底、N 型半导体材料 GaN、多量子阱有源层(QWs)、P 型半导体材料 GaN、在 P-GaN 上刻蚀空气孔的光子晶体层、P-GaN 上的 p 电极及 N-GaN 上的 n 电极等。图 2(a)为 LED 仿真结构截面图,图 2(b)为 LED 仿真结构立体图。

为了简化模型以便于仿真计算,忽略了 P 型和 N 型两个金属电极,选取两块均匀的 GaN 介质平板作为 LED 的 P 型和 N 型半导体,在 P 型和 N 型 GaN 平板中间放一个点偶极子作为量子阱发光光源。由于是在相同的条件下,对普通平板 LED、完整光子晶体 LED 和表面微腔光子晶体 LED 等结构的光提取效率进行比较,因此用点偶极子仿真对真实效果的影响并不大^[19],但却可以极大地简化计算。在平板下面放一块均匀的蓝宝石介质材料作为衬底,光子晶体则是在上层 P 型 GaN 平板中引入有限深度的三角对称排列空气孔形成的,如图 3(a)所示,图 3(b)为表面完美光子晶体结构。

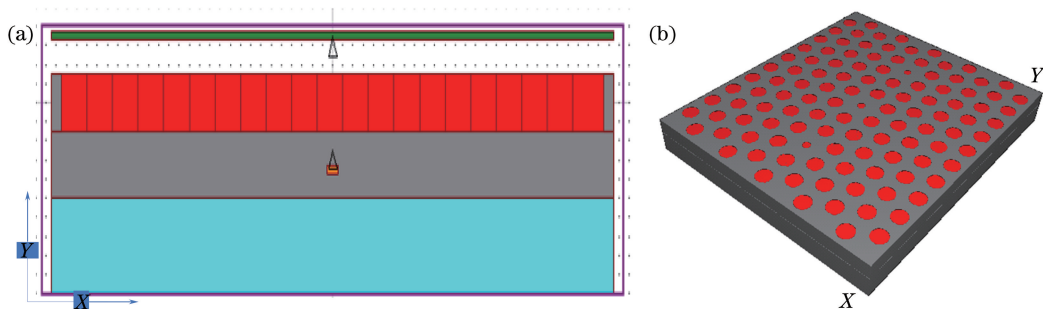


图 2 LED 仿真图。(a)截面图;(b)三维图

Fig. 2 LED simulation. (a) Cross section; (b) 3D diagram

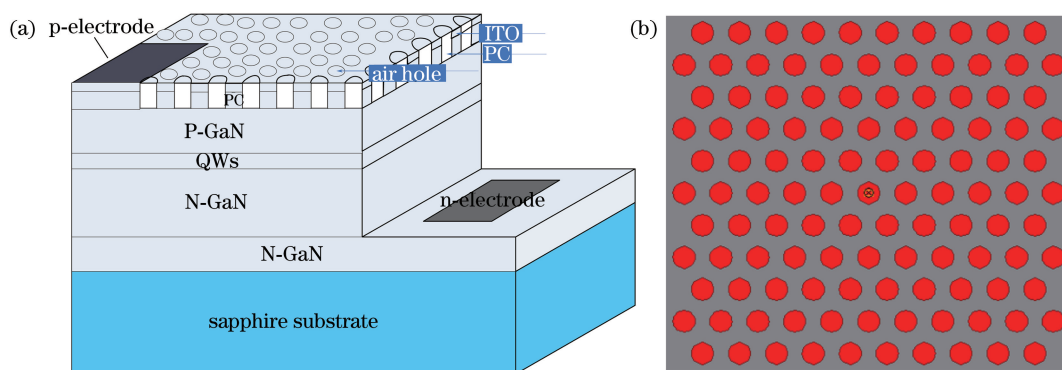


图 3 (a) LED 模型图;(b) LED 表面完美光子晶体结构图

Fig. 3 (a) Sketch of LED model; (b) structure of LED surface perfect PC

为了保证计算精度和数值模拟的稳定性,在 FDTD 的模拟中,选取的网格长度约为 $a/20$,其中 a 为光子晶体周期,GaN 折射率为 2.48,空气折射率为 1,仿真区边界设为完美匹配层以抑制仿真区边界光的全反射。一个高斯调制的点偶极子放在 P 型和 N 型 GaN 中间作为 LED 有源层,离光子晶体下表面 100 nm 处,振动方向平行于 X 轴。探测器离光子晶体上表面 200 nm,用以探测上表面出光功率 P ,如图 2(a)所示。若以普通平板 LED 的 $P_{\text{without_PC}}$ 为参照对象,则完整光子晶体 LED 和表面微腔光子晶体 LED 的光提取效率的提高率可分别定义为 $(P_{\text{PC}} - P_{\text{without_PC}})/P_{\text{without_PC}}$ 、 $(P_{\text{cavity}} - P_{\text{without_PC}})/P_{\text{without_PC}}$,其中 P_{PC} 和 P_{cavity} 分别为所测得的完整光子晶体 LED 和表面微腔光子晶体 LED 的出光功率。

