文章编号：1000-7032(2023)05-0898-06

AlGaN基深紫外LED的NiAu透明电极及其接触特性

王　雪[1*]，刘乃鑫[1,2]，王　兵[1,2]，郭亚楠[1,2]，张晓娜[1]，郭　凯[1]，
李勇强[1]，张　童[1]，闫建昌[1,2]，李晋闽[1,2]

（1. 山西中科潞安紫外光电科技有限公司，山西 长治　046000；
2. 中国科学院半导体研究所 半导体照明技术研究开发中心，北京　100083）

摘要： 在p-AlGaN表面沉积Ni/Au/Ni/Au透明电极体系，通过传输线模型测试，研究了退火温度对Ni/Au/Ni/Au与p-AlGaN材料接触特性的影响。结果表明，AlGaN基深紫外LED采用Ni/Au/Ni/Au金属体系，在600 ℃空气氛围下退火3 min形成p型半导体材料NiO。进一步优化Ni/Au/Ni/Au体系金属厚度，当Ni/Au/Ni/Au各层厚度由20/20/20/20 nm减薄至2/2/5/5 nm，并在600 ℃空气氛围退火3 min，其与p-AlGaN材料的接触电阻率从$3.23\times10^{-1}\ \Omega\cdot cm^2$降到$2.58\times10^{-4}\ \Omega\cdot cm^2$。采用上述优化的Ni/Au/Ni/Au体系制备的深紫外LED器件，器件光电特性得到了改善。在150 mA驱动下工作电压低至5.8 V；通过提升电极透过率，光输出功率提升18.9%。

关　键　词： UV-LED；AlGaN；NiAu；欧姆接触
中图分类号： TN312. 8　　**文献标识码：** A　　**DOI：** 10. 37188/CJL. 20220385

Ohmic Contact Characteristics of AlGaN-based Deep-ultraviolet Light-emitting-diodes with NiAu Transparent Electrode

WANG Xue[1*], LIU Naixin[1,2], WANG Bing[1,2], GUO Yanan[1,2], ZHANG Xiaona[1], GUO Kai[1],
LI Yongqiang[1], ZHANG Tong[1], YAN Jianchang[1,2], LI Jinmin[1,2]

(1. *Advanced Ultraviolet Optoelectronics Co.*, *Ltd.*, *Changzhi* 046000, *China*;
2. *Semiconductor Lighting Technology Research and Development Center*, *Institute of Semiconductors*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100083, *China*)
* *Corresponding Author*, *E-mail*: *wangxue@luan-uv. cn*

Abstract: A Ni/Au/Ni/Au transparent electrode system was deposited on the surface of p-AlGaN, and the effects of annealing temperature on the contact characteristics of Ni/Au/Ni/Au with p-AlGaN were studied by transmission line model. When the AlGaN-based deep ultraviolet LED adopted Ni/Au/Ni/Au metal system, meanwhile annealed at 600 ℃ for 3 min, the results show that p-type semiconductor material NiO can be formed in the contact interface. The metal thickness of Ni/Au/Ni/Au system was further optimized. When the Ni/Au/Ni/Au layers were thinned from 20/20/20/20 nm to 2/2/5/5 nm, with the annealing condition at 600 ℃ for 3 min, the specific contact resistivity decreased from $3.23\times10^{-1}\ \Omega\cdot cm^2$ to $2.58\times10^{-4}\ \Omega\cdot cm^2$. Using the above optimized Ni/Au/Ni/Au system into LED chip process, the photoelectric characteristics of the LED device can be improved drastically. The operating voltage was reduced to 5.8 V at 150 mA, as the increase of the electrode transmittance, the optical output power was increased by 18.9% at the same current.

Key words: UV-LED; AlGaN, NiAu; Ohmic contact

收稿日期： 2022-11-07；**修订日期：** 2022-11-25
基金项目： 山西省重点研发计划(202102030201007)；山西省关键核心技术和共性技术研发攻关(20201102013)
Supported by Shanxi Key RD Program(202102030201007); Key Technology and Generic Technology Research and Development of Shanxi(20201102013)

