

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0409

顶端 ZnO 纳米结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响

李伟, 岳庆炆, 孔繁敏, 李康

(山东大学 信息科学与工程学院, 济南 250100)

摘要: 为了提高 GaN 基蓝光 LED 的光提取效率, 本文建立了 LED 顶面分别铺设 ZnO 纳米柱和纳米锥结构的两种模型, 利用时域有限差分法对两种模型进行仿真并对结果进行了比较. 仿真结果表明, ZnO 纳米结构的各项几何结构参量(包括排列周期 P 、高度 L 、宽度 W 以及斜率 k 等), 对 LED 顶端光提取效率影响显著. 仿真分别得到了两种结构的最佳模型, 通过比较, LED 顶面纳米柱和纳米锥结构对光提取效率的提高效果相近, 其最佳提取效率分别增强至无任何结构时的 2.5 倍和 2.3 倍. 同时, 通过对各项参量扫描获得的对光提取效率的变化曲线进行了分析, 并给出了相应相应的理论解释. 这些模型优化和理论分析对实际的高性能 GaN 基 LED 的设计制造有着指导意义.

关键词: 发光二极管; ZnO 纳米结构; 光提取效率; 时域有限差分

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0409-8

Influence of Surface ZnO Nano-structures on the Light Emitting Efficiency of GaN-based LED

LI Wei, YUE Qing-yang, KONG Fan-min, LI Kang

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

Abstract: In order to improve the light emitting efficiency(LEE) of GaN-based blue LED, two LED models covered by ZnO nano-structures, including nano-rod and nano-cone structures, are simulated in the method of FDTD. The results of these simulations show that the light emitting efficiency of LED is varying regularly with the different nanostructures' geometric parameters (such as the period; P , the wide of bottom; W , and the length; L). The optimized model structure is obtained, and it is found that both ZnO nano-rod and nano-cone can bring obviously incensement (250% and 230%) on LEE. Besides, with the analysis on the variation curve, the influence of ZnO nano-structure and the reason of the optimization results are theoretically explained. These results provide a theoretical reference on the practical design and optimization of highly efficient GaN-based LED.

Key words: Light emitting diodes; ZnO nanorod structure; Light emitting efficiency; Finite-difference time-domain

0 引言

近几年来, GaN 基发光二极管(Light Emitting Diode, LED)以其寿命长、可靠性高、体积小、功耗低、响应速度快等优点, 已经在显示、信号指示和白

光照明等领域发挥了十分重要的作用, 但其依然很低的外量子效率却成为 LED 进一步发展的瓶颈. LED 外量子效率主要受两个因素影响, 内量子效率和提取效率. 其中内量子效率已经达到 80% 以上^[1], 但提取效率依然较低, 于是, 如何提高 LED 提

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(Nos. 2009CB930503, 2009CB930501)和国家自然科学基金(No. 61077043)资助

第一作者: 李伟(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高亮度 GaN 基 LED 相关技术研究. Email: ican650@163.com

导师: 李康(1962-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为光通信器件与系统的计算机仿真与设计. Email: kangli@sdu.edu.cn

收稿日期: 2012-08-30; 录用日期: 2012-12-10

取效率成为当今迫在眉睫的问题。

影响 LED 光提取效率的主要因素包括两方面,首先是由于光在半导体与空气界面处的菲涅尔反射引起的光子损耗,其次是半导体材料和 LED 电极对光的吸收。由于半导体材料与空气间的折射率相差很大,这就导致有源层发出的光从半导体内部射到空气的临界角很小(约为 23.6°),大部分的光经过全反射后回到介质内部被发光层或电极吸收,只有小部分的光能够辐射到自由空间中,这就导致了 LED 的光提取效率很低。目前,已经出现通过表面粗化^[2]、芯片倒装^[3]、图形衬底^[4]、嵌入纳米阵列^[5]、光子晶体^[6-8]、先进封装技术^[9]、纳米结构表面^[10]和双光栅结构^[11]等技术来增加 LED 的光提取效率。

ZnO 材料具有折射率接近 GaN、禁带宽度大、电子漂移饱和度高、介电常量小、透光率高的特性,这使得其纳米结构在提高 LED 提取效率方面表现出巨大潜力^[12]。由于纳米技术的进步,已经出现不少利用 LED 表面生长 ZnO 纳米结构的实验^[13-15],并且均可以使其光提取效率得到明显提高了。但是在各实验中对于表面 ZnO 纳米结构的各项参量,都仅仅简单设定,并没说明各自理由和参量的系统优化。这主要是相关的仿真工作并不充足,导致其最佳参量和具体的物理机制尚不明确,实验存在一定的盲目性。在 LED 结构设计^[3]、顶端光子晶体参量优化^[16]、双层光子晶体参量优化^[17]、表面纳米结构^[18]等方面,已有不少仿真工作得以进行,为实验中 LED 的合理制备带来了重大参考价值。本文中利用时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)对 GaN 基 LED 的表面 ZnO 纳米结构(柱、锥)的各个参量(排列周期 P 、宽度 W 、长度 L 、斜率 k)进行仿真优化,正是满足上述实验中对优化参量和物理原理的需求,以期能够对高性能 GaN 基 LED 的设计和制造带来一定的理论参考价值。

