光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.003

# ZnO 微纳结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响研究

雒倩男[1,2]，胡芳仁[1,2]*，贾博仑[3]

（南京邮电大学 1. 电子与光学工程学院；2. 微电子学院；3. 通信与信息工程学院，南京 210023）

**摘　要：** 基于时域有限差分法(FDTD)在 GaN 基 LED 表面分别生长了 ZnO 柱状与锥状微纳结构，并利用 Rsoft 模拟仿真软件分析了两种结构的几何参量(排列周期 $p$、高度 $H$、底面直径 $D$ 等)对 GaN 基 LED 光提取效率的影响。结果表明两种结构均可提高器件的光提取效率，柱状结构在 $H=0.25\ \mu m$，$p=1.5\ \mu m$，$D=0.9\ \mu m$ 时表现最优，其光提取效率是未加任何结构平板 LED 的 5.6 倍；而锥状结构在 $H=0.6\ \mu m$，$p=1.4\ \mu m$，$D=1.4\ \mu m$ 时表现最优，其光提取效率是未加任何结构平板 LED 的 5.3 倍。研究结果对高性能 GaN 基 LED 的设计与制备具有一定指导意义。

**关键词：** ZnO 微纳结构；光提取效率；GaN 基 LED；时域有限差分

**中图分类号：** TN312.8　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0315－06

## Influence of ZnO Micro-nano Structure on the Light Extraction Efficiency of GaN-based LED

LUO Qiannan[1,2], HU Fangren[1,2], JIA Bolun[3]

(Nanjing University of Posts and Telecommunications: 1. College of Electronic and Optical Engineering; 2. College of Microelectronics; 3. College of Communication and Information Engineering, Nanjing 210023, CHN)

**Abstract:** ZnO columnar and cone-shaped micro-nano structures were grown on the surface of GaN-based LEDs by using the finite difference time domain method (FDTD). The Rsoft simulation software was used to analyze the influence of the geometric parameters of the two structures, such as the arrangement period $P$, height $H$, bottom diameter $D$, etc., on the light extraction efficiency of GaN-based LEDs. The results show that both structures can improve the light extraction efficiency of the device. The columnar structure performs the best when $H=0.25\ \mu m$, $P=1.5\ \mu m$ and $D=0.9\ \mu m$, and its light extraction efficiency is 5.6 times that of flat panel LEDs without any structure. The cone-shaped structure performs the best when $H=0.6\ \mu m$, $P=1.4\ \mu m$, and $D=1.4\ \mu m$, and its light extraction efficiency is 5.3 times that of flat panel LEDs without any structure.

**Key words:** ZnO micro-nano structure; light extraction efficiency; GaN-based LED; finite-difference time-domain

## 0　引言

发光二极管(Light-emitting Diode，LED)，是一种电致发光半导体器件。近些年来，氮化镓(GaN)基 LED 以其体积小、寿命长、功耗低、节能环保等优点而被广泛应用于光互连、可见光通信、液晶显示等领域[1]，但低发光效率却成为制约其发展的主要因素[2]。LED 的发光效率 $\eta_R$ 可由半导体材料的总有效发光效率即外量子效率 $\eta_{EQE}$ 与电压效率 $\eta_V$ 的乘积表示，而外量子效率又可由内量子效率 $\eta_{IQE}$ 与光提取效率 $\eta_{LEE}$ 的乘积表示，其中内量子效率已可达到较高的值，所以如何提高光提取效率进而提高 LED 的发光效率成为研究重点[3-4]。

全反射和菲涅尔反射是影响 LED 光提取效率的两个主要因素。由于 GaN 材料与空气的折射率

收稿日期：2021－02－08.

基金项目：国家自然科学基金项目(61574080).

* 通信作者：胡芳仁

相差大而发生的全反射，会形成光逃逸锥，只有落入光逃逸锥中的光才能从 LED 辐射到自由空间中，大部分都会被反射回介质内部；同时，光在不同折射率介质分界面的菲涅尔反射也会损失掉一部分能量，导致 LED 的光提取效率很低[5]。国内外学者为了解决上述问题提出了如表面粗化、图形衬底、芯片倒装、微纳结构等技术来提高 LED 光提取效率[6]。其中利用微纳结构技术增大光输出的临界角，从而破坏 LED 材料界面的全反射来提高 LED 光提取效率是一种常用的有效方法。在众多微纳结构技术中，生长周期性的纳米阵列由于具有独特的光学特性，且不会因为刻蚀工艺而影响器件的光学特性等优势引起了人们的研究兴趣。