1　引　言

随着 280 nm 以下波段的深紫外光在水体、固体的杀菌消毒、生物检测和医疗等方面的广泛应用，以第三代氮化物材料制备的小型高效的深紫外发光二极管（LED）进入了人们的视野[1-2]。AlGaN 氮化物半导体是一种直接带隙的宽禁带材料，通过调整 AlGaN 材料中的 Al 组分，可得到在 3.4 ~ 6.1 eV 连续调节的宽禁带材料，其发光波长覆盖范围为 210 ~ 360 nm，因此 AlGaN 氮化物半导体是制备深紫外 LED 的优选材料[3]。由于受到材料激活效率的限制，深紫外 LED 普遍采用 p-GaN 作为空穴提供层，但 GaN 材料对深紫外波段的光存在严重的吸收，深紫外 LED 有源区辐射的光很难通过表面发射出来。因此，采用透明的 p-AlGaN 接触层替换 p-GaN 接触层，这是深紫外 LED 行业一个重要的发展趋势[4]。Takano 等首次报道了采用 p-AlGaN 接触层替代传统的 p-GaN 接触层，减弱向上传播时的光吸收，提高 LED 光输出功率[5]。

制备高导电性的 p-AlGaN 面临以下两个挑战：(1)随着 Al 含量的提高，p-AlGaN 材料的功函数增大。根据金属-半导体接触理论，只有功函数大于 p-AlGaN 材料才能与其形成良好的欧姆接触。(2)p-AlGaN 材料的 Mg 受主离化能高、离化率低，难以实现高空穴浓度[6-7]。针对 AlGaN 材料的欧姆接触特性，国内外许多学者开展了多方面研究。Kim 等利用电击穿的方法，在芯片上形成导电通道，改善金属-半导体之间的接触特性[8]。徐帅等在 Ag/p-GaN 层之间插入一层金属 Ni，采用“牺牲 Ni 处理方法”提高了 Ag/p-GaN 之间的接触性能[9]。王雪等采用 ITO/Al 通过热处理的方式形成透明导电薄膜，优化与 p-GaN 材料间的接触特性，提升芯片光功率[10]。Mallem 等采用 Pd/Al/Au 金属体系在 p-AlGaN 表面形成低欧姆接触[11]。Zhao 等报道了 Ni/Au 体系，采用空气退火与 p-GaN 形成良好的欧姆接触，并对金属体系的高温稳定性进行了研究[12]。Maeda 等系统研究了 Ni/Au 和 Ni/Al 两种金属体系对 AlGaN 基的性能优化情况，结果表明 Ni/Au 金属体系的欧姆接触优于 Ni/Al 金属体系[13]。Hu 等采用电子显微镜和 X 射线光电子能谱，对 p 型 AlGaN/GaN 半导体中低电阻 Ni/Au/Ni/Au 的欧姆接触进行了详细的研究[14]。本公司研发中心对比研究了双层金属 NiAu 和多层复合金属 NiAuNiAu 与 p-AlGaN 之间的接触特性，实验结果表明，在高功函数的 p-AlGaN 表面蒸镀多层复合金属 NiAuNiAu，有利于金属-半导体之间形成欧姆接触。

本文重点研究了低电阻体系 Ni/Au/Ni/Au 与 p-AlGaN 半导体间的接触特性。通过对 Ni/Au/Ni/Au 体系厚度的调整，使得金属-半导体间的接触由肖特基接触优化为欧姆接触，显著改善了金属-半导体间的接触效果。通过减薄体系厚度，明显改善电极体系的透光率，提高了器件光输出功率。

2　实　验

选择(0001)晶面的蓝宝石衬底，采用金属有机化学沉积的方法在蓝宝石衬底上生长一层约 3 μm 左右的 AlN 缓冲层，在 AlN 缓冲层上依次生长约 300 nm 的 AlGaN 缓冲层、2.5 μm Si 掺杂的 n-$Al_{0.6}Ga_{0.4}N$ 层、3 个周期未掺杂的 AlGaN 多量子阱、100 nm 的电子阻挡层和 50 nm Mg 掺杂的 p-$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 层。在 750 ℃氮气氛围中退火 10 min 来激活 p-AlGaN 层中的 Mg 受主，完成外延片的制作。随后采用硫酸双氧水混合试剂在 85 ℃ 水浴条件下清洗外延片，采用丙酮超声清洗去除外延片上的有机杂质。通过标准的芯片制作工艺，采用 ELEDE 380G 感应耦合高密度等离子体刻蚀机，刻蚀得到传输线模型（TLM）台面，采用 EVA-601 高真空蒸发镀膜机，在 p-AlGaN 表面沉积金属 Ni/Au/Ni/Au；然后使用 JetFirst300C 快速退火炉在 550 ~ 650 ℃的条件下对金属快速退火，退火时间为 3 min，退火氛围空气。采用 CS-4 探针台，测量间距为 20 μm 的传输线模型电极间的 *I-V* 曲线，测试条件为 −1 ~ 1 V 范围内的电压扫描。为保证数据准确性，本次实验均在退火后及时测量。采用扫描电子显微镜能谱仪（EDS）观察退火后金属体系的元素变化。