1 仿真方法与模型设计

本文利用二维 FDTD^[19]对具有 ZnO 纳米结构 GaN 基 LED 进行了仿真,采用尺寸大小为 $20\,000 \times 4\,600\text{ nm}^2$,网格为 5 nm 的 2 维垂直结构 LED 模型进行计算,如图 1 所示。文献^[20]已证明,GaN 基蓝光 LED 中量子阱的载流子复合发光过程可以点光源来等效。另外,由于 LED 光源的非相干性和 FDTD 算法自身的特性,本文选择了单个点偶极子源来模拟 LED 有源层进行仿真,这是因为在源区选择多个点偶极子源或者引入周期性边界条件都将不可避免地产生非物理特性的干涉模式,导致计算结果失真。本文中点源的位置在 ZnO 薄层下 400 nm

处。源下面依次为 2500 nm 厚的 n-GaN 层(折射率 $n=2.5$)和 500 nm 厚的蓝宝石衬底(折射率 $n=1.7$),源上方依次为 400 nm 厚的 p-GaN 层(折射率 $n=2.5$)以及 100 nm 厚的 ZnO 种子层(折射率 $n \approx 2.1$),然后在 ZnO 种子层上方生长 ZnO 纳米棒(或锥)。纳米柱(或锥)的长度设为 L ,底面宽度设为 W ,排列周期设为 P 。仿真区域($20\,000 \times 4\,600\text{ nm}^2$)内结构上方的其他空间用空气(折射率 $n=1$)来填充。而在仿真计算区域的边界,利用 PML(完全匹配层)进行吸收^[21],用来吸收外来波和避免非电磁反射,保证仿真结果的准确性。

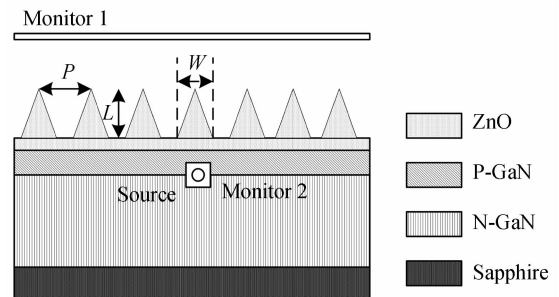


图 1 仿真结构模型

Fig. 1 The LED 2D schematic in the simulation

在实际生产中,蓝宝石衬底厚度约为数十微米,其作用主要为 GaN 外延层生长作为依托,同时由于其较低的折射率它也可看作为一层反射镜,使一部分向下传输的光能够产生反射从而改变传播方向。由于本文主要目的是探究如何提高光提取效率,而蓝宝石厚度对光提取效率并不起显著作用,并且过大的蓝宝石厚度会带来巨大的计算量,因此在各种仿真的相关文献中^[5-6,15,17-18],均将蓝宝石尺寸减小甚至不放置蓝宝石,从而减小计算量,提高仿真效率。

在 ZnO 纳米结构上方处设置与模型宽度相等(同为 $20\,000\text{ nm}$)的功率检测面 1,用来测得从 LED 模型中辐射出来的光功率,在点源周围包裹功率检测面 2,用来测得点源发出光各个方向的总功率。定义光提取效率(Light Extraction Efficiency, LEE)为 LED 模型的顶面出光功率 P_{out} 与源辐射总功率 P_{all} 的比值,即 $LEE = P_{\text{out}}/P_{\text{all}}$ 。下一节的各个数据曲线中 contrast 线为模型中不加任何 ZnO 结构时的光提取效率,作为对比。另外,考虑到 GaN 介质和 ZnO 介质的折射率虚部在蓝光频率段近似为零,所以忽略两种介质引起的功率损耗。

2 仿真数据与分析

2.1 ZnO 纳米柱结构对 LED 提取效率的影响

对于顶部生长的 ZnO 纳米柱结构,涉及到的参量包括柱的排列周期 P 、宽度 W 和长度 L 。为探讨 LEE 与各参量的关系,我们首先选择周期 $P =$

500 nm,750 nm,1 000 nm,1 500 nm 四个周期,分别对其改变 W 和 L ,其中 W 取值为 50 nm 到 $(P-50)$ nm(这里注意到 $W>P$ 是无意义的,而对于本文中二维仿真模型, $W=P$ 相当于顶部铺满 ZnO 层,

也无研究价值),间隔为 50 nm; L 取值 100 nm 到 700 nm,间隔为 100 nm. 具体仿真结果如图 2 所示.

