

分布式布拉格反射与小面积金属接触复合三维电极结构的 AlGaIn 基紫外 LEDs 设计

袁照容, 杨旭*, 李金钗, 李书平, 周颖慧*, 康俊勇

(厦门大学 物理与机电工程学院, 福建省半导体材料及应用重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: AlGaIn 基紫外 LEDs 具有高光子能量和短波长的特点, 在诸多领域有着广阔应用前景. 结合器件电流分布、温度控制及出光增强等多物理场因素, 采用有限元方法设计了一种分布式布拉格反射与小面积金属接触复合三维电极结构的 AlGaIn 基紫外 LEDs. 计算分析表明, 相比于传统垂直结构器件, 该器件结构具有高效的电流注入效率、良好的散热水平及较高的出光效率, 有望大幅度提高紫外发光器件的光电转换效率.

关键词: AlGaIn; 紫外 LED; 垂直结构; 多物理场; 有限元

中图分类号: O 472

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2015)04-0504-08

GaN 基发光二极管 (light-emitting diodes, LEDs) 作为第四代绿色照明光源, 具有节能、环保、寿命长、体积小等特点, 已得到广泛应用^[1]. LEDs 的发光波长主要取决于半导体有源区材料的禁带宽度, 以 AlGaIn 半导体材料为有源区 (禁带宽度 $E_g = 3.4 \sim 6.0$ eV) 的紫外光 LEDs 发光波长能够覆盖从近紫外波段到紫外波段 ($\lambda = 365 \sim 210$ nm)^[2], 其在照明、杀菌、医疗、印刷、生化检测、高密度的信息储存和保密通信等领域具有重要应用前景^[3-4]. 然而, 由高 Al 组分 AlGaIn 基材料构成的紫外 LEDs 器件 (ultraviolet LEDs, UV LEDs) 光电转换效率与可见光 GaN 基 LEDs 器件相比仍有较大差距^[5]. 主要原因在于 AlGaIn 晶体质量不佳, 外延半导体材料对紫外光的透射率低, 背光反射电极的反射率不够高, 以及高 Al 组分 AlGaIn 由于较高的受主激活能导致 p-AlGaIn 电导率较低等^[6]. 由于 AlGaIn、AlN 材料相对较高的电阻率造成 UV LEDs 的电流拥堵问题尤为严重, 有源区中大量的非辐射复合导致 UV LEDs 的自热效应更加明显. 再加之 p-GaN 和 p-AlGaIn 对紫外波段光的严重吸收, 因此, 传统的器件结构并不适用于 UV LEDs,

亟需针对 AlGaIn 材料特性进行器件结构的改造与设计. 本文综合考虑器件中电流扩展、自热效应和出光增强三方面的多物理场耦合关系, 利用有限元方法建立了垂直结构 UV LEDs 器件中的多物理场模型, 并在此基础上设计了能够实现更高光效的 UV LEDs 器件结构——分布式布拉格反射与小面积金属接触复合三维电极结构 (专利号: CN 102820398 A). 通过计算分析表明, 该器件结构能够明显改善电流分布, 具有优良的散热性能和较高的光提取效率.

1 计算方法和模型

分析半导体器件的核心物理方程^[7]有:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \psi) = -\rho,$$

其中, ψ 为静电势函数, ϵ 为介电常数, ρ 为局域电荷密度.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n + G_n - R_n, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p + G_p - R_p.$$

其中, $n(p)$ 为电子 (空穴) 浓度, $\mathbf{J}_n (\mathbf{J}_p)$ 为电子 (空穴) 电流密度, $G_n (G_p)$ 和 $R_n (R_p)$ 分别为电子 (空穴) 产生

收稿日期: 2015-01-15 录用日期: 2015-04-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2012CB619301, 2011CB25600); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2014AA032608); 国家自然科学基金 (U1405253, 61227009, 11204254, 11404271)

* 通信作者: yangxu@xmu.edu.cn

引文格式: 袁照容, 杨旭, 李金钗, 等. 分布式布拉格反射与小面积金属接触复合三维电极结构的 AlGaIn 基紫外 LEDs 设计[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2015, 54(4): 504-511.

Citation: Yuan Zhaorong, Yang Xu, Li Jinchai, et al. Design of vertical AlGaIn-based ultraviolet LEDs with distributed bragg reflectors-pixed metal combined electrodes[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2015, 54(4): 504-511. (in Chinese)



<http://jxmu.xmu.edu.cn>

率与复合率.

$$J_n = q\mu_n n \nabla \phi_n, \quad J_p = q\mu_p p \nabla \phi_p.$$

其中, μ_n (μ_p) 为电子(空穴)迁移率, ϕ_n (ϕ_p) 为电子(空穴)的准费米能级电势.

$$\rho_L C_L \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{J}_{\text{heat}} + H_{\text{heat}},$$

其中, ρ_L 为材料密度, C_L 为材料比热容, \mathbf{J}_{heat} 为热流密度, H_{heat} 为热量密度.