通过标准的芯片制作工艺，制备峰值波长为 275 nm、尺寸为 250 μm× 460 μm 的深紫外 LED，Ti/Al/Ti/Au 作为芯片的 n 电极（850 ℃氮气氛围退火 3 min），Ni/Au/Ni/Au 作为芯片的 p 电极（600 ℃空气氛围退火 3 min），并在接触电极表面蒸镀反射率较高的反射金属 Al（R>85%）电极作为扩展电极，在此基础上制作焊盘电极，完成芯片器件制作。利用电致发光探针测试系统测试深紫外 LED 芯片的工作电压和光输出功率，并获得芯片

的电流-光输出功率和电流-电压特性曲线。芯片截面结构示意图如图1所示。

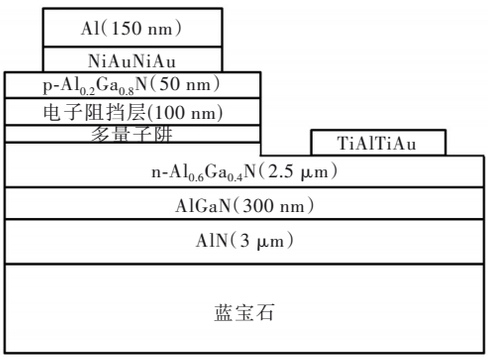

图1 芯片截面示意图

Fig.1 Cross-sectional schematic of chip

3 结果及讨论

实验中使用高真空蒸发镀膜机在p-AlGaN基底上沉积Ni/Au/Ni/Au作为传输线模型电极。Ni/Au/Ni/Au电极的厚度信息如表1所示，退火氛围均为空气。样品1表示Ni/Au/Ni/Au厚度分别为20,20,20,20 nm；样品2表示Ni/Au/Ni/Au厚度分别为5,5,20,20 nm；样品3表示Ni/Au/Ni/Au厚度分别为5,5,10,10 nm；样品4表示Ni/Au/Ni/Au厚度分别为2,2,5,5 nm。

表1 Ni/Au/Ni/Au电极的厚度信息

Tab. 1 The thickness information of Ni/Au/Ni/Au electrodes

样品编号	样品厚度/nm	退火氛围
1	20/20/20/20	Air
2	5/5/20/20	Air
3	5/5/10/10	Air
4	2/2/5/5	Air

图2为样品1经过550,600,650 ℃空气氛围退火后，在-1～1 V电压范围的电流值变化曲线。从图2曲线得出，样品1在空气氛围退火后，电压为1 V时的电流值比未退火的电流值提高一个数量级，可达到12 μA。样品1经过550,600,650 ℃空气氛围退火后，电流值随温度的升高表现出先增加后减小的趋势，退火温度为600 ℃时电流值最佳。但从曲线图形来看，该体系在空气退火后与p-AlGaN之间的接触仍属于肖特基接触，未能形成完美的欧姆接触。

Chen等[15]研究了Ni/Au体系在p-GaN基底上的接触情况，研究表明Ni和O的亲和能大于Au，Ni会向Au表面扩散，与O结合形成p型半导体

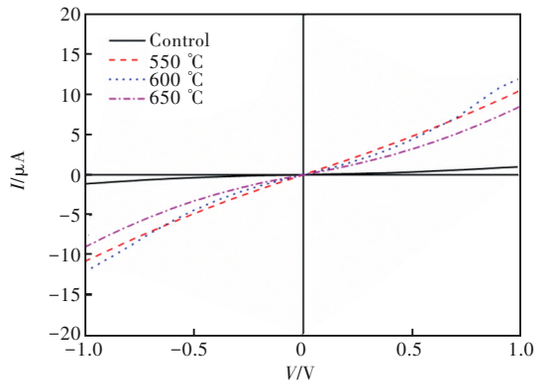

图2 样品1(20/20/20/20 nm)在空气氛围下不同退火条件的*I-V*特征

Fig.2 *I-V* characteristics of sample 1(20/20/20/20 nm) annealed at different temperatures in air