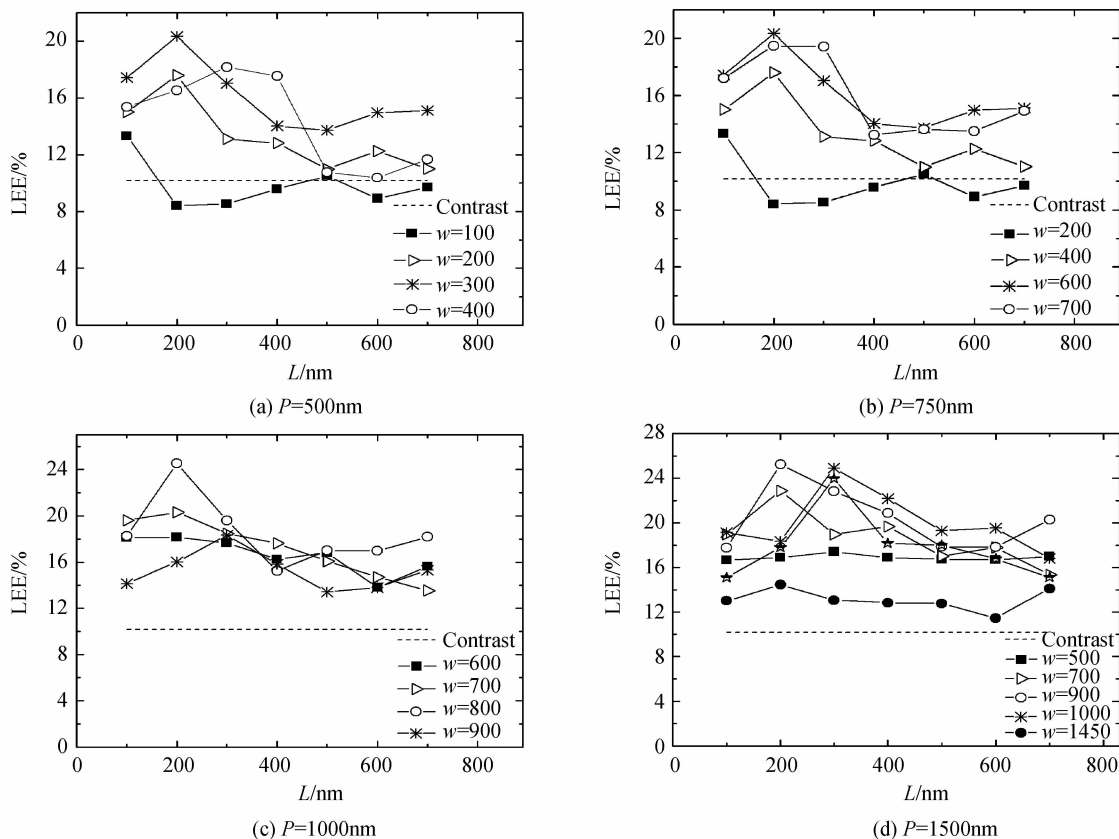


图 2 当 P 和 W 一定时,光提取效率随 L 改变的变化情况
Fig. 2 When P and W is constant, LEE versus different L

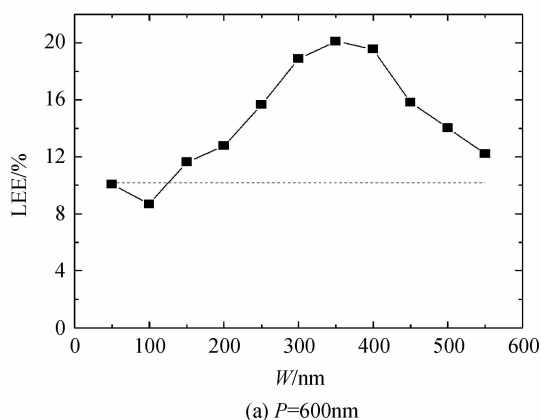
对仿真结果进行分析,可以得到如下的规律:

1)若 P 保持定值,当 W 取值过小(如 50 nm, 100 nm)时,光提取效率很低,甚至比用于对比的未加任何结构的 LED(图中 contrast 线)提取效率更低;随着 W 取值的增大,光提取效率的平均值也随之增大,但是这个增长趋势并不是随 W 增大而一直保持的,可以看到,对于不同周期 P ,存在一个不同的 W 的极值点 W_0 ,当超过该极值点时,顶端光提取效率开始下降;

2)在周期 P 保持不变时,不论 W 取值如何,光提取效率的最大值,均出现在 L 取 200 nm 或 300 nm 的时候,即 $L \approx \lambda/n_{zno}$ (本文中使用的波长为 475 nm 的光源),这与文献[22]中相一致,而随着 L 的缩小或增大,提取效率都会变小.

由上面的分析可知,不论周期 P 取何值,当 L 在 200~300 nm 之间时,光提取效率存在最大值.并且存在一个与 P 相关的 W 的最优值 W_0 ,同时可以确定该最优值 W_0 .既不可能取值过小也不能取值太接近于 P .为了得到更为确切详细的 P 与 W 关

系,本文定 L 为 200 nm,对于 P 取 200 到 2 100 nm,间隔为 100 nm, W 取 50 到 $(P-100)$ nm,间隔为 50 nm,进行仿真,由于曲线过多,而且优化的目标是取得最大提取效率相对应的 P 与 W ,所以这里仅仅列出 $P=600, P=1 000, P=1 800$ nm 三个曲线作为例图(见图 3),而将各个 P 值在 $L=200$ nm 时各个 W 所能得到的全部的提取效率中最大值及其相对应的 W 值整理如表 1.