氧化锌(ZnO)材料具有折射率接近 GaN(且小于 GaN)、电子漂移饱和度高、禁带宽度大等特性，使其微纳结构在提高 LED 光提取效率方面具有极大的发展前景[7]。已有实验证明在 GaN 基 LED 表面生长 ZnO 微纳结构可以有效提高光提取效率，Uthirakumar 等[8]通过湿法腐蚀方法在 GaN 基 LED 的表面制备了 ITO 颗粒，再通过旋转涂覆方法在 ITO 颗粒上制备了 ZnO 纳米颗粒，使得 LED 的光功率提高了 34%。Ye 等[9]通过在垂直结构 LED 芯片的 p-GaN 表面制备 ZnO 纳米棒阵列使光提取效率提高了 3 倍。但在以往实验中，对于 ZnO 微纳结构参量的选择以及各参量对于光提取效率的影响缺乏系统研究。因此本文基于时域有限差分法(FDTD)，利用 Rsoft 软件在 GaN 基 LED 上设计不同结构参数的 ZnO 微纳结构，以此增大 LED 结构的逃逸光锥，提高 LED 的光提取效率，为后续实验设计与制备 LED 提供参考。

## 1 仿真模型设计

在光线不充足的暗视觉条件下，人眼对 510 nm 的蓝绿光最敏感[10]，所以我们选择研究波长 510 nm 左右的 GaN 基蓝绿光 LED，其典型结构如图 1 所示，从下至上依次为衬底、n-GaN 层、多量子阱(MQW)、p-GaN 层、铟锡金属氧化物(Indium Tin Oxides，ITO)层以及 p/n 电极。MQW 发出的光透过 p-GaN 和 ITO 层发散出去[11]。在模拟仿真中不考虑 LED 的电流分布等特性，故忽略电极和 ITO 层，同时忽略衬底结构的影响，只针对 MQW，p-GaN 和 n-GaN 进行建模计算，简化后的结构如图 2 所示。

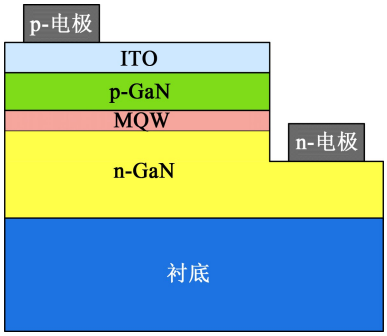



图 1 GaN 基蓝绿光 LED 典型结构图




图 2 GaN 基蓝绿光 LED 简化结构图

在 LED 表面生长周期性微纳米结构会产生类似于光子晶体的作用。通过控制禁带、波导模式，可成功抑制导模、增强辐射模，最终提高光提取效率[12]。二维正方晶格和二维三角形晶格是最简单的光子晶体结构。已有研究表明三角形晶格比正方晶格具有更大的完全禁带宽度，显示出较优异的能带性能[13]，且实际生长多为三角形晶格微纳米结构，所以在模拟仿真时我们着重研究三角形晶格的光子晶体结构。

在 GaN 基 LED 上设计周期性三角形晶格纳米柱状与纳米锥状垂直结构，分别如图 3，4 所示。采用 LED Utility 模块[14]，四周边界条件设置为完美匹配层(PML)[15]，量子阱中的载流子复合发光可以等效为点源(单个偶极子源)[16]，源上下方分别为 p-GaN 和 n-GaN(折射率 $n=2.4$)，结构上方为 ZnO 微纳结构(折射率 $n=2$)，其余位置则填充空气(折射率 $n=1$)。仿真区域的最上方设置与模型宽度相等的监视器用来反馈从 LED 中辐射出来的光功率 $P$，同时设总发光功率 $P_{\text{total}}=1$，则光提取效率定义为 $\eta=\dfrac{P}{P_{\text{total}}}\times 100\%$。由于单纯的光提取效率绝对值对于我们的研究没有实际意义，为了更好地比较微纳结构相较平板结构对光提取效率的影响，同时设计了平板结构 LED(如图 5 所示)，并定义光提取效率增强因子 $\beta=\dfrac{\eta}{\eta_0}$，$\eta_0$ 为平板 LED 的光提取效