NiO，Au扩散在NiO层之间形成了良好的欧姆接触。由于Ni倾向于通过Au薄膜的缺陷扩散到表面与O_2反应，形成NiO导电膜，提高了金属-半导体之间的欧姆接触。图3是采用EDS分析Ni/Au/Ni/Au体系在600 ℃空气氛围下退火3 min的金属体系侧面元素分布情况。结果表明，在p-AlGaN表面Ni和O结合形成p型半导体NiO，从而改善金属与半导体之间的欧姆接触。图3(c)中顶部O的含量比较多是由于Al扩展电极氧化所致。图4是将多层复合金属第一层金属Ni和第二层金属Au由20/20 nm减薄至5/5 nm，在550,600,650 ℃空气氛围退火后，测量电极间的*I-V*曲线。对比图2和图4曲线得出，同一退火条件下，减薄底层Ni/Au厚度，退火后的电流值增加，电流值随退火温度的升高变化规律未变。

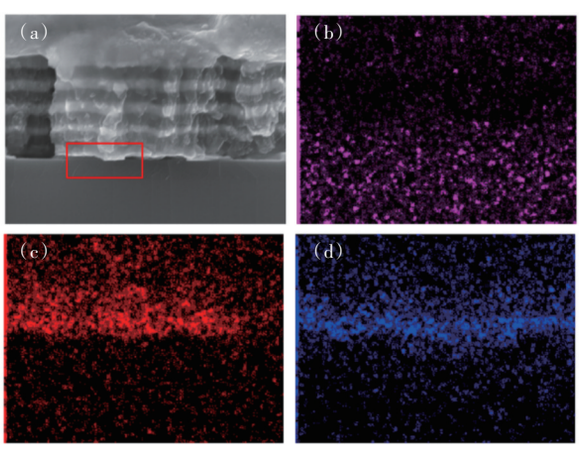

图3 NiAuNiAu体系的EDS图。(a)结构图；(b)Ga；(c)O；(d)Ni。

Fig.3 EDS of the oxidized NiAuNiAu film. (a) Structure chart. (b)Ga mapping. (c)O mapping. (d)Ni mapping.

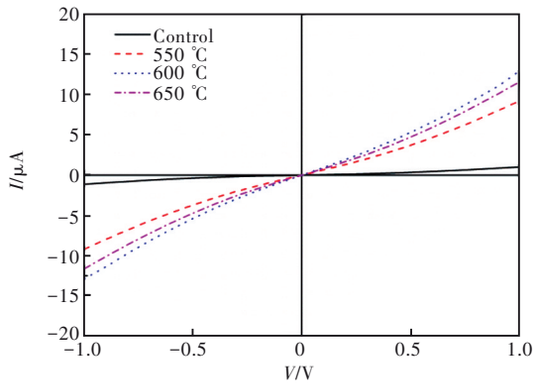

图 4　样品 2(5/5/20/20 nm)在空气氛围下不同退火条件的 *I-V* 特征

Fig.4　*I-V* characteristics of sample 2 (5/5/20/20 nm) annealed at different temperatures in air

图 5 是不同样品在最佳退火温度 600 ℃条件下空气氛围退火得到的 *I-V* 特征。如图 5 所示，随着金属体系的减薄，*I-V* 曲线图形逐渐从曲线变成直线，说明金属-半导体的接触从肖特基接触变成欧姆接触，形成低电阻接触。从图中曲线可以看出，随着 Ni/Au/Ni/Au 体系的减薄，电流值逐渐增大，样品 4(2/2/5/5 nm)在 600 ℃空气氛围下退火电流值达到 15 μA。