对完整光子晶体 LED 优化后选取光子晶体周期 a 为 590 nm,空气孔半径 r 为 $0.3a$,光子晶体厚度为 300 nm。缩小中间空气孔半径(设为 r_0)后,光子晶体成为缺陷微腔,对 r_0 进行扫描优化,选取的扫描范围为 $0.1r \sim 0.8r$,间隔为 $0.1r$ 。根据图 2(b)的结构,光源放到微腔的正下方,用宽频谱的飞秒脉冲光源扫描微腔,探测器根据透射光的能量探测微腔的频谱。探测单个微腔时,能量峰值即为微腔中心频率,优化的标准为:扫描得到的频率曲线的中心频率峰值相对对比度最高,而且频率符合需求的值。通过扫描优化得到 $r_0 = 0.5r$,其谐振波长为 $\lambda_0 = 465 \text{ nm}$,故对应于此波长的 LED 光将具有很高的出射能量。

3 表面光子晶体微腔结构对 LED 出光特性的影响

对单个微腔优化后,本课题组对多微腔的不同分布结构进行光提取效率的分析对比,主要仿真对比了以下几种多微腔结构,如图 4 所示。

根据图 2 所示的结构,将光源设置为单一频率的连续高斯调制的点偶极子,波长为上面扫描得到的微腔谐振波长 465 nm,探测器探测透射光的归一化功率,设置探测时间为 $3000(a/c)$,其中 a 为晶格常数, c 为光在真空中的速度,足以等到探测值达到稳定。图 5(a)为探测器所测得的光提取效率时域演化曲线,其中蓝色曲线、红色曲线和绿色曲线分别对应于图 4(a)、(b)和(c)三种不同的结构。由图 5(a)可见,图 4(a)所示的 3 微腔结构的 LED 光提取效率最好,而 5 微腔和 9 微腔结构的光提取效率略有下降。这说明并非微腔越多

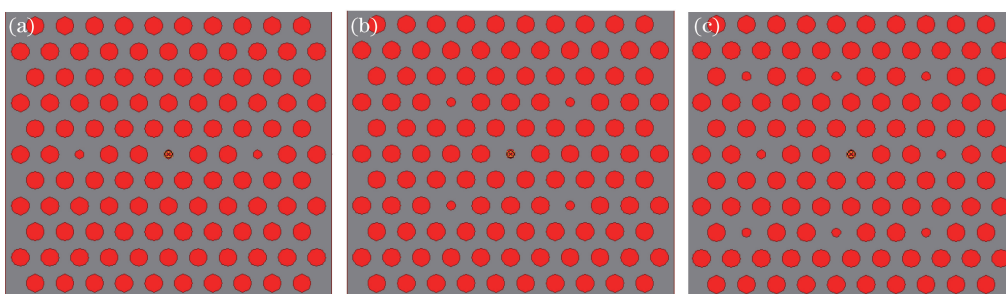


图 4 表面光子晶体微腔结构。(a) 3 个;(b) 5 个;(c) 9 个

Fig. 4 Structure of surface PC microcavity. (a) 3 microcavities; (b) 5 microcavities; (c) 9 microcavities

越好。造成这种结果的原因可能是,当微腔过多时,微腔与微腔间的相互作用会使得各个微腔的谐振模发生偏移,并降低其 Q 值,从而在一定程度上减弱了 LED 辐射模与表面光子晶体微腔间的耦合效应。因此,选取图 4(a)所示的 3 微腔结构做进一步的研究。以下所涉及到的表面微腔光子晶体均为图 4(a)对应的结构。

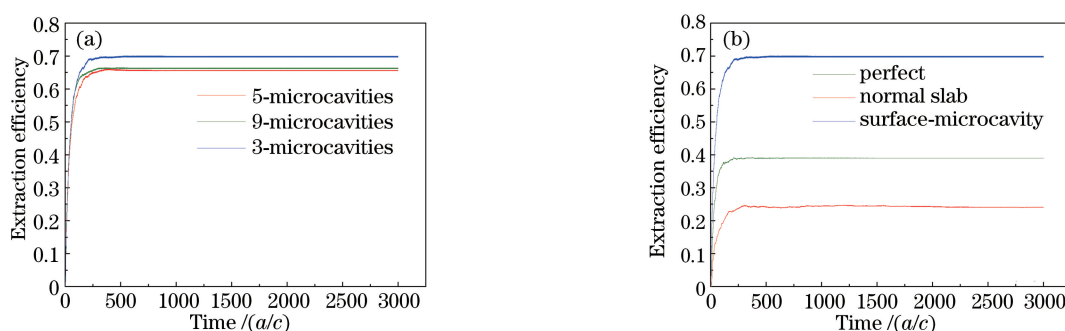


图 5 (a)不同多微腔光子晶体 LED 光提取效率对比图;