根据材料性质选取合适的物理模型, 依据器件结构设定合理的边界条件, 运用有限元的方法, 将器件进行网格化, 在每个格点上, 联立上述 4 个方程进行求解, 原则上就能分析所有的器件物理问题. 本文正是基于该方法对 UV LEDs 器件进行多物理场分析.

器件结构建模的关键在于选取恰当的物理模型, 包括 LEDs 外延材料的能带模型、迁移率模型、载流子复合模型、自热效应模型等. 本文计算所采用的能带模型是 Chuang 等利用 $k \cdot p$ 算法建立的在应力场影响下的纤锌矿半导体能带结构模型^[8-9]. 在迁移率模型中, Caughey 等最先建立了 Si 材料中迁移率随着掺杂浓度和温度变化的解析关系^[10]. 本文采用 Farahmand 等运用蒙特卡洛模拟方法对 Caughey-Thomas 模型进行了修正, 使其适用于 GaN 基半导体材料^[11]. 载流子复合模型包括有源区量子阱自发辐射复合模型、与缺陷有关的非辐射复合——Shockley-Read-Hall (SRH) 复合及载流子浓度有关的非辐射复合——俄歇复合^[12]. 而对于自热效应模型则主要包括由于晶格散射产生的焦耳热、非辐射复合热等^[13].

2 器件结构设计和分析

本文选取实验中用 MOVPE 方法在 c 面蓝宝石衬底上生长的 UV LEDs 外延结构: AlN 复合基底生长于蓝宝石衬底上, 随后依序为 1.75 μm 厚的 $n\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 层、3 个周期的多层量子阱结构(其阱层为 5 nm 厚的非掺杂 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{N}$ 、垒层为 10 nm 厚的低掺杂 $n\text{-Al}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{N}$)、1 nm 的 $p\text{-Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ 电子阻挡层、84 nm 的 $p\text{-Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ 层以及 20 nm 的 $p^+\text{-GaN}$ 作为 p 电极欧姆接触层^[14]. 由于蓝宝石衬底本身绝缘, 在计算时未考虑其具体厚度. 首先采用有多物理场有限元方法对外延结构中有源区内载流子辐射复合率和电致发光谱(electroluminescence spectrum, EL)进行了计算. 由于电子和空穴在各个量子阱区域的浓度分布不均匀导致各个量子阱的载流子辐射复合率不同, 如图 1(a)所示, 中间的量子阱(QW2), 其空

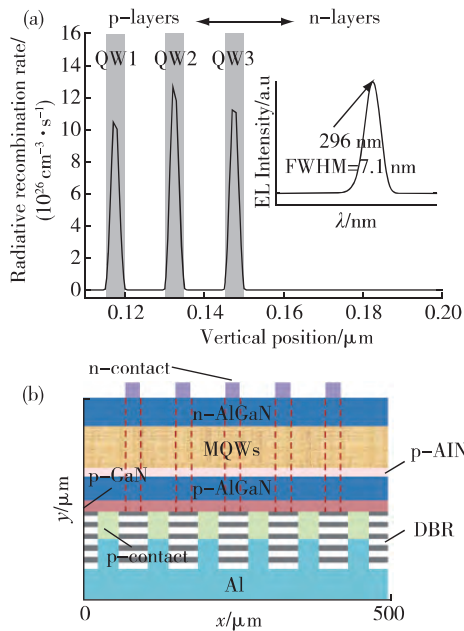
穴浓度高于靠近 n 型层的量子阱(QW3)而电子浓度又高于靠近 p 型层的量子阱(QW1), 导致 QW2 中的载流子辐射复合率最高, 发光最强. 因此, 本文选取 QW2 作为器件水平方向上载流子辐射复合率的分析区域, 同时选取 EL 发光谱峰位波长 296 nm 作为背反射镜设计的参考波长.

由于紫外光对大多数半导体材料的吸收, 使得大部分 UV LEDs 器件都采用倒装结构和垂直结构. 其中, 垂直结构器件通过激光剥离蓝宝石衬底, 将 n 电极制作在剥离后的 n 型层上面作为出光面, 同时在 p 电极一侧镀上金属背反射镜, 可提高器件的光提取效率^[15-16]. 此外, 垂直结构的 p 和 n 型电极分别位于器件的两边, 也减弱了台面结构所带来的电流拥挤问题, 提高了器件电流注入的均匀性, 降低了器件产生的热量. 然而, 常规的垂直结构中, n 型电极一般为块状电极, 为了不影响器件出光, n 电极的尺寸不能过大, 再加上 n 型 AlGa_n 层的电阻率相对较高, 电子电流在 n 型层侧向扩展十分有限, 电流在 n 型电极两侧边缘仍然出现拥挤问题. 此外, 虽然金属 Al 在紫外波段具有很好的反射特性^[17], 可以作为 UV LEDs 背反射镜的候选材料. 但是, Al 本身作为电极却难以与 $p\text{-GaN}$ 层形成欧姆接触, 若在 $p\text{-GaN}$ 层和 Al 反射镜之间再插入 Ni/Au 的 p 型欧姆接触层, Ni/Au 对紫外光的吸收将导致背反射镜的反射率严重降低. 针对上述问题, 本文在传统垂直结构器件基础上, 结合器件电流分布、温度控制及出光增强三方面因素, 设计了一种分布式布拉格反射与小面积金属接触复合三维电极结构, 以实现更高光效的 UV LEDs. 该器件的具体结构如图 1(b)所示, n 型条形阵列接触电极位于 $n\text{-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 层的正上方从下至上依次为金属 Ti/Al/Ti 三层结构, 厚度分别为 20, 200 和 5 nm; 由 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 构成的多层介质分布式布拉格反射镜(distributed bragg's reflector, DBR)淀积在 $p\text{-GaN}$ 层表面; 金属 Ni/Au 构成的小面积阵列作为 p 型欧姆接触电极, 间隔分布在 DBR 结构之中, 厚度均为 20 nm; 金属 Al 覆盖在 DBR 和电极阵列的表面, 使其既作为接触电极阵列的互联层又作为紫外光的金属反射层. 本文利用多物理场有限元方法对该器件结构从 n 型电极结构、反射基底结构与 p 型电极结构进一步进行了分析优化.