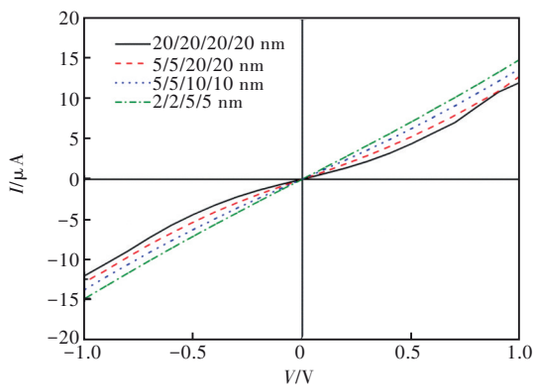

图 5　不同样品在 600 ℃空气氛围下退火得到的 *I-V* 特征

Fig.5　*I-V* characteristics of different samples annealed at 600 ℃ in air

为了更准确地了解各样品与 p-AlGaN 之间的接触情况，从传输线模型中提取出各样品的电阻率和方块电阻，如图 6 所示。图 6 是样品 1 到样品 4 在空气氛围下 600 ℃退火 3 min 后，从传输线模型中提取出的电阻率和方块电阻值。从图 6 中看出，随着 Ni/Au/Ni/Au 体系的减薄，电阻率和方块电阻总体表现为下降的趋势。样品的电阻率从 3.23×10^{-1} Ω·cm² 下降到 2.58×10^{-4} Ω·cm²，降低了 3 个数量级，由此可以看出减薄体系的厚度有利于改善金属-半导体间的欧姆接触。从图 6 中还可以看出各样品之间方块电阻由 2.64×10^{6} Ω/□ 减小到 1.24×10^{6} Ω/□，体系厚度的变化对金属-半导体间的方块电阻影响不大。这是由于合适的退火温度下，p 层材料的 Ga 空位增加，改善了材料表面的载流子浓度，降低了金属-半导体间的欧姆接触。

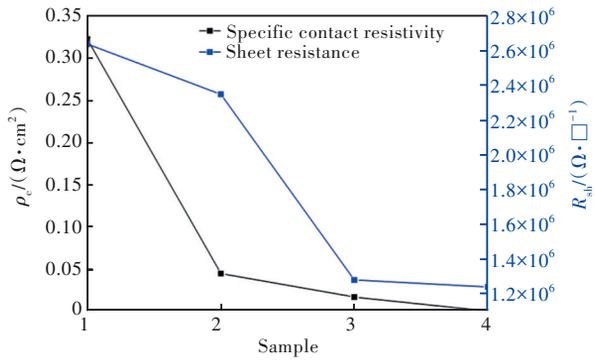

图 6　不同样品的电阻率和方块电阻曲线

Fig.6　Specific contact resistivity (ρ_c) and sheet resistance (R_{sh}) of various samples

Ho[16]曾报道，由于 Kirkendall 效应的存在，Ni/Au 体系在氧气氛围下退火后 Ni 和 O 反应生成透明的 NiO 半导体，同时 Au 原子向 GaN 表面扩散，最终可获得 Au 原子均匀地扩散在 NiO 半导体层中的导电膜。在该理论支撑下，若 Ni/Au/Ni/Au 体系足够薄，可获得透明的薄膜。本文考虑到电极扩展效应，选择 Ni/Au/Ni/Au 体系膜厚为 2/2/5/5 nm 的样品 4 作为电极金属，在空气氛围下退火后可获得半透明金属体系。采用紫外分光光度计对该体系进行透过率测试。结果表明，样品 4 在 270 ~280 nm 深紫外波段的透过率约为 20.3%，曲线如图 7 所示。

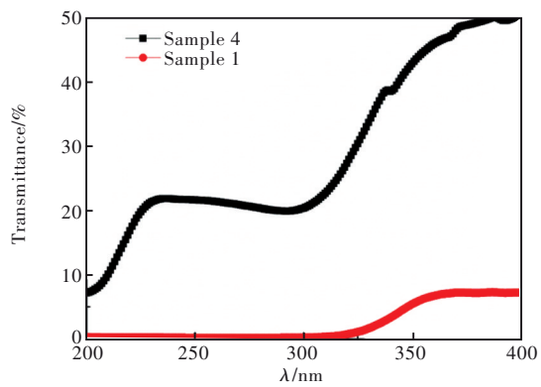

图 7　样品 1(20/20/20/20 nm)和样品 4(2/2/5/5 nm)的透过率曲线

Fig.7　Transmittance curves of sample 1 (20/20/20/20 nm) and sample 4 (2/2/5/5 nm)

