

# 半导体器件原理课程小论文

## 半 导 体 紫 外 发 光 器 件

姓名：吴兰艳

学号:PB16060676

# 半导体紫外发光器件

**摘要** 半导体紫外发光器件具有节能、环保和寿命长等优点，在杀菌消毒、医疗和生化检测等方面有着广泛的应用前景，在国际上引发了广泛的研究兴趣，成为研发热点。随着技术的进步，半导体紫外发光器件在制备方法上得到全面的创新，新型技术不断出现。然而，相比目前已经实现商业化的半导体蓝光器件的功率水平，半导体紫外发光器件的技术尚未成熟，需要更多的研究和创新。因此应该对半导体紫外发光器件进行更加科学的分析，更加全面地掌握制备方法，从而促使技术的进步。本文主要对半导体紫外发光器件进行了调研，了解其工作原理、制备方法及应用前景等。

**关键词** 光学器件；半导体紫外发光器件；AlGaIn 基 LED

## 1 调研背景

在过去的二十多年中，氮化镓（GaN）半导体材料领域取得了一系列根本性突破，GaN 基蓝光和白光 LED 得到了超过任何传统光源的效率，已经在市场全面推广。然而，我们至今还只使用了氮化镓器件所能够产生的发射光谱中很窄的一部分。通过添加氮化铝（AlN）到 GaN 合金体系中，AlGaIn 基 LED 的发光波长可以扩展到几乎整个 UVA（400-320 nm），UVB（320-280 nm），UVC（280-200 nm）光谱范围。200-280 nm 波段为短波紫外线，主要应用有空气和水源的消毒以及短距离的紫外加密通讯、紫外干扰等；280-320 nm 波段为中波紫外线，主要应用在针对皮肤病的紫外光疗及促进植物生长的照明设备；320-400 nm 波段为长波紫外线，有很强的穿透力，能够穿透大部分透明的玻璃和塑料，因此在紫外的应用市场上占有最大份额，主要应用有聚合物的紫外固化和轻量化结构的 3D 打印以及 ID 卡和钞票中安全特征的检测。

相对于传统的 UV 光源，如低、中压汞灯，UV LED 作为固态光源，有着低功耗、低电压、无汞环保、波长易调、切换迅速等优点，这些独特的优势使得 UV LED 作为关键组件用于许多新的应用，可以广泛应用于杀毒、消毒、印刷和通信等领域，并有巨大的产业带动潜能。近年来，UV LED 在全球引起越来越多的关注，国际水俣公约的提出，使 UV LED 的全面应用更加迫在眉睫。因此基于 AlGaIn 材料的紫外发光器件具有重要的研究价值和意义。

## 2 半导体紫外发光器件的研究概况

紫外发光半导体材料最早出现在十九世纪三十年代，法国科学家发现硫化锌荧光粉末进入到油性溶液中就会出现两块电极交流电压的发光情况，从而代替原本的照明，成为新的发光材料。到了上世纪六十年代，美国率先引入了无机半导体材料，并将 CaAsP 材料使用到发光器件中，从而促使紫外半导体发光器件的发展。1998 年，Sandia 实验室首次研制出发

光波长为 353 nm 的紫外发光二极管，2001 年 NTT 研究组研制出第一支发光波长为 340 nm 的 UVA LED，University of South Carolina (USC)研究组研制出第一支发光波长为 305 nm 的 UVB LED 并在第二年研制出第一支发光波长为 280 nm 的 UVC LED，AlGaIn 材料实现了紫外全波段的发光二极管的研制，但是与其他可见光相比，紫外波段的发光效率普遍较低。目前，大量研究小组研制了在紫外光谱范围内的 AlGaIn 基紫外发光二极管，一些公司也已经开始商业化 UVA LED 器件。在 365-400 nm 光谱范围内，许多公司已经开始提供性能卓越的 UV LED。但是，大多数 UVB 和 UVC 发光器件的外量子效率（EQE）仍然在个位数百分比范围内。特别是对于发光波长在 280 nm 左右的紫外发光二极管，美国的 Sensor Electronic Technology(SET)公司报道的世界最高记录只达到 10.4%（在注入电流为 20mA 的条件下，发光波长为 278 nm 的 LED）。另外，大多数 UVB 和 UVC LED 的输出功率只有几毫瓦，寿命往往在一千小时以内，严重限制了其应用。

### 3 半导体紫外发光器件的工作原理及性能参数

发光二极管是基于 pn 结的半导体基电致发光器件。如图 3-1 所示，在电场的作用下，电子和空穴分别从器件的 n 电极和 p 电极注入到有源区，并在有源区内进行辐射复合发光，也就是电场作用下 pn 结发光，即电致发光。电子和空穴分别处于能级的导带和价带中，因此电子需要落到较低的能级才能与空穴结合，并通过发射光子来释放能量。发光波长的峰值对应有源区材料的带隙能量，即出射光的颜色取决于 pn 结所用材料的带隙能量。