率。

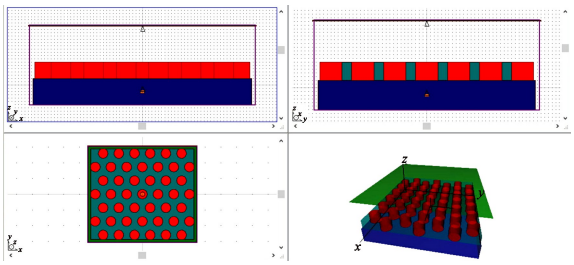


图 3　Rsoft 模拟柱状结构 LED

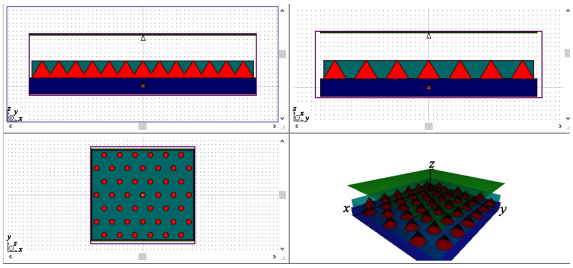


图 4　Rsoft 模拟锥状结构 LED

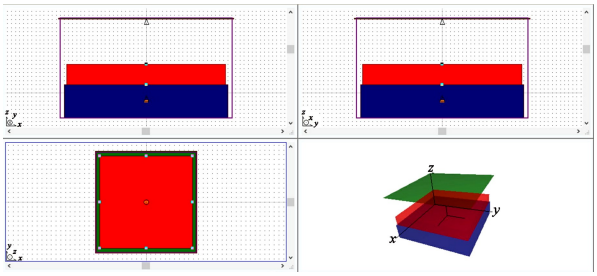
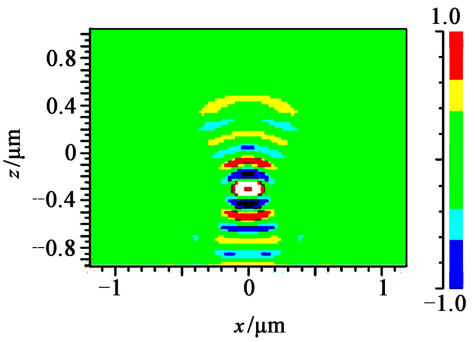


图 5　Rsoft 模拟平板结构 LED

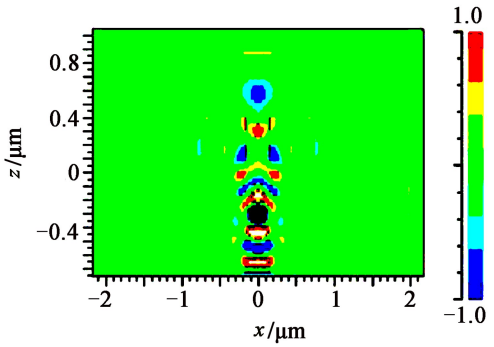
## 2　仿真结果与性能分析

### 2.1　ZnO 纳米柱结构仿真结果与分析

图 6(a),(b)分别是平板结构 LED 与柱状结构 LED 的电磁场分布图($E_x$ 分量),可以看出平板结构 LED 的偶极子在辐射发光时形成球面波,而柱状结构 LED 偶极子发出的光沿着纳米柱传播,并从纳米柱上端和侧壁辐射到外部空间,偶极子的辐射场会在纳米柱的作用下重新分布,释放出更多的能量,在整个结构内产生多次折射反射,因而形成更加复




(a)　平板 LED

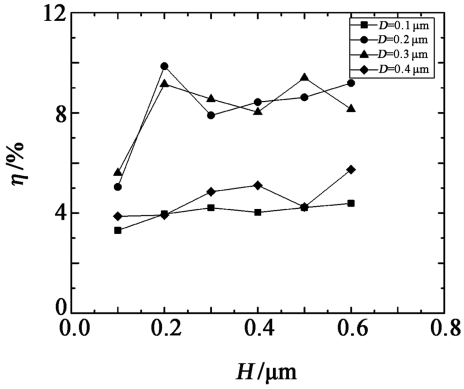



(b)　柱状结构 LED

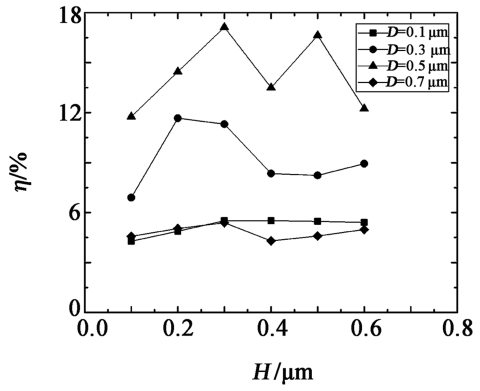
图 6　两种结构 LED 的电磁场分布图(分量)