本文将样品 1 和样品 4 作为 p-AlGaN 层的接触电极、金属 Al 做为扩展电极，制备峰值波长为 275 nm、尺寸为 250 μm× 460 μm 的深紫外 LED 芯片器件。对比两种芯片器件的电流-光输出功率和电流-电压曲线，数据如图 8 和图 9 所示。结果表明，采用样品 4 制备的半透明电极芯片器件具有更高的透过率，制备的深紫外芯片器件相对于样品 1 制备的芯片器件，在 150 mA 的电流下，光输出功率提升了 18.9%，电压由 6.8 V 降低至 5.8 V。从图中曲线可以看出，在 30 mA 测试条件下，样品 1 和样品 4 的光输出功率相差不大。这一现象是由于在低电流条件下，电流扩展好的接触电极有利于提升芯片器件的光输出功率。随着电流的增大，对于提升芯片器件的光输出功率，反射起主要作用。

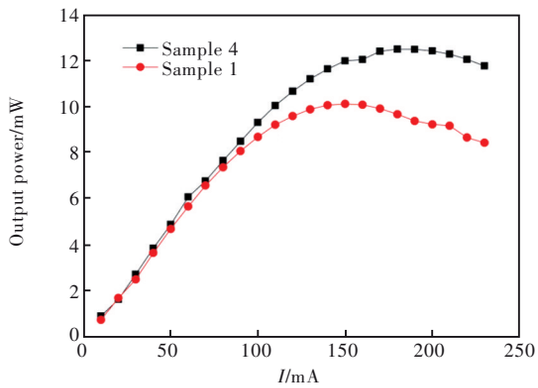

图 8 样品 1(20/20/20/20 nm)和样品 4(2/2/5/5 nm)的电流-光输出功率曲线

Fig.8 Current-output power characteristic curves of sample 1(20/20/20/20 nm) and sample 4(2/2/5/5 nm)

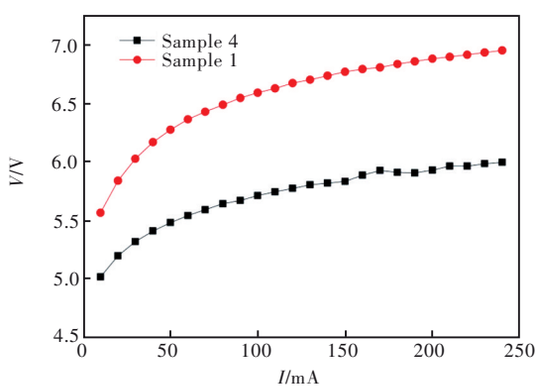

图 9 样品 1(20/20/20/20 nm)和样品 4(2/2/5/5 nm)的电流-电压曲线

Fig.9 Current-voltage characteristic curves of sample 1(20/20/20/20 nm) and sample 4(2/2/5/5 nm)

4 结 论

在 p-AlGaN 表面沉积 Ni/Au/Ni/Au 体系，通过测量间距为 20 μm 的两电极之间的传输线，系统研究了不同 Ni/Au/Ni/Au 体系条件下的欧姆接触情况。结果表明，在空气氛围下退火 3 min，随着 Ni/Au/Ni/Au 体系的金属厚度减薄，金属与 p-AlGaN 半导体间的接触由肖特基接触变为欧姆接触，电阻率由 3.23×10^{-1} Ω·cm^2 下降到 2.58×10^{-4} Ω·cm^2，降低了 3 个数量级，明显改善了金属-半导体间的欧姆接触。采用标准的芯片制作工艺，制备峰值波长为 275 nm、尺寸为 250 μm× 460 μm 的深紫外芯片器件。结果表明，采用样品 4 可获得透过率为 20.3 % 的半透明电极，对比样品 1(20/20/20/20 nm)制备的芯片器件，样品 4(2/2/5/5 nm)制备的芯片器件在 150 mA 的电流下，光输出功率提升了 18.9%，电压由 6.8 V 降低至 5.8 V。该结果与 *I-V* 曲线对应，说明优化样品厚度可得到理想的低电阻欧姆体系。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址：http://cjl. lightpublishing. cn/thesisDetails#10. 37188/CJL. 20220385.

参 考 文 献：

[1] PENG X C, GUO W, XU H Q, *et al*. Significantly boosted external quantum efficiency of AlGaN-based DUV-LED utilizing thermal annealed Ni/Al reflective electrodes [J]. *Appl. Phys. Express*, 2021, 14(7): 072005-1-4.