(a) $P=600$ nm

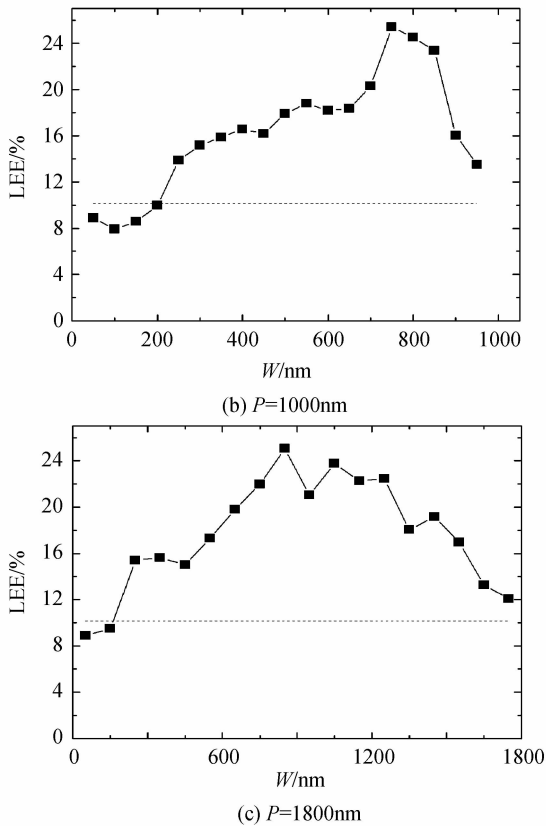


图3 $L=200\text{ nm}$ 时,提取效率随 W 改变的变化情况
Fig. 3 When $L=200\text{ nm}$, LEE versus different W

表1 P 为 200~2100 nm 的各模型的最高提取效率及所对应的 W 取值

Table 1 The optimal LEE and W versus P (200~2100 nm)

No.	P/nm	The optimal W/nm	The optimal LEE
1	200	100	16.19%
2	300	250	17.54%
3	400	350	18.88%
4	500	350	19.48%
5	600	350	20.10%
6	700	500	19.55%
7	800	600	22.26%
8	900	650	22.65%
9	1000	750	25.41%
10	1100	900	25.82%
11	1200	850	25.20%
12	1300	850	23.55%
13	1600	850	24.77%
14	2000	850	23.84%

通过图3及表1可以发现:

1) 当 $P \leq 500\text{ nm}$ 时,顶端光提取效率随着 W 的增大而增大,并且随着 P 的变大(从 200 nm 到 500 nm),其能够得到的最大光提取效率也在逐渐增大(从 16.19% 增长到 19.48%);

2) 当 $500 < P \leq 1100\text{ nm}$ 时,当 W 与 P 的比值取值集中在 0.7~0.82 之间时,光提取效率可以达

到最高,而且,当 P 不断变大(从 600 nm 到 1100 nm),其对应的最高提取效率值也随之增大(从 20.10% 增长到 25.82%);

3) 当 $P > 1100\text{ nm}$ 时,最佳的 W 取值基本保持在 850~900 nm 左右,且最大提取效率比 P 为 1100 nm 时稍有下降.

上述规律原因可以用下面图4(a)说明,由于顶端 ZnO 纳米柱结构可看做是一个个波导柱,所以在当 P 和 W 从小变大的过程中,从半导体耦合进入 ZnO 纳米柱的光也在逐渐增多,从而导致最终出光也变多,从 P 为 200 nm 时的最高提取效率为 16.19% 增长到 P 为 1100 nm 时的最高提取效率为 25.82%. 同时,由于纳米柱结构成周期性排列,类似于光子晶体结构,所以纳米柱结构的占空比也对光提取效率产生至关重要的影响,占空比 f 可通过式(1)求得.

$$f = \frac{\pi W^2}{4P^2} \quad (1)$$

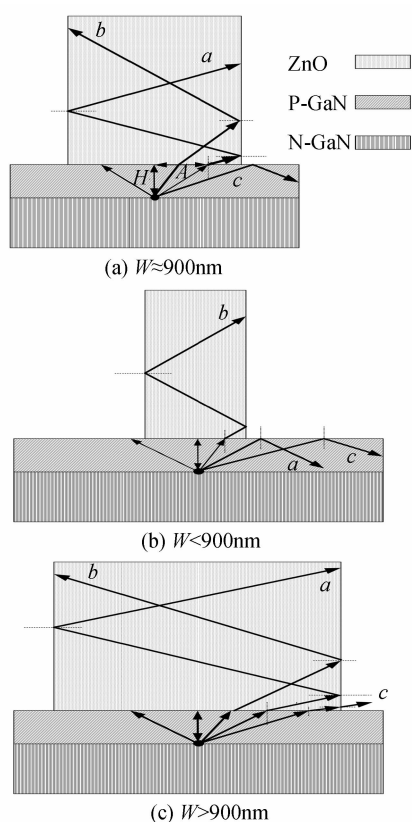
通过计算可发现,当 P 在 500~1000 nm 间,占空比 f 取值 0.38~0.53,这与相关文献[14-15]中保持一致.另外,关于 $W=850\text{ nm}$ 的最优结构,下面利用几何光学的知识进行进一步解释.通过式(2)