杂的光路叠加和耦合效应,从而提高 LED 的光提取效率。

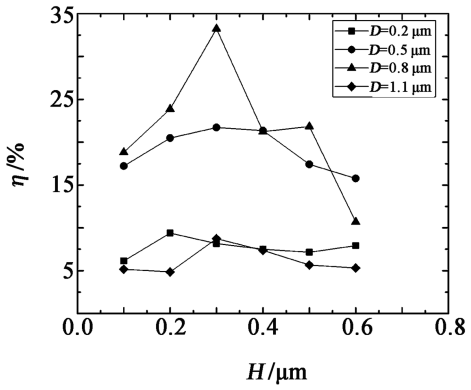
纳米柱的结构参量为直径 $D$,高度 $H$,排列周期 $p$。为了研究各参量对 LED 光提取效率 $\eta$ 的影响,首先固定 $D$ 与 $p$,探讨高度 $H$ 与光提取效率的关系。选择三个代表周期 $p$ 分别为 0.4,0.7 和 1.1 μm,每个周期中又隔一定的差值取 $D$($D\leqslant p$,$D>p$ 时无意义)。$H$ 在 0.1～0.6 μm 范围内每隔 0.1 μm 取一值。仿真结果如图 7 所示,当纳米柱的排列周期 $p$ 一定,$D$ 取值过小或 $D=p$(即纳米柱紧密排列)时,光提取效率很低,甚至比未加任何结构的平板 LED 光提取效率更低,不可取,中间两组 $D$ 值对应的光提取效率较好。我们推测无论 $p$ 取何值,光提取效率随 $D$ 的大致变化存在一个先增后减的过程。另外,在周期 $p$ 保持定值时,对于任意的 $D$ 值,光提取效率会在随 $H$ 的增大而增大至某一最大值后,开始下降,期间偶尔有起伏但不会越过该最大值。且该光提取效率的最大值均出现在 $H$ 取 0.2～0.3 μm 范围内。对于本文研究的 510 nm 蓝绿光 LED,发现 $H_{max}\approx\lambda/n_{ZnO}$,这与文献[17]的一致,$H$ 增大或减小,光提取效率都会随之降低。基




(a)　$p=0.4$ μm

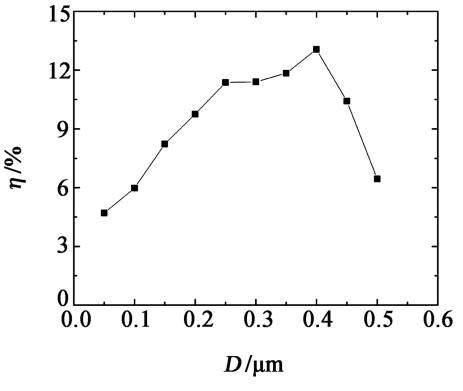



(b) $p=0.7\ \mu m$

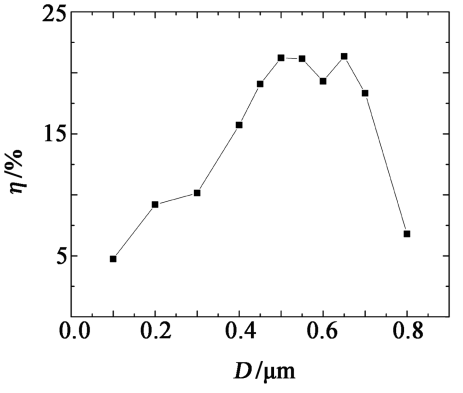



(c) $p=1.1\ \mu m$

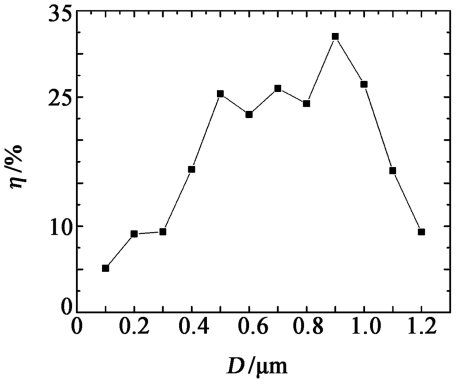
图 7 光提取效率 $\eta$ 随高度 $H$ 的变化关系




(a) $p=0.5\ \mu m$




(b) $p=0.8\ \mu m$




(c) $p=1.2\ \mu m$

图 8 光提取效率随直径 $D$ 的变化关系

于以上两点，不论周期 $p$ 取何值，应该都存在一个与 $p$ 相关的 $D$ 的最大值 $D_{max}$，且 $D_{max}$ 不可取过小值或 $D=p$，而是位于中间某一值。