2.1 n 型条形阵列电极结构设计和分析

对于可见光波段, 我们设计了一种树叶脉络形电极, 大幅度提高了大功率 GaN 基发光二极管电流注入的均匀性(专利号: 200610092944.1). 受此启发, 又设

<http://jxmu.xmu.edu.cn>

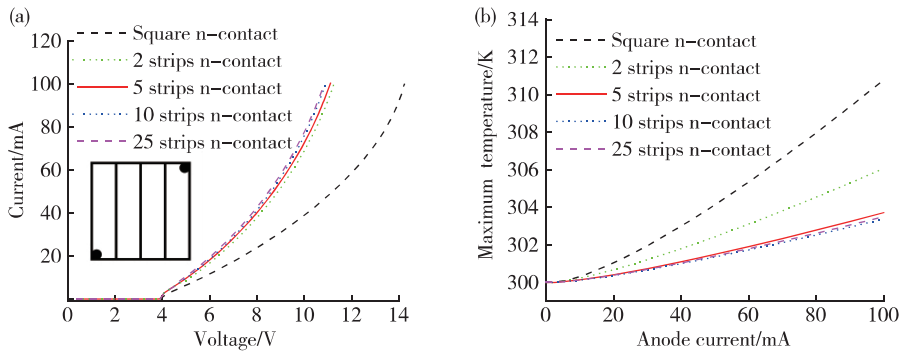


(a) 外延结构截面方向上,各量子阱区域辐射复合率分布图,插图为计算模拟的外延结构 EL 光谱图,发光峰位为 296 nm,半高宽(FWHM)为 7.1 nm;(b) 本文设计的垂直结构 UV LEDs 截面示意图。

图 1 本文所采用的外延结构发光特性和器件结构

Fig. 1 The emission characteristics of epilayer structure and the profile of ultraviolet LEDs structure

设计了 4 种不同尺寸和间距的 n 型条形阵列电极. 为了定量分析条形阵列电极对器件性能的改善,也对传统块状 n 型电极的器件结构进行了计算,作为结构最为简单的垂直结构 LEDs,单个块状 n 型电极位于 n 型出光面的中心. 芯片尺寸设计为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$, 2 列条形电极宽度为 $25 \mu\text{m}$, 间距 $150 \mu\text{m}$; 5 列条形电极宽度为 $10 \mu\text{m}$, 间距为 $90 \mu\text{m}$; 10 列条形电极宽度为 $5 \mu\text{m}$, 间距 $40 \mu\text{m}$; 25 列条形电极宽度为 $2 \mu\text{m}$, 间距 $18 \mu\text{m}$.



(a) 2 种结构 UV LEDs $I-V$ 关系图,插图为 5 列条形 n 电极平面示意图;(b) 2 种结构器件热沉温度与注入电流的关系图。

图 2 条形阵列和块状 n 电极结构 UV LEDs 电学与热学特性关系

Fig. 2 The electrical and thermal characteristics of the strip and square n-contact UV LEDs

μm . 而块状电极的尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, 所有 n 型电极金属面积所占 n 型出光面的面积比例均为 1%. 5 列条形电极的结构如图 2(a) 插图所示.

图 2(a) 给出了 4 种条形电极与块状电极的电流-电压 ($I-V$) 关系. 从 $I-V$ 曲线斜率可看出, 条形阵列电极能有效降低器件整体的串联电阻. 等间距的电极阵列缩短电流在 n-AlGaIn 层侧向传播的距离, 减少了 n-AlGaIn 层水平方向的电阻对器件整体串联电阻的影响, 使得电子能够更加均匀地注入到器件, 改善了 n 型层出光面的电流分布. 而不同尺寸的条形电极的 $I-V$ 曲线略有区别, 条形数目越多、间距越小, 其串联电阻也越低, 25 列条形电极要比 2 列条形电极的结构略好.