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{zno}}}\right) \quad (2)$$

可以求得从 ZnO 纳米柱到空气的全反 $\theta_1 = 28.44^\circ$,如图中光线 a ,它在波导柱中恰好发生全发射,最终沿波导传输至顶端.同时,我们注意到,图中光线 b ,即光从 GaN 向 ZnO 入射角度小于光线 a 相对应的 θ_2 时,光总是可以在波导中发生全反射,同样传输至 LED 顶端.而对于光线 c ,即光从 GaN 向 ZnO 入射角度大于光线 a 相对应的 θ_2 时,光则不会类似于 a 或 b 那样以全反射的形式传输,其中有一部分在波导侧壁射出,有一部分在 GaN 与 ZnO 界面就已经被发射回去,这部分光不必详细讨论.当然本文希望进入 ZnO 波导柱的光能全部被传导出,也就是希望所有的光传输时与侧壁的入射角大于 θ_1 ,相应的 $\alpha = 61.56^\circ$,根据式(3)

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \alpha} = \frac{n_{\text{zno}}}{n_{\text{gan}}} \quad (3)$$

可求得光从 GaN 向 ZnO 的入射角 $\theta_2 = 47.61^\circ$,由于源的深度 H 为 400 nm,所以可求得 $A = 438\text{ nm}$,即对应的 $W = 2A = 876\text{ nm}$,同本文仿真中的数据相当.同时,这也能对上述其它规律进行解释,所以当 $W < 876\text{ nm}$ 时,如图4(b)所示,进入纳米波导柱的光较少,所以随着 W 的增大,光提取效率也随之增加.而当 $W > 876\text{ nm}$ 时,如图4(c)所示,光耦合

图 4 W 不同时分别对应的光路图Fig. 4 The different light trace in the nanorod with different W

进波导柱后,会出现有部分光从波导柱侧边散出,如光线 c ,从而导致顶面的光提取效率有所降低,故我们取仿真中的 850~900 nm 为最佳值。

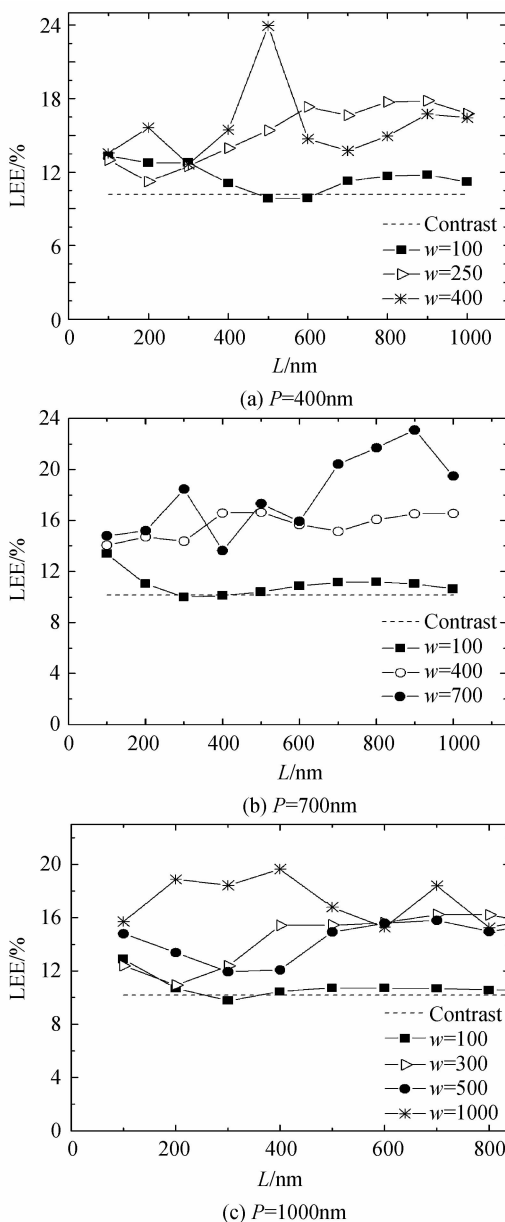
通过对 ZnO 纳米柱结构的排列周期 P 、宽度 W 、高度 L 各项参量进行优化,首先确定出优化高度 L 等于 200~300 nm,在此基础上对 W 和 P 的关系进行大量仿真,得到对于 P 值的不同范围时的最优 W 的取值情况,同时确定出对 LED 光提取效率的纳米柱结构的最优模型为 $P = 1\ 100$ nm, $W = 850 \sim 900$ nm, $L = 200$ nm,此时能够得到的最大提取效率为普通 LED 的 2.5 倍。

2.2 ZnO 纳米锥结构对 LED 提取效率的影响

同纳米柱结构相同,需要优化的参量共有三个,即锥的排列周期 P 、底面宽度 W 和长度 L ,所以同 3.1 中对柱的仿真思路相同,所以首先对 P 为 400 nm, 700 nm, 1 000 nm 的纳米结构的各项参量进行模拟,希望得到一定规律.其参量的仿真范围及间隔分别为: W 取 50 到 P ,间隔为 100 nm(这里注意到 $W > P$ 是无意义的); L 取 100 nm 到 1 000 nm,间隔为 100 nm.由于曲线过多,仅仅抽取其中几条画出来,仿真结果图 5。

从仿真结果可以看出,当 P 一定时,光提取效率会随着 W 和 L 变化,当 W 等于或接近于 P 时,

即当纳米锥紧密排列时,光提取效率达到最大值.接下来,设定 $W = P$,仅仅改变 P 和 L 的取值,进行进一步优化。

图 5 当 P 和 W 一定时,光提取效率随 L 改变的变化情况
Fig. 5 When P and W is constant, LEE versus different L