为了研究 $p$ 与 $D$ 的关系，取 $H=0.25\ \mu m$。同时选择三个代表周期 $p$ 分别为 0.5，0.8 和 1.2 $\mu$m，并相隔一定的差值取 $D$。仿真结果如图 8 所示，可以看出，光提取效率会随着 $p$ 值与 $D$ 值的变化而变化，并且随着 $p$ 值的增大，光提取效率也呈现上升趋势。另外，每组固定 $p$ 值时，光提取效率会随着 $D$ 的增大而先增后减，但光提取效率最大值对应的 $D$ 值并没有类似分析高度时大致出现在同一位置区间。所以为了找出规律，更详细地确定 $p$ 与 $D$ 关系，对于 $p$ 取 0.3～1.7 $\mu$m，步长为 0.1 $\mu$m，做了多组模拟仿真后，把每个周期内取到的光提取效率最大值及取最大值时对应的 $D$ 值列于表 1。

**表 1 每个周期光提取效率最大值及取最大值时对应的 $D$ 值**

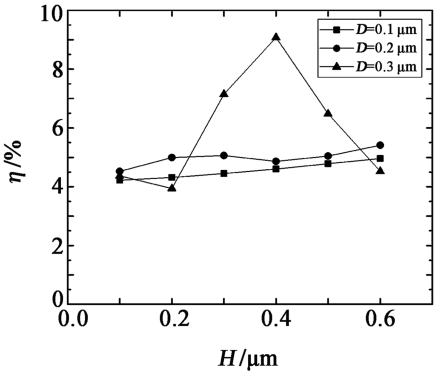
| $p$/μm | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $D$/μm | 0.30 | 0.40 | 0.45 | 0.55 | 0.65 | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 |
| $\eta$/% | 9.80 | 13.06 | 16.34 | 17.78 | 21.35 | 24.43 | 27.20 | 32.33 | 32.02 | 34.64 | 36.19 | 37.13 | 37.07 | 37.11 |

分析表 1 可得，当 0.3 $\mu m \leqslant p \leqslant 1.1\ \mu m$ 时，光提取效率 $\eta$ 随 $p$ 的增大而增大，且对应的 $D$ 值也随之增大。$D/p$ 的比值均集中在 0.7～0.85，此时光提取效率达到最大。当 $p>1.1\ \mu m$ 时，最佳的 $D$ 值基本稳定在 0.9 $\mu$m，且 $p$ 值持续增加对光提取效率的影响幅度降低，在 $P=1.5\ \mu m$ 处，光提取效率达到最大值 37%左右。所以在柱状结构 LED 中，最优模型为 $H=0.25\ \mu m$，$p=1.5\ \mu m$，$D=0.9\ \mu m$，$\eta \approx$

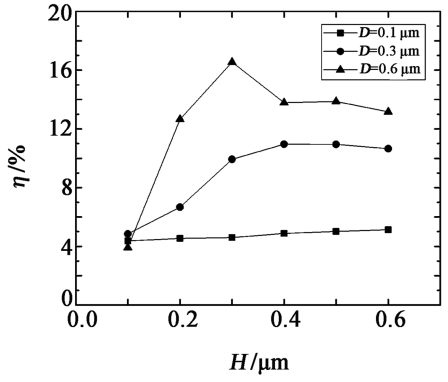
37%，与未加任何结构的平板 LED 相比，光提取效率增强因子为 $\beta=\eta_{柱状}/\eta_{平板}=5.6$。相比文献[18]中二维纳米柱状结构 LED 的最优提取效率为普通平板 LED 的 2.5 倍，本文三维结构性能更佳。

### 2.2　ZnO 纳米锥结构仿真结果与分析

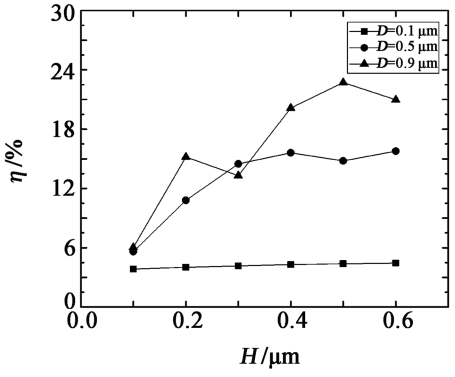
同样对于纳米锥结构(如图 9 所示)，也需要分析 $p$，$D$，$H$ 三个参量。首先固定 $D$ 与 $p$，探讨高度 $H$ 与 $\eta$ 的关系。选择三个代表周期 $p$ 分别为 0.3，0.6 和 0.9 μm，每个周期内又隔一定的差值取 $D$($D\leqslant p$，$D>p$ 时无意义)。$H$ 在 0.1～0.6 μm 范围内每隔 0.1 μm 取一值。