由于器件载流子和声子的相互作用, 条状阵列 n 型电极在改善器件的电流分布、提高电流注入效率的同时, 也降低了器件的总体温度. 特别是在大电流注入时, 4 种电极设计的温度差别愈为明显, 如图 2(b) 所示. 在 100 mA 的注入电流下, 块状 n 型电极器件的最高温度达到了 310 K , 2 列条形电极 n 器件的最高温度也达到了 306.07 K . 而 5 列、10 列和 25 列条形电极 n 器件的最高温度只从室温升高到 303.46 , 303.24 , 303.50 K . 器件的主要两大热源焦耳热和非辐射复合热都与器件的电流密度密切相关, 电流密度越高, 所产生的热量也就越多. 可以看到, 虽然采用了垂直结构, 整个 p 型电极键合金属基板提高了散热水平, 但器件温度在大电流注入下仍然有所升高. 因此, 器件的温度控制对于大电流注入下工作的 UV LEDs 的稳定性仍十分重要.

尽管条形阵列 n 电极能明显改善器件的电流分布和自热效应, 然而随着阵列数目的增加并不一定能提高器件整体的发光效率, 即增加外量子效率. 外量

子效率是发射光子数和通过 LEDs 的电子束之比. 明确地说,它是内量子效率、注入效率和光提取效率(light extraction efficiency, LEE)的乘积^[18]. 因此外量子效率的提升是涉及器件多物理场综合因素共同作用的结果. 图 3(a)是在 100 mA 注入电流下,不同 n 器件在有源区中间一层 QW2 内部载流子辐射复合率的截面分布情况. 可以看出,随着阵列数目的增多,平均每条阵列电极下方对应的有源区注入电子数目减少进而使得该有源区域产生的光子数目减少,块状 n 电极结构对应的辐射复合率的最高值为 $1.591 \times 10^{26} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$,而 2 列、5 列、10 列和 25 列条形 n 电极结构的辐射复合率最高值则分别为 1.564×10^{26} , 1.547×10^{26} , 1.544×10^{26} , $1.545 \times 10^{26} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. 与此同时,由于电流的横向扩展效应,条形阵列数目与间距的变化引起有源区内发光强度分布的不同. 随着电极阵列数目增多,间距减少,载流子辐射复合率分布起初会变得更为均匀,10 列条形电极宽度为 $5 \mu\text{m}$,间距为 $40 \mu\text{m}$ 的结构器件载流子辐射复合率分布最为均匀. 然而当 25 列电极结构宽度减少为 $2 \mu\text{m}$,其间距 ($18 \mu\text{m}$)远小于器件的电流扩展长度时,相邻电极间横向电流的叠加效应,使得载流子辐射复合率分布相对于 10 列阵列起伏更大. 通过对图 3(a)各曲线相对于 x 轴的积分面积可以判定出不同结构器件在 100 mA 电流注入下,在有源区内产生光子数目的相对大小. 块状、2 列、5 列、10 列和 25 列条形 n 电极结构对应的积分面积分别为 7.256, 7.714 6, 7.711 7, 7.705, 7.707, 块状电极结构的面积明显小于阵列电极结构,5 列结构的面积最大. 由于器件的内量子效率仅与其外延结构相关,在内量子效率相同的情况下,有源区产生光子数越多,说明其具有更高的注入效率. 因此 5 列 n 电极结构器件具有最高的注入效率.

另一方面,只有那些从器件表面提取出来的光子,才能转化为器件的有效输出功率. 图 3(b)是采用

光子追踪法^[19]结合多物理场有限元方法计算出块状 n 型电极和条形 n 型电极器件的 LEE、输出功率与注入电流的关系. 尽管块状 n 电极器件 LEE(最高达 16.1%)要高于条形阵列器件的 LEE(2 列、5 列、10 列和 25 列最高的 LEE 分别为 15.7%, 14.9%, 11.1% 和 15.8%),然而条形阵列 n 电极能明显改善器件的电流分布和自热效应,综合器件的注入效率与 LEE,从整体的发光强度来看,仍然是条形阵列 n 电极器件要明显高于块状 n 电极器件. 特别是 5 列条形 n 电极器件平衡了电流分布、温度控制和出光增强三者之间的关系,实现了相对最高的输出功率,在 100 mA 下达到 5.45 mW. 因此,5 列条形 n 电极是更适用于该器件的合理设计.