为了得到更为确切详细的 P 与 L 的关系,对于 P 取 200 到 1 000 nm,间隔为 100 nm, L 取 100 到 2 000 nm,间隔为 100 nm,进行仿真,所得曲线图部分列举出如图 6。

从图 6 可以看出,当 P 分别为 400、600 和 800 nm 时,各个周期对应的可得到最高提取效率的 L 并不一致,但是我们发现提取效率与锥形的斜率有一定关系.接下来利用几何光学的知识对其进行了分析,如图 7(a),当 ZnO 纳米锥斜过小时,光从 GaN 入射进 ZnO 后,很多又被反射回半导体内部或者从侧面射出,随着斜率的增大,如图 7(b),从顶端能出射的

光也越来越多,从而导致顶端出光效率变大.但是,随着斜率的增大,一方面实际加工过程中圆锥不可能无限得到增长,另一方面,也可以设想斜率无限增大,则圆锥将变成类似于圆柱的结构,而此时由于 $W=P$,无光子晶体结构,所以最终的提取效率又会降低,所以推测应该会有一个最优的斜率值.

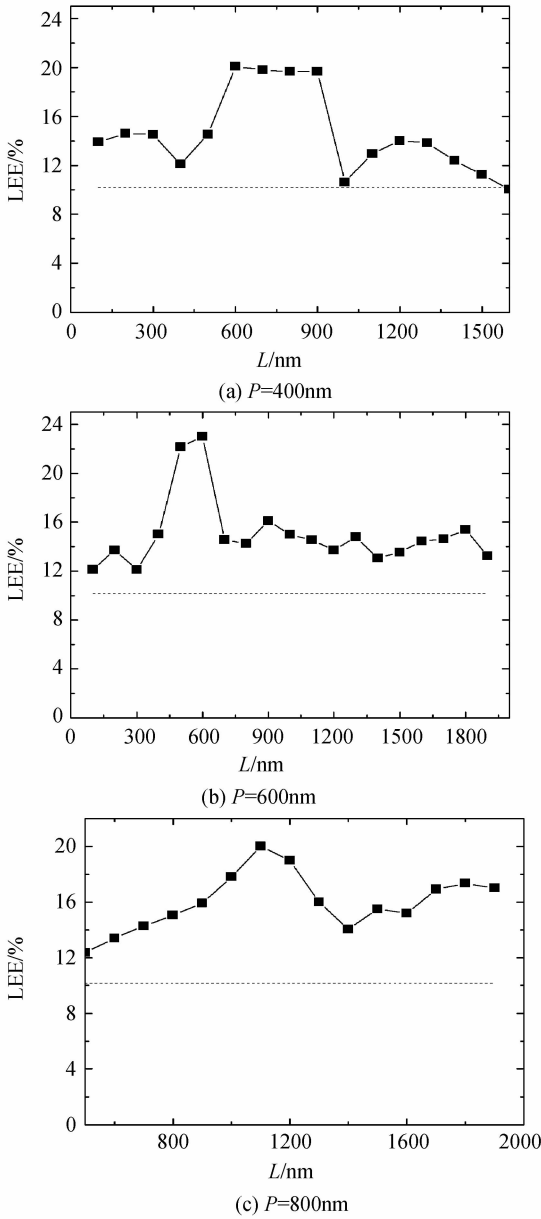


图6 当 $W=P$ 时,光提取效率随 L 变化情况
Fig. 6 When $W=P$, LEE versus different L

对于图6中所对应的 $P=400, 600, 800\text{ nm}$ 三个周期进行观察,发现达到最高提取效率的 L 分别为 $500\sim 600\text{ nm}, 600\sim 900\text{ nm}, 1\ 000\sim 1\ 200\text{ nm}$,其对应的斜率($k=2L/P$)分别为 $2.5\sim 3, 2\sim 3, 2.5\sim 3$.于是本文针对斜率 k 与 P 的关系进行了进一步的探究.令 P 取 100 到 $1\ 000\text{ nm}$,间隔为 100 nm , k 取 0.4 至 4 ,间隔为 0.4 ,在此仅列出 $P=100, 400, 600, 900, 1\ 000\text{ nm}$ 的曲线图如图8.