(a)　$p=0.3$ μm




(b)　$p=0.6$ μm

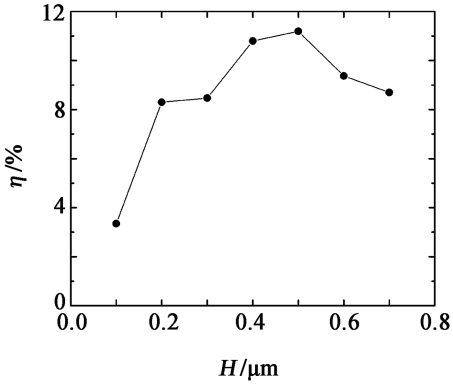



(c)　$p=0.9$ μm

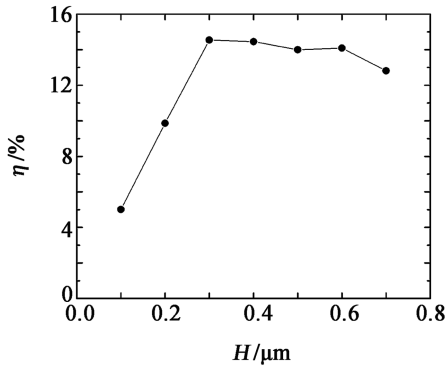
图 9　光提取效率随高度 $H$ 的变化关系

通过分析可发现虽然采用周期不同，但是每组中当 $p=D$，即纳米锥紧密排列时，光提取效率均会达到最大值。为了得到确切 $p$，$D$ 与 $H$ 的关系，设定 $p=D$，仅改变 $p$ 与 $H$ 的值进行优化。同样也选择三个代表周期 $p$ 分别为 0.4，0.7 和 1.0 μm，并相隔一定的差值取 $D$。

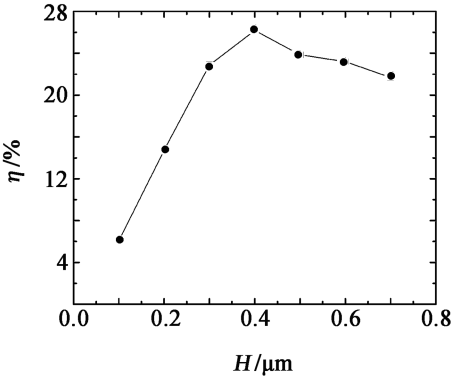
仿真结果如图 10 所示，光提取效率 $\eta$ 随 $p$ 值的增大而增大。另外，每组固定 $p$ 值时，$\eta$ 会随着 $p$ 的增大而先增后减，且 $\eta$ 最大值对应的 $H$ 值大致出现在同一位置区间，即 $H$ 取 0.4～0.6 μm。同时为了研究光提取效率最优处的LED结构，我们继续从




(a)　$p=0.4$ μm




(b)　$p=0.7$ μm




(c)　$p=1.0$ μm

图 10　$p=D$ 时光提取效率 $\eta$ 随高度 $H$ 的变化关系

$p=1.0\ \mu m$ 开始每隔 $0.1\ \mu m$ 取一值，做了多组模拟仿真，将每一 $p$ 值在 $H$ 为 $0.4\sim0.6\ \mu m$ 时对应的光提取效率值列于表 2。

**表 2 不同 $p$ 值在 $H$ 为 0.4～0.6 μm 时对应光提取效率(单位:%)**

| $H/\mu m$ | $p/\mu m$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 |
| 0.4 | 29.17 | 28.68 | 30.92 | 28.38 | 23.22 | 28.16 |
| 0.5 | 28.24 | 22.93 | 22.2 | 27.88 | 28.29 | 32.95 |
| 0.6 | 26.43 | 19.36 | 31.4 | 35.2 | 33.62 | 31.98 |

由表 2 可得，在微纳锥结构 LED 中，最优模型为 $H=0.6\ \mu m$，$p=D=1.4\ \mu m$，$\eta\approx35\%$，与未加任何结构的平板 LED 相比，光提取效率增强因子为 $\beta=\eta_{锥状}/\eta_{平板}=5.3$ 倍。相比文献[17]中二维纳米锥状结构的最优提取效率为普通 LED 的 2.3 倍，本文三维结构性能更佳。