(b)表面微腔光子晶体 LED、完整光子晶体 LED、普通平板 LED 光提取效率对比图

Fig. 5 (a) Comparison of extraction efficiency for PC LED with different multi-microcavities;

(b) comparison of extraction efficiency among surface-microcavity PC LED, perfect PC LED and normal slab LED

选定了微腔结构后,分别仿真对比了普通平板 LED、完整光子晶体 LED 和表面微腔光子晶体 LED 三者光提取效率的关系,如图 5(b)所示,其中蓝色曲线对应表面微腔光子晶体 LED,绿色曲线对应完整光子晶体 LED,红色曲线对应普通平板 LED,三者的稳态光提取效率分别为 0.70、0.395 和 0.24。通过对比可以得出,表面微腔光子晶体 LED 的出光功率较普通平板 LED 提高了 1.89 倍,较完整光子晶体 LED 提高了 77.3%,效果非常显著。

此外,本课题组还对上述结构出射光能量的坡印亭矢量分布进行了分析,其结果如图 6 所示,矢量的长短仅表示同一图中各矢量间的相对大小,从而可以判断出不同结构 LED 出射光场的空间分布。其中,图 6 (a)是表面微腔光子晶体 LED 出射光场的坡印亭矢量分布图。作为对比,图 6(b)和(c)分别给出了完整光子晶体 LED 和普通平板 LED 出射光场的坡印亭矢量分布图。从图 6 可以看到,普通平板 LED 的远场能量分布很发散,完整光子晶体 LED 的能量分布稍有改善,但中间的能量值略低于两边,总体能量分布并不集中。而对于表面微腔光子晶体 LED,其表面光子晶体微腔结构的衍射效应和多微腔间相互干涉的束流效

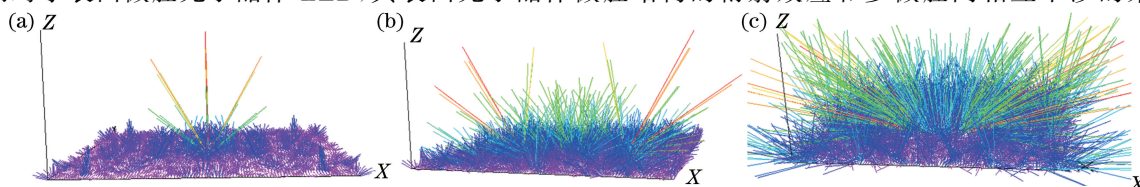


图 6 出射光场的坡印亭矢量。(a)表面微腔光子晶体 LED;(b)完整光子晶体 LED;(c)普通平板 LED

Fig. 6 Poynting vectors of the emergent light field. (a) Surface-microcavity PC LED;

(b) perfect PC LED; (c) normal slab LED

应,使出射光能量分布更为集中。图 7 进一步显示了表面微腔光子晶体 LED(红色实线)、完整光子晶体 LED(蓝色点虚线)、普通平板 LED(黑色虚线)的远场辐射强度随出射角度的分布,可以清楚地看到,出射光场能量主要集中在 $\pm 35^\circ$ 之间,而普通平板 LED 的出射光场能量则分布在 $\pm 75^\circ$ 范围内。由此可见表面微腔光子晶体对 LED 出射光具有较强的准直效应,不仅可以提高 LED 的光提取效率,而且对出射光的空间分布特性都有较大的改善。

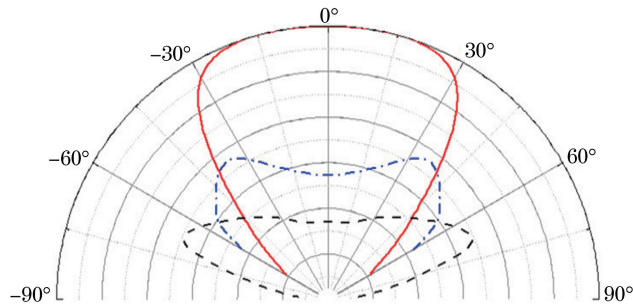


图 7 不同结构 LED 远场辐射强度随出射角度变化图

Fig. 7 Far-field radiation intensity for LED with different structures changes with emergent angles