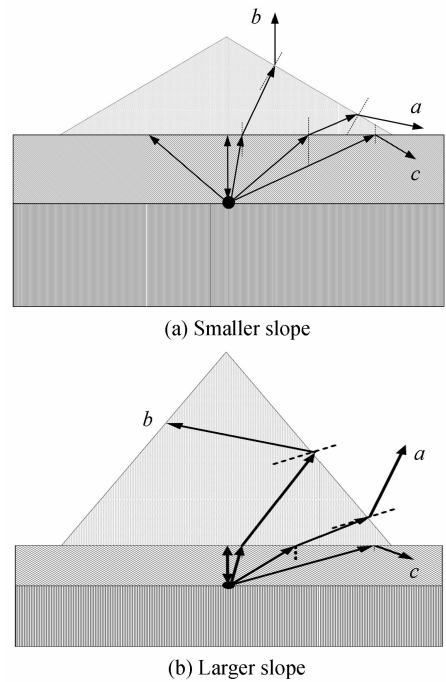


图7 不同斜率的纳米锥结构出光示意图
Fig. 7 The light trace in the nanocone with different slope

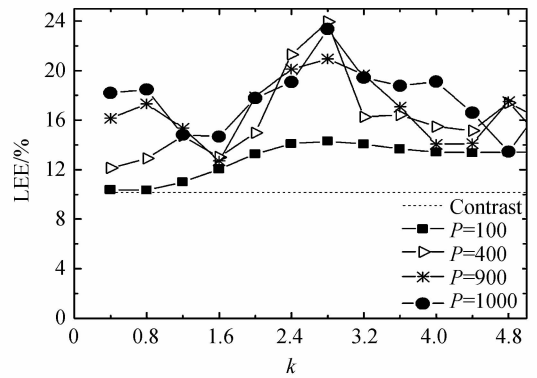


图8 光提取效率随 k 变化情况
Fig. 8 LEE versus different k

当 $k=2.8$ 时,各个周期结构的提取效率都很高,于是确定斜率 k 的最优值为 2.8 .最后,保持 $L=kP/2, k=2.8$,再对 P 进行优化,令 P 取 100 至 $1\ 700\text{ nm}$,间隔为 50 nm ,得到仿真结果如图9.

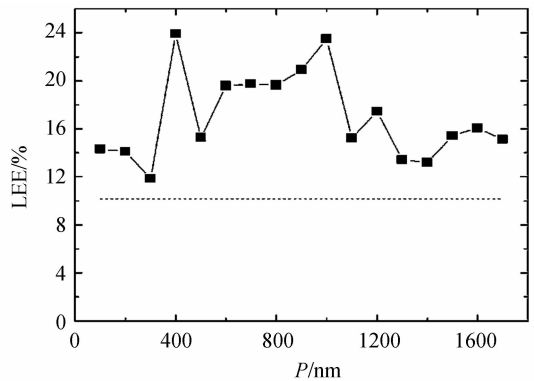


图9 光提取效率随 P 变化情况
Fig. 9 LEE versus different P

发现随着 P 的变化,所得到的提取效率变化较大,相对较好的两个周期取值为 $P=400$ nm 和 $P=1\ 000$ nm,提取效率可以分别达到 23.92% 和 23.48%。

以上通过对 ZnO 纳米锥结构的排列周期 P 、宽度 W 、斜率 k 各项参量进行优化,首先确定出当 W 接近或等于 P 时,光提取效率最大.在此基础上对锥的斜率进行大量仿真,最终得到锥的最佳斜率为 2.8.最后在上述条件下,对 P 进行仿真,最终确定出对 LED 光提取效率的纳米锥结构的最佳模型为 $P=400$ 和 $1\ 000$ nm, $W=P$, $k=2.8$,此时能够得到的最大提取效率增强到普通 LED 的 2.3 倍。

3 总结

本文设计了具有表面 ZnO 纳米结构的 GaN 基蓝光 LED,利用二维 FDTD 方法进行数值计算,分析了不同结构参量下 LED 光提取效率的变化,从而对各项结构参量进行优化.分别仿真了两种 ZnO 纳米结构——纳米柱和纳米锥,仿真结果显示对于 ZnO 柱结构,当 L 取 200 nm, W 取 850 nm 时,可得到相对比较高的提取效率,并且在 $P=1\ 500$ nm 时,能够得到最大提取效率,相对未加任何结构的 LED 模型增强了 150%;对于 ZnO 纳米锥结构,当 W 接近或等于 P ,锥体斜率 $k=2.8$ 时,能够得到比较高的提取效率,并且在 $P=400$ nm 和 $1\ 000$ nm 时,能够得到最大提取效率,相对于未加任何结构的 LED 模型增强了 130% 多.比较发现,最优结构下的 ZnO 纳米柱和纳米锥结构均可以对 LED 顶面光提取效率提高起到显著效果,并且达到的最佳提取效率相近。