## 3 结论

本文研究了柱状与锥状 ZnO 微纳结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响，利用三维时域有限差分方法(FDTD)进行模拟仿真计算，讨论分析了光提取效率随各几何结构参量的变化情况。对于纳米柱状结构，仿真结果表明当 $H=0.25\ \mu m$，$p=1.5\ \mu m$，$D=0.9\ \mu m$ 时，光提取效率是未加任何结构的平板 LED 的 5.6 倍；纳米锥状结构在 $H=0.6\ \mu m$，$p=1.4\ \mu m$，$D=1.4\ \mu m$ 时形成最优结构，其光提取效率是未加任何结构的平板 LED 的 5.3 倍。虽然由于两种结构在设置相同几何参量时，模型大小和其他仿真条件均相同，所以结果对比均有可行性。综上分析，ZnO 纳米柱状与 ZnO 纳米锥状结构均可显著提高 GaN 基 LED 光提取效率。但相比锥状结构，柱状结构在较小的尺寸下便可达到更优的效果，表现更优。

**参考文献:**


[1] Feng Qibin, Li Qigong, Wang Yong, et al. The design and optimization of lens array for LED backlight in LCD imaging engine of helmet-mounted display[J]. J. of the Society for Information Display, 2017, 25(46): 312-319.

[2] Ghosh R, Haldar A, Ghosh K K, et al. Further enhancement of light extraction efficiency from light emitting diode using triangular surface grating and thin interface layer[J]. Appl. Optics, 2015, 54(4): 919-926.

[3] Wiesmann C, Linder N, Schwarz U T. Analysis of the emission characteristics of photonic crystal LEDs[C]// Proc. of Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2008: 69890L-69890L-9.

[4] 田 媛，陈雷雷，赵琳娜，等. GaN 高压 LED 在极小电流与极低温度下的光电特性[J]. 微电子学，2020，50(5)：709-714.
Tian Yuan, Chen Leilei, Zhao Linna, et al. Study on photoelectronic characteristics of GaN high voltage LEDs at extremely low current and temperatures[J]. Microelectronics, 2020, 50(5): 709-714.

[5] 尹正茂. 氧化物微纳米结构提高 GaN 基 LED 光提取效率的研究[D]. 济南：山东大学，2014.
Yin Zhengmao. Research on improving the light extraction efficiency of GaN-based LED with oxide micro-nano structure [D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.

[6] 李泽平，魏志文，李东京，等. 光子晶体结构提升发光二极管出光效率的研究[J]. 湖北科技学院学报，2019，39(4)：85-89，93.
Li Zeping, Wei Zhiwen, Li Dongjing, et al. Research on photonic crystal structure to improve the efficiency of light-emitting diode [J]. J. of Hubei University of Science and Technol., 2019, 39(4): 85-89, 93.

[7] Chao Y C, Chen C Y, Lin C A, et al. Antireflection effect of ZnO nanorod arrays[J]. J. of Materials Chemistry, 2010, 20 (37): 8134.

[8] Uthirakumar P, Kang J H, Ryu B D, et al. Nanoscale ITO/ZnO layer-texturing for high-efficiency InGaN/GaN light emitting diodes[J]. Materials Science & Engin. B, 2010, 166 (3): 230-234.

[9] Ye B U, Kim B J, Song Y H, et al. Enhancing light emission of nanostructured vertical light-emitting diodes by minimizing total internal reflection[J]. Adv. Functional Materials, 2012, 22(3): 632-639.

[10] 杜春花. GaN 基长波长发光二极管的生长和表征[D]. 北京：中国科学院大学，2015.
Du Chunhua. Growth and characterization of GaN-based long-wavelength light-emitting diodes [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.

[11] Zhang Zhenming, Li Kang, Kong Fanmin, et al. Study on improving light emitting efficiency of LED by using silver nanodisk array [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (4): 0423001.

[12] Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen, Zhang Daozhong. The mathematical equivalence of photonic bandgaps and electronic bandgaps for 1D and 2D systems[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 31(7): 802-806.

[13] Gao Sujuan, Peng Wei, Chen Herring. The effect of structure parameter on complete bandgap of two-dimensional photonic crystal [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2005, 18(5): 16-19.

[14] 徐兴连. InGaN/GaN 基纳米柱 LED 的制备及光学特性研究[D]. 济南：山东大学，2018.