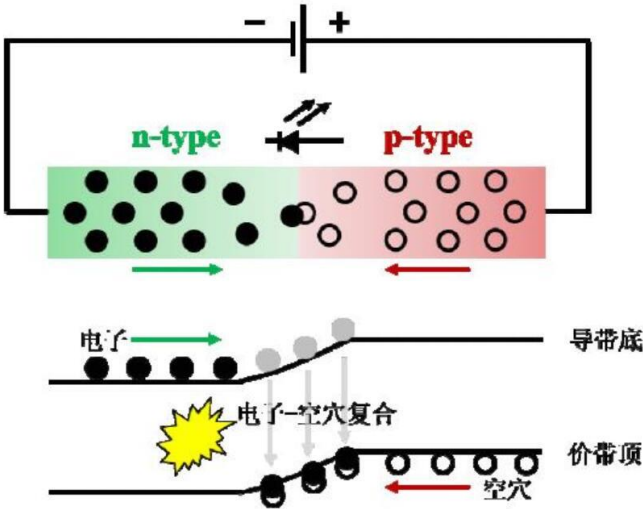


图 3-1 发光二极管的工作原理

用于表征 LED 发光性能的参数如下：

- (1) 内量子效率 (IQE)：从 LED 有源区通过辐射复合过程发射出的光子数与注入

到 LED 有源区中电子空穴对数的比值。

$$\eta_{IQE} = \frac{P_{int}/h\nu}{I/e}$$

其中 $P_{int}$ 为从有源区发出的光功率， $I$ 为注入电流。此外，内量子效率还可以表示为载流子辐射复合速率与总复合速率的比值：

$$\eta_{IQE} = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}} = \frac{\tau_r}{\tau_r + \tau_{nr}}$$

其中， $R_r$ 和 $R_{nr}$ 分别为辐射复合和非辐射复合速率， $\tau_r$ 和 $\tau_{nr}$ 分别为辐射复合和非辐射复合寿命。

- (2) 光提取效率 (LEE)：发射到自由空间的光子数与从有源区发出的光子数的比值，表示光子从 LED 器件逃逸到空气中的因子。

$$\eta_{LEE} = \frac{P_{out}/h\nu}{P_{int}/h\nu}$$

其中 $P_{out}$ 为发射到自由空间的光功率。

- (3) 载流子注入效率 (CIE)：表示注入到有源区中的电子空穴对数与施加在 LED 器件的电子空穴对数的比值。
- (4) 外量子效率 (EQE)：表示从 LED 器件逃逸到空气中的光子数与注入 LED 的载流子数的比值；也是内量子效率、光提取效率和载流子注入效率的乘积。

$$\eta_{EQE} = \frac{P_{out}/h\nu}{I/e}$$

- (5) 插座效率或能量效率 (WPE)：表示 LED 光输出功率与电输入功率的比值。WPE 包含了以上所有的效率因子。

$$WPE = \frac{P_{out}}{IV}$$

其中 $P_{out}$ 为 LED 的光输出功率， $I$ 和  $V$  分别为施加在 LED 上电流和电压。

#### 4 半导体紫外发光器件的制备原理

图 4-1 是使用 AlN 缓冲层的深紫外 LED 的典型外延结构图。

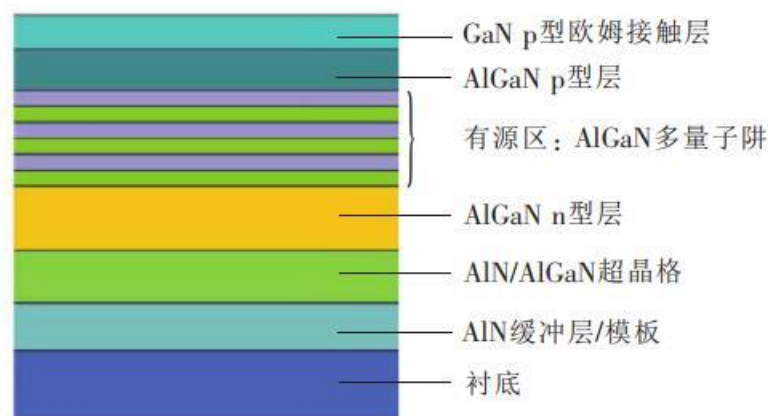


图 4-1 使用 AlN 缓冲层的深紫外 LED 的典型外延结构图

目前大多数 AlGaIn 基紫外发光二极管异质结结构都采用金属有机化合物气相淀积（MOCVD）技术生长，把三甲基或三乙基的烷基化合物的饱和蒸汽和 V 族元素的氢化物作为原材料，硅和镁分别作为 n 型和 p 型掺杂剂，以氢气或氮气作为载气，利用热分解反应在蓝宝石衬底上进行气相外延来生长晶体。电绝缘的蓝宝石衬底有利于 n 型 AlGaIn 电