参考文献

- [1] LIU Zhi-qiang, WANG Liang-chen. Analysis of light extraction efficiency for face-up and flip-chip GaN-based LED [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2007, **30**(3): 775-778.
刘志强,王良辰.正装、倒装结构 GaN 基 LED 提取效率分析[J].*电子器件*, 2007, **30**(3):775-778.
- [2] CHEN Yi-xin, SHEN Guang-di, MENG Li-li, et al. Improved extraction efficiency of AlGaInP light emitting diodes by nano-scale surface roughness [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(10): 1451-1454.
陈依新,沈光地,孟丽丽,等. AlGaInP 系 LED 的表面纳米级粗化以及光提取效率提高[J].*光电子·激光*, 2011, **22**(10): 1451-1454.
- [3] XIONG Wei-ping, FAN Guang-han, LI Qi. Improvement for the light extraction efficiency of light-emitting diodes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 1956-1960.
熊伟平,范广涵,李琦.提高 LED 光提取效率的研究[J].*光子学报*, 2010, **39**(11): 1956-1960.
- [4] HSIAO S K, CHANG E Y, HSIAO Y L, et al. 460-nm InGaIn-Based LEDs Grown on fully inclined hemisphere-shape-patterned sapphire substrate with submicrometer spacing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(19): 1366-1368.
- [5] ZHANG Zhen-ming, LI Kang, KONG Fan-min, et al. Study on improving light emitting efficiency of led by using silver nanodisk array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0423001-0423004.
张振明,李康,孔凡敏,等.采用银纳米圆盘阵列提高 LED 发光特性的研究[J].*光学学报*, 2012, **32**(4): 0423001-023004.
- [6] 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): 127807-127815.
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):127807-127815.
- [7] YUE Qing-yang, KONG Fan-min, LI Kang, et al. Study on the light extraction efficiency of GaN-based light emitting diode by using the defects of the photonic crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(20): 208502-208511.
岳庆阳,孔凡敏,李康,等.基于缺陷光子晶体结构的 GaN 基发光二极管光提取效率的有关研究[J].*物理学报*, 2012, **61**(20):208502-208511.
- [8] WANG Jing, WU Li-jun. A numerical study of influence of photonic crystals on the light extraction efficiency and far field radiation characteristics of light-emitting diode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1500-1508.
王靖,吴立军.光子晶体发光二极管光抽取效率及远场辐射特性的数值研究[J].*光子学报*, 2010, **39**(8):1500-1508.
- [9] YU Ren-yong, JIN Shang-zhong, LIANG Pei, et al. Monte Carlo simulation on leds graded-refractive-index-encapsulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2200-2203.
余仁勇,金尚忠,梁培,等.LED 梯度折射率封装结构的蒙特卡罗模拟[J].*光子学报*, 2010, **39**(12): 2200-2203.
- [10] LIN C L, CHEN P H, CHAN C H, et al. Light enhancement by the formation of an Al oxide honeycomb nanostructure on the n-GaN surface of thin-GaN light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(24): 242106-242108.
- [11] WANG Ya-wei, LIU Ren-jie, JIN Ji, et al. Dynamic relations between light extraction efficiency and characteristic parameters of gan-based led with double-grating structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1208-1212.
王亚伟,刘仁杰,金骥,等.基于双光栅结构下特征参量与 GaN 基 LED 光提取效率的动态关系[J].*光子学报*, 2010, **39**(7):1208-1212.
- [12] OZGUR, HOFSTETTER U, MORKOC H. ZnO devices and applications: a review of current status and future prospects[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, **98**(7): 1255-1268.
- [13] ZHONG J, CHEN H, SARAF G, et al. Integrated ZnO nanotips on GaN light emitting diodes for enhanced emission efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(20): 203515-203517.
- [14] CHEN Chih-han, CHANG Shou-jinn, CHANG Sheng-po, et al. Fabrication of a white-light-emitting diode by doping gallium into zno nanowire on a p-gan substrate [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, **114**(29): 12422-12426.
- [15] DAI K, SOH C B, CHUA S J, et al. Influence of the alignment of ZnO nanorod arrays on light extraction enhancement of GaN-based light-emitting diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **109**(8): 083110-083114.
- [16] LIU Wen-de, GAN Zi-zhao. Analysis of the light extraction

- efficiency of light-emitting diodes with photonic crystals combined with the generalized Rouard method[J]. *Journal of Optical Society of America A*, 2009, **26**(2): 289-296.
- [17] GAO Hui, KONG Fan-min, LI Kang, *et al.* 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 Journal of Selected Topics in Quantum Electronic*, 2011, **99**(1): 1-11.
- [18] ZHAO Jia, LI Kang, KONG Fan-min, *et al.* Enhancement of blue light emission using surface plasmons coupling with quantum wells[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2010, **108**(17): 293-306.
- [19] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [20] WIESMANN C. Nano-structured LEDs-light extraction mechanisms and applications[C]. University Regensburg, 2009, 3: 1-105.
- [21] KONG Fan-min, LIU Xin, LI Kang, *et al.* Analysis of planar optical waveguide structures with the pml-fdtd method[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2003, **14**(4): 352-354.
孔凡敏, 刘新, 李康, 等. PML-FDTD 法在分析平面光波导结构中的应用[J]. 光电子激光, 2003, 14(4): 352-354.
- [22] MATIOLI E N, WEISBUCH C. Impact of photonic crystals on LED light extraction efficiency: approaches and limits to vertical structure designs[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2010, 43(5): 3540005.

• 下期预告 •

He-Ne 激光和增强 UV-B 辐射对小麦 TaRAN1 蛋白的影响

毛晓芳, 韩榕

(山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041004)

摘要: 采用 He-Ne 激光($5 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$)和增强 UV-B($10.08 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)辐照‘ML7113’小麦幼苗, 6 天后提取各处理组小麦幼苗的总蛋白和 TaRAN1 蛋白, 用 SDS-PAGE 对其进行初步检测及 Western Blot 对目的蛋白进行鉴定, 并采用考马斯亮蓝法测量不同处理组的 TaRAN1 蛋白的含量以做进一步的比较分析. 结果表明: 增强 UV-B 辐射使小麦 TaRAN1 蛋白电泳条带加宽颜色加深且含量显著增加; 单独 He-Ne 激光处理, 蛋白电泳条带较窄颜色较淡且所测的蛋白含量明显减少, 表现出了抑制作用; 经 He-Ne 激光辐照和 UV-B 辐射复合处理后, 蛋白的含量明显低于 B 组而与对照组相差不明显. 说明增强 UV-B 辐射后, 小麦 TaRAN1 蛋白可能参与了植物的抗逆境反应.

关键词: He-Ne 激光; UV-B 辐射; TaRAN1 蛋白; 免疫印迹