2.2 反射基底(全方位角反射镜)的结构设计

在可见光波段,垂直结构 LEDs 常采用金属 Ag 和 Au 作为背反射镜材料,但这 2 种金属材料在紫外波段都存在严重的吸收. 金属 Al 则在紫外波段具有很好的反射特性^[17],可以作为 UV LEDs 背反射镜的候选材料. 然而,Al 本身作为电极却难以与 p-GaN 层形成欧姆接触,若在 p-GaN 层和 Al 反射镜之间再插入 Ni/Au 的 p 型欧姆接触层,背反射镜的反射率会由于 Ni/Au 对紫外光的吸收而严重降低. 除金属材料外,DBR 结构由于没有金属反射镜的吸收问题,又可以针对不同波长改变 DBR 材料的折射率或厚度来调整能隙位置,也可作为 UV LEDs 背反射镜. 然而,其反射率会随着光入射角度和光的偏振性发生明显变化. 随着入射角度的增加,高反截止波长会向短波长方向移动;而当入射角度达到布儒斯特角 TM 模(p 偏振光)的反射率则会降至 0,导致总反射率(TM 模 + TE 模)/2,在布儒斯特角附近明显降低. 为了解决这一矛盾,我们设计了多层介质膜+金属复合结构的全方位角反射镜,在确保形成 p 型欧姆接触的同时提高

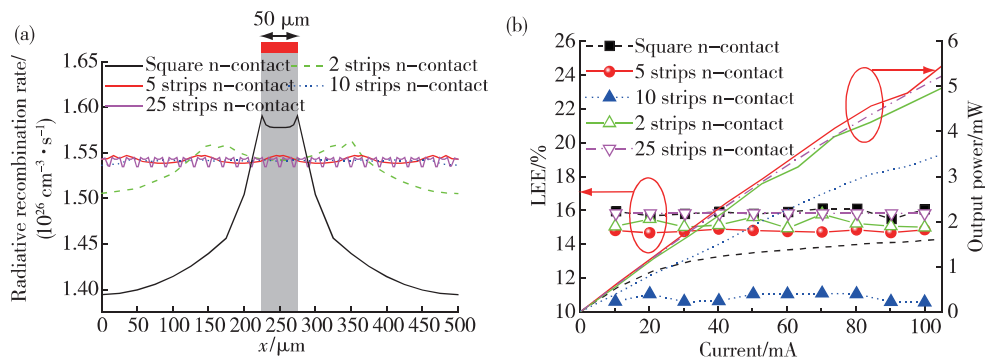


图 3 不同 n 型电极阵列间距 d 的 LED 器件的光电特性关系
Fig 3 The typical electro-optical characteristics of LEDs with various n-contact spacing

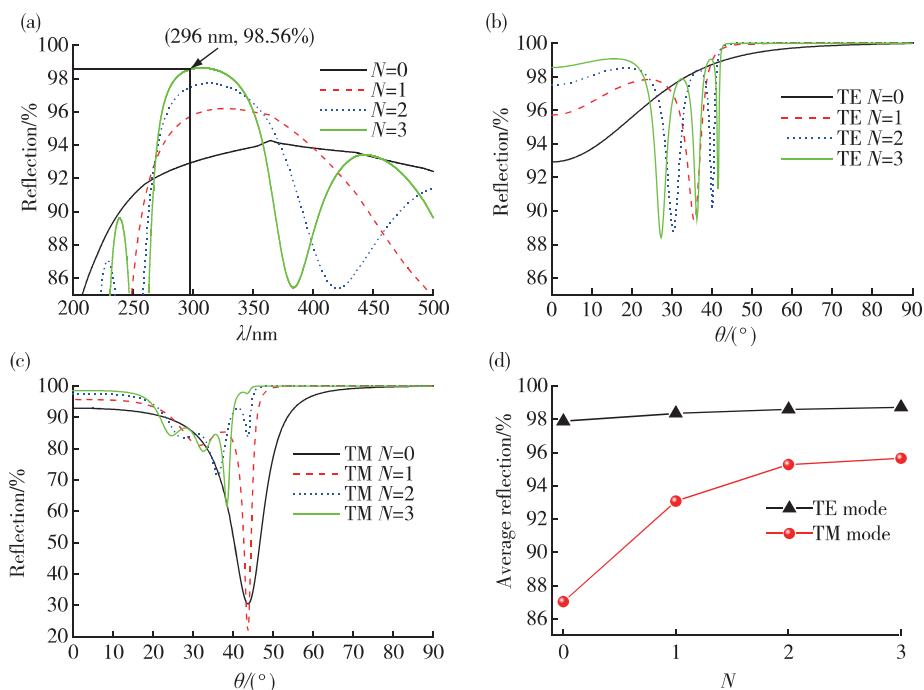
器件的光提取效率. 其中背反射镜材料选用 Al, 选取 HfO_2 和 SiO_2 分别作为紫外波段的高、低折射率材料^[20]. 同时, 利用传输矩阵方法^[17] 分别计算分析具有不同周期数 N 的反射镜对波长 296 nm TE 模和 TM 模光的角反射率.