(下转第 326 页)

电荷浓度变化的原因。仿真结果表明,STI 产生的耗尽区会影响 PPD 中 pin 层与地极之间的电学接触,当 STI 中陷阱电荷浓度足够大,使得耗尽区将 pin 层包围(pin 层与地极电学隔离)时,pin 层电势会受到 $V_{inj}$ 的影响,导致当 PPD 复位时所需的 $V_{inj}$ 增大,即 $V_{pin}$ 增大。

## 参考文献:


[1] Fossum E R, Hondongwa D B. A review of the pinned photodiode for CCD and CMOS image sensors[J]. IEEE J. of The Electron Devices Society, 2014, 2(3): 33-43.

[2] Marcelot O, Goiffon V, Nallet F, et al. Pinned photodiode CMOS image sensor TCAD simulation: in-depth analysis of in-pixel pinning voltage measurement for a diagnostic tool[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, 64(2): 455-462.

[3] Oh Tae Hwan, Lee Seung Hoon. Single-chip CMOS CCD camera interface based on digitally controlled capacitor-segment combination[J]. IEEE Trans. on Circuits & Systems Ⅱ: Analog and Digital Signal Proc., 2000, 47(11): 1338-1343.

[4] Pelamatti A, Goiffon V, Moreira A de I, et al. Comparison of pinning voltage estimation methods in pinned photodiode CMOS image sensors[J]. IEEE J. of the Electron Devices Society, 2016, 4(2): 99-108.

[5] Goiffon V, Estribeau M, Marcelot O, et al. Radiation effects in pinned photodiode CMOS image sensors: Pixel performance degradation due to total ionizing dose[J]. IEEE Trans. on Nuclear Scence, 2013, 59(6): 2878-2887.

[6] Liu Fan, Yang Feng, Wang Han, et al. Radiation-hardened CMOS negative voltage reference for aerospace application[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2017, 64(9): 2505-2510.

[7] Pernegger H. Development of radiation hard CMOS active pixel sensors for HL-LHC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 824: 446-448.

[8] Braunig D, Wulf F. Atomic displacement and total ionizing dose damage in semiconductors[J]. Radiation Physics and Chemistry, 1994, 43(1/2): 105-127.

[9] Wang J, Li B, Huang Y, et al. The total ionizing dose response of leading-edge FDSOI MOSFETs [J]. Microelectronics and Reliability, 2018, 88/90: 979-983.

[10] Ravotti F. Dosimetry techniques and radiation test facilities for total ionizing dose testing[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2018, 65(8): 1440-1464.

[11] Goiffon V, Estribeau M, Michelot J, et al. Pixel level characterization of pinned photodiode and transfer gate physical parameters in CMOS image sensors[J]. IEEE J. of The Electron Devices Society, 2014, 2(4): 65-76.

[12] Tan J. Analyzing the radiation degradation of 4-transistor deep submicron technology CMOS image sensors[J]. IEEE Sensors J., 2012, 12(6): 2278-2286.

[13] Rizzolo S, Goiffon V, Estribeau M, et al. Total ionizing dose effects on charge transfer efficiency and image lag in pinned photodiode CMOS image sensors[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2018, 65(1): 84-91.


## 作者简介:


**宋辰昱**(1996—),男,河北承德人,硕士研究生,主要研究方向为图像传感器失效机理;

**申人升**(1978—),男,吉林长春人,博士,高级工程师,主要研究方向为专用 CMOS 图像传感器;

**常玉春**(1973—),男,吉林公主岭人,博士,教授,主要研究方向为高动态 CMOS 图像传感器。


(上接第 320 页)


Xu Xinglian. Preparation and optical properties of InGaN/GaN-based nanopillar LED[D]. Ji'nan: Shandong University, 2018.

[15] Liu Shunrui, Wang Li, Zhang Minglei, et al. Study of light extraction efficiency for LED with square aperture nano-hemisphere array[J]. Chinese J. of Luminescence, 2017, 38(12): 1668-1674.

[16] Wiesmann C. Nano-structured LEDs-light extraction mechanisms and applications[D]. Regensburg: University Regensburg, 2009: 1-105.

[17] Matioli E, Weisbuch C. Impact of photonic crystals on LED light extraction efficiency: approaches and limits to vertical structure designs[J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 2010, 43(35): 354005.

[18] 李 伟, 岳庆炀, 孔繁敏, 等. 顶端 ZnO 纳米结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响[J]. 光子学报, 2013, 42(4): 409-416.
Li Wei, Yue Qingyang, Kong Fanmin, et al. Influence of surface ZnO nano-structures on the light emitting efficiency of GaN-based LED[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(4): 409-416.


## 作者简介:


**雒倩男**(1995—),女,硕士生,主要从事半导体器件分析方向的研究;

**胡芳仁**(1973—),男,博士,教授,主要从事光电集成器件方向的研究。