4 结 论

从仿真实验上验证了光子晶体的禁带效应和光栅衍射效应可以显著提高 LED 的出光效率,并进一步提出在 LED 的表面光子晶体中引入多个谐振微腔,利用多个谐振腔出射光之间的相干耦合作用产生束流准直效应,从而在提高光提取效率的同时,使出射光的空间指向性也得到改善。通过对表面光子晶体 LED 结构的优化设计,使得表面微腔光子晶体 LED 的光提取效率较完整光子晶体 LED 提高了 77.3%,较普通平板 LED 提高了 1.8 倍以上。同时,微腔光子晶体 LED 相对普通 LED 和完整光子晶体 LED 具有更加明显的远场能量汇聚效应,让出射光具有更好的空间指向性。这些特性使得表面微腔光子晶体 LED 具有潜在而广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Shileds P A, Liu C, Nasir M, *et al.* Enhanced light extraction in nitride light-emitting diodes by epitaxially grown photonic-crystal nanopillar arrays[J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(12): 123120.
- [2] 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]. Appl Phys Lett, 2010, 96(25): 251103.
- [3] Cho C Y, Kang S E, Kim K S, *et al.* Enhanced light extraction in light-emitting diodes with photonic crystal structure selectively grown on p-GaN[J]. Appl Phys Lett, 2010, 96(18): 181110.
- [4] Lin C H, Lai C F, Ko T S, *et al.* Enhancement of InGaN-GaN indium-tin-oxide flip-chip light-emitting diodes with TiO₂-SiO₂ multilayer stack omnidirectional reflector[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(19): 2050-2052.
- [5] Wierer J J, David A, Megens M M. III-nitride photonic-crystal light-emitting diodes with high extraction efficiency[J]. Nature Photon, 2009, 3(3): 163-169.
- [6] Xu Zhenfeng, Su Ping, Cao Liangcai, *et al.* Design of a high extraction efficiency light-emitting diode with two crossed grating structures[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 715-717.
许振丰, 苏萍, 曹良才, 等. 具有双光栅结构的高提取效率发光二极管的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 715-717.
- [7] Chen Jian, Li Xiaoli, Li Haihua, *et al.* Research of LED light extraction efficiency of photonic crystal with square and hexagonal lattice[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6216-6221.
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): 6216-6221.
- [8] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, *et al.* High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals[J]. Phys Rev Lett, 1997, 78(17): 3294-3297.

- [9] Zhang K, Shi W B, Wang D, *et al.* Couple molecular excitons to surface plasmon polaritons in an organic-dye-doped nanostructured cavity[J]. Appl Phys Lett, 2016, 108(19): 193111.
- [10] Zhang K, Xu Y, Chen T Y, *et al.* Multimode photon-exciton coupling in an organic-dye-attached photonic quasicrystal [J]. Opt Lett, 2016, 41(24): 5740-5743.
- [11] Ballarini D, Giorgi M, Gambino S, *et al.* Polariton-induced enhanced emission from an organic dye under the strong coupling regime[J]. Adv Optical Mater, 2014, 2(11): 1076-1081.
- [12] Zhang Ying, Chen Meixiong, Li Yingying, *et al.* Application and development prospects of optical micro-resonators [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 040002.
张莹, 陈梅雄, 李莹颖, 等. 光学微腔的应用和发展前景[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040002.
- [13] Francardi M, Balet L, Gerardino A, *et al.* Enhanced spontaneous emission in a photonic-crystal light-emitting diode [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(14): 143102.
- [14] Kim J Y, Kwon M K, Lee K S, *et al.* Enhanced light extraction from GaN-based green light-emitting diode with photonic crystal[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(18): 181109.
- [15] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, *et al.* Beaming light from a subwavelength aperture[J]. Science, 2002, 297(5582): 820-822.
- [16] Gan D, Qi Y, Yang X, *et al.* Improved directional emission by resonant defect cavity modes in photonic crystal waveguide with corrugated surface[J]. Applied Physics B, 2008, 93(4): 849-852.
- [17] Moreno E, Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L. Enhanced transmission and beaming of light via photonic crystal surface modes[J]. Physical Review B, 2004, 69(12): 121402.
- [18] Park J, Oh J K, Kwon K W, *et al.* Improved light output of photonic crystal light-emitting diode fabricated by anodized aluminum oxide nano-patterns[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(4): 321-323.
- [19] Buss I J, Cryan M J, Nash G R, *et al.* Three-dimensional parallel FDTD simulation of light-emitting diodes[C]. IET 7th International Conference on Computation in Electromagnetics, 2008: 100-101.