图 4(a)为垂直入射光的反射谱, 随着 N 的增加反射率峰值逐步增加, 当 $N=3$ 时, 在 296 nm 波长的反射率达到 98.56%. 随着入射光角度变化, TE 模式光的反射率在 $25^\circ \sim 45^\circ$ 之间会出现振荡, 如图 4(b)所示, 且振荡角度范围随着 N 增加而增大, $N=3$ 时, 振荡角度范围是 $27.2^\circ \sim 41.4^\circ$, 但整体振荡的幅度并不高, 所有入射角度的反射率都高于 88%; 若角度进一步增加则会在 GaN/介质界面出现全反射. 而对于 TM 模式光, 由于引入了介质 DBR, 造成不同周期数下均出现了反射率的极低值, 当 $N=2$ 时, 反射率的极低值最高(71.3%), 而 $N=3$ 时, 反射率的极低值为 61.6%, 如图 4(c)所示. 尽管 $N=2$ 时的 TM 模反射率的极低值要高于 $N=3$ 的情况, 但比较 $0^\circ \sim 90^\circ$ 整个入射角范围的平均反射率(图 4(d))可以发现, 随着 N 的增加, TE 模的平均反射率基本不变, 而 TM 模的平均反射率明显增大, 当 N 由 0(只有 Al 金属层作为背反射镜)增加至 3(加入 3 个周期的 DBR 结构)时, TM 模的平均反射率由 87% 增加至 95%. 由此可见, 多层

介质膜+金属复合结构的全方位角反射镜能更有效地提高 UV LEDs 的 LEE. 理论上 DBR 周期数 N 越多, 全方位角反射镜的平均反射率会越大, 然而周期数越多则会由于介质层的绝缘性和高热阻性, 影响器件的电流分布和温度控制. 因此, 在本文中, 选取中心波长为 296 nm, 周期数 $N=3$ 的 DBR 结构, 每层介质膜的光学厚度为中心波长 1/4, HfO_2 和 SiO_2 的厚度分别为 38.1 和 50.4 nm.

2.3 p 型阵列电极的设计和优化

尽管条形 n 电极能够改善垂直结构器件的电流分布, 然而在 n 电极下方的电流密度仍不可避免的会高于其他区域, 使正对电极下方的有源层区域产生的光子数目最多. 但由于金属电极本身对光子的吸收, 电极下方的光子不能有效地出射器件表面, 降低器件的光电转换效率. 通常在 n 型电极正下方制备不导电的电流阻挡层(current-blocking layer, CBL), 能够阻挡电流在电极下方的输运, 使更多的电流注入到那些光子更易于出射出器件表面无电极遮挡的区域^[18]. 巧妙的是, 由前文所述在靠近 p 电极上方的全方位角反射镜结构中恰好存在不导电的 DBR 结构. 可以设想, 若能合理设计 DBR 结构在 p 型外延层的分布位置, 便能使 DBR 结构既作为背反射镜又可作为电流



(a) 在垂直入射光情况下的反射谱; (b) 波长 296 nm TE 模式光的变角度反射率; (c) 波长 296 nm TM 模式光的变角度反射率; (d) 波长 296 nm 的 TE 模和 TM 模光在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 内的平均反射率随着 DBR 周期数 N 的变化关系.

图 4 不同周期数 N 下全方位角反射镜反射谱特性关系

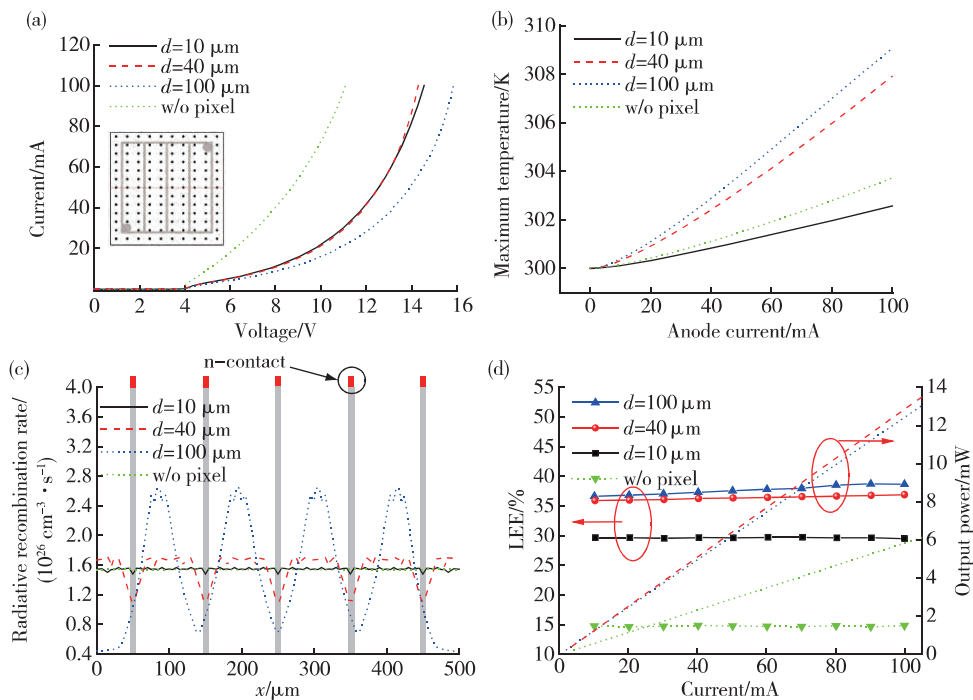
Fig. 4 The reflective characteristics of omnidirectional reflector with different periodicity

阻挡层,使其在出光增强和电流分布两个物理场领域同时发挥作用. 由于 DBR 介质层本身的导热性较低, p 型外延层与 DBR 相接触的区域无法作为有效的热量输运通道, DBR 区域面积过大必定会影响器件的散热水平;若 DBR 区域面积过小,又无法起到良好的电流阻挡作用. 为寻找到较为合适的 DBR 面积,我们设计了每个像素直径为 $10\ \mu\text{m}$, 横向间距 d 分别为 10 , 40 和 $100\ \mu\text{m}$ 的圆形金属阵列电极(如图 5(a)插图所示),并模拟分析其器件结构光电热特性. 金属阵列电极的总面积占据器件总面积的比例分别为 9.67% , 4.02% 和 1.63% .