[2] 蔡钧安，秦志新. 纳米压印制备的光子晶体结构对 AlGaN 基材料深紫外出光效率的提高 [J]. 发光学报, 2014, 35(8): 998-1002.
CAI J A, QIN Z X. Enhancement of Deep-UV light extraction efficiency from bulk AlGaN with photonic crystals fabricated by nanoimprint lithography [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(8): 998-1002. (in Chinese)

[3] 王福学，叶煊超. 量子阱层和垒层具有不同 Al 组分的 270/290/330 nm AlGaN 基深紫外 LED 光电性能 [J]. 发光学报, 2017, 38(1): 57-62.
WANG F X, YE X C. 270/290/330 nm AlGaN-based deep ultraviolet light-emitting diodes with different Al content in quantum wells and barriers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(1): 57-62. (in Chinese)

[4] JO M, MAEDA N, HIRAYAMA H. Enhanced light extraction in 260 nm light-emitting diode with a highly transparent p-AlGaN layer [J]. *Appl. Phys. Express*, 2016, 9(1): 012102-1-3.

[5] TAKANO T, MINO T, SAKAI J, *et al*. Deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency higher than 20% at 275 nm achieved by improving light-extraction efficiency [J]. *Appl. Phys. Express*, 2017, 10(3): 031002.

[6] 祁昌亚，胡正飞，张燕，等. AlGaN紫外探测器p电极的Ni/Au/Ni/Au欧姆接触结构研究 [J]. 红外，2016，37(2)：22-28.
QI C Y, HU Z F, ZHANG Y, *et al*. Research on Ni/Au/Ni/Au Ohmic contact structures of p-AlGaN ultraviolet detector [J]. *Infrared*, 2016, 37(2): 22-28. (in Chinese)

[7] WANG L Y, SONG W D, HU W X, *et al*. Efficiency enhancement of ultraviolet light-emitting diodes with segmentally graded p-type AlGaN layer [J]. *Chin. Phys.* B, 2019, 28(1): 018503-1-6.

[8] KIM K H, LEE T H, SON K R, *et al*. Performance improvements in AlGaN-based ultraviolet light-emitting diodes due to electrical doping effects [J]. *Mater. Des.*, 2018, 153: 94-103.

[9] 徐帅，王光绪，吴小明，等. Ni插入层对Ag/p-GaN界面接触性能的影响机理 [J]. 发光学报，2019，40(7)：865-870.
XU S, WANG G X, WU X M, *et al*. Influence mechanism of Ni interlayer on Ag/p-GaN interfacial contact performance [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(7): 865-870. (in Chinese)

[10] 王雪，崔志勇，王兵，等. ITO/Al复合透明导电薄膜对紫外LED光电性能的提升 [J]. 半导体技术，2020，45(9)：680-684.
WANG X, CUI Z Y, WANG B, *et al*. Improvement of optoelectronic properties of ultraviolet LEDs with ITO/Al composite transparent conductive flims [J]. *Semicond. Technol.*, 2020, 45(9): 680-684. (in Chinese)

[11] MALLEM S P R, AHN W H, LEE J H, *et al*. Influence of thermal annealing on the PdAl/Au metal stack Ohmic contacts to p-AlGaN [J]. *Crystals*, 2020, 10(12): 1091-1-7.

[12] ZHAO S R, MCFAVILEN H, WANG S, *et al*. Temperature dependence and high-temperature stability of the annealed Ni/Au Ohmic contact to *p*-type GaN in air [J]. *J. Electron. Mater.*, 2016, 45(4): 2087-2091.

[13] MAEDA N, JO M, HIRAYAMA H. Improving the efficiency of AlGaN Deep-UV LEDs by using highly reflective Ni/Al p-type electrodes [J]. *Phys. Status Solidi* A, 2017, 215(8): 1700435-1-5.

[14] HU Z F, LI X Y, ZHANG Y. Characteristics of Ni/Au/Ni/Au Ohmic contact in a p-AlGaN/GaN semiconductor [J]. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, 770: 012018-1-9.

[15] CHEN L C, CHEN F R, KAI J J, *et al*. Microstructural investigation of oxidized Ni/Au Ohmic contact to *p*-type GaN [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, 86(7): 3826-3832.

[16] HO J K, JONG C S, CHIU C C, *et al*. Low-resistance Ohmic contacts to *p*-type GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(9): 1275-1277.

王雪(1991-)，女，山西长治人，硕士，工程师，2017年于陕西科技大学获得硕士学位，主要从事芯片设计与开发研究。
E-mail: wangxue@luan-uv.cn