从图 5(a)器件的 I - V 曲线斜率可看出,由于引入不导电介质层,增加了器件串联电阻,阵列间距 d 越大,电流横向扩展能力越弱. 当 p 型阵列电极间距小于器件的电流扩展长度 L_s 时,如 $d=10\ \mu\text{m}$ 时, p-GaN 层能够实现比较均匀的电流分布和注入, $100\ \text{mA}$ 注入电流下的正向电压为 $14.5\ \text{V}$. 而间距 $d=100\ \mu\text{m}$ 的器件结构在 $100\ \text{mA}$ 注入电流下的正向电压增加到 $15.8\ \text{V}$. 与此同时,引入 DBR 层也会降低器件的散热水平,阵列电极不仅传输载流子,也是器件热量的输运通道,电极间距 d 增加使得在单位面积上的电极数目减少,热量传输通道数目减少则会造成器件整体温

度的升高. 如图 5(b)所示, $d=100\ \mu\text{m}$ 时,整个器件仅有 4×13 个阵列电极作为散热通道,其器件最高温度在注入相同电流下要明显高于其他 2 种结构. 进一步分析 QW2 水平方向上的载流子辐射复合率(图 5(c)所示),在 $100\ \text{mA}$ 注入电流下,当 $d=100\ \mu\text{m}$ 时,载流子辐射复合率最低值($0.436\times 10^{26}\ \text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)出现在 n 电极对应的正下方量子阱区域,最高值($2.646\times 10^{26}\ \text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)则出现在 p 电极对应的正下方量子阱区域,发光最强与最弱比值近 6.06 倍. 当间距 d 为 40 和 $10\ \mu\text{m}$ 时,发光最强与最弱比值则分别 1.53 倍和 1.06 倍. 上述分析表明电极间距越小,器件电流和发光分布更为均匀,散热能力更强,具有更高的注入效率,即 $d=10\ \mu\text{m}$ 的结构器件注入效率最高.

另一方面,采用介质 DBR+金属复合反射镜后,降低了光子在器件底部的吸收和透射,同时介质 DBR 作为 CBL,增强了光子在 n 电极表面出射几率,提高了器件的 LEE. 阵列电极间距 d 越大,即复合反射镜所占面积比例越高,LEE 越高. 如图 5(d)所示, $d=100\ \mu\text{m}$ 器件结构 LEE 最高能够达到 37.8% , 相比于 $d=40$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 器件结构 LEE 分别为 36.4% 和 29.7% . 结合图 5(a)、(b)可看出,该结构器件的电流分布、温度控制与出光增强之间存在相互竞争关系,



(a) I - V 特性曲线;插图为间距为 $40\ \mu\text{m}$ 的 p 型小面积金属阵列电极平面示意图;(b) 温度随着注入电流变化关系;(c) 在 $100\ \text{mA}$ 注入电流下, QW2 内部的辐射复合率的截面分布图;(d) 器件光提取效率、输出功率与注入电流的关系。

图 5 不同 p 型电极阵列间距 d 的 LED 器件的光电特性关系

Fig 5 The typical electro-optical characteristics of LEDs with various p-contact spacing

只专注单一物理场方面的改善,并不能有效提高器件整体的发光效率,需要在各物理场性能之间进行平衡.从图 5(d) 器件整体输出功率来看,电极间距 $d = 40 \mu\text{m}$ 的器件结构能够较好地平衡各物理场之间关系,实现最佳的光电转换效率.在 20 和 100 mA 注入电流下,其发光功率分别可达 2.74 和 12.3 mW,分别比 $d = 0$ 时提高了 124% 和 127%,比传统垂直结构 UV LEDs 的提高了 204% 和 664%.由此说明,我们所设计的新型 UV LEDs 器件结构——分布式布拉格反射与小面积金属接触复合三维电极结构,可有效地改善器件的散热性能、注入效率和 LEE,最终提高器件的光电转换效率.

3 结 论

本文在全面考虑器件的电流分布、自热效应及出光增强这三种物理场之间耦合关系的基础上,设计了一种新型的 UV LEDs 器件结构——分布式布拉格反射与小面积金属接触复合三维电极结构.该垂直结构器件的特征在于 n 型电极为宽度 $10 \mu\text{m}$ 、间隔 $90 \mu\text{m}$ 的条形金属阵列;p 型则采用直径 Φ 为 $10 \mu\text{m}$ 、间隔为 $40 \mu\text{m}$ 的圆形金属阵列;在 p 型阵列电极之间填充有全方位角反射镜,该反射镜是由 3 个周期的 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ DBR 介质层和 1 层金属 Al 层所构成.通过计算分析表明,该器件结构具有优良的散热性能,较高的注入效率和 LEE.在 20 和 100 mA 注入电流下,其发光功率分别可达 2.74 和 12.3 mW,分别比传统的垂直结构 UV LEDs 提高了 204% 和 664%.

参考文献:

- [1] Nishida T, Saito H, Kobayashi N. Efficient and high-power AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diode grown on bulk GaN[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(6): 711.
- [2] Taniyasu Y, Kasu M, Makimoto T. Aluminum nitride deep-ultraviolet light-emitting diodes[J]. NTT Technical Review, 2006, 4(12): 54-58.
- [3] Nishida T, Saito H, Kobayashi N. Milliwatt operation of AlGaIn-based single-quantum-well light emitting diode in the ultraviolet region[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(25): 3927.
- [4] Würtele M A, Kolbe T, Lipsz M, et al. Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes—UV LEDs—for water disinfection[J]. Water Research, 2011, 45(3): 1481-1489.
- [5] Dobrinsky A, Shatalov M, Gaska R, et al. Physics of visible and UV LED devices[C]// Lester Eastman Conference on High Performance Devices (LEC). New York: IEEE, 2012: 1-4.
- [6] Shur M S, Gaska R. Deep-ultraviolet light-emitting diodes[J]. Electron Devices, IEEE Transactions on, 2010, 57(1): 12-25.
- [7] Piprek J. Semiconductor optoelectronic devices: introduction to physics and simulation[M]. UCSB: Academic Press, 2003.
- [8] Chuang S L, Chang C S. A band-structure model of strained quantum-well wurtzite semiconductors[J]. Semiconductor Science and Technology, 1997, 12(3): 252.
- [9] Chuang S L, Chang C S. $k \cdot p$ method for strained wurtzite semiconductors[J]. Physical Review B, 1996, 54(4): 2491-2504.
- [10] Shapiro S D. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(12): 2192-2193.
- [11] Farahmand M, Garetto C, Bellotti E, et al. Monte Carlo simulation of electron transport in the III-nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries[J]. Electron Devices, IEEE Transactions on, 2001, 48(3): 535-542.
- [12] Yoshida H, Kuwabara M, Yamashita Y, et al. Radiative and nonradiative recombination in an ultraviolet GaN/AlGaIn multiple-quantum-well laser diode[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(21): 211122.
- [13] Ahmad I, Kasisomayajula V, Holtz M, et al. Self-heating study of an AlGaIn/GaN-based heterostructure field-effect transistor using ultraviolet micro-Raman scattering[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(17): 173503.
- [14] Gao N, Lin W, Chen X, et al. Quantum state engineering with ultra-short-period (AlIn)m/(GaIn)n superlattices for narrowband deep-ultraviolet detection[J]. Nanoscale, 2014, 6(24): 14733.
- [15] Kelly M, Ambacher O, Dimitrov R, et al. Optical process for liftoff of group III-nitride films[J]. Physica Status Solidi A, 1997, 159(1): R3-R4.
- [16] Wong W S, Sands T, Cheung N W. Damage-free separation of GaN thin films from sapphire substrates[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(5): 599.
- [17] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 234.
- [18] Schubert E F, Gessmann T, Kim J K. Light emitting diodes[M]. Hoboken: Wiley Online Library, 2005: 86.
- [19] Hu F, Qian K Y, Luo Y. Far-field pattern simulation of flip-chip bonded power light-emitting diodes by a Monte Carlo photon-tracing method[J]. Applied Optics, 2005,

<http://jxmu.xmu.edu.cn>

44(14):2768-2771.

[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(6):630-636.

[20] 邓文渊,李春,金春水. 电子束蒸发和离子束溅射 HfO₂

Design of Vertical AlGa_N-based Ultraviolet LEDs with Distributed Bragg Reflectors-pixed Metal Combined Electrodes

YUAN Zhao-rong, YANG Xu* , LI Jin-chai, LI Shu-ping, ZHOU Ying-hui* , KANG Jun-yong

(Key Lab of Semiconductor Materials and Applications of Fujian Province, School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: AlGa_N-based ultraviolet light-emitting diodes (UV LEDs) enjoy enormous potential for a wide range of applications. However, the efficiency of UV LEDs remains low. In this work, a novel vertical structure with distributed bragg reflectors-pixel metal combined electrodes was designed to improve the performance of ultraviolet LEDs, by utilizing the coupling relationship of multi-physics: current distribution, temperature control, and light extraction. Numerical analysis results indicate that the current distribution, heat dissipation, and light extraction efficiency in such structures are much better than those in the traditional vertical structure UV LED devices. As a result, the output power is expected to be improved by 204% and 664% at the injection current of 20 mA and 100 mA, respectively.

Key words: AlGa_N; UV-LED; vertical structure; multi-physics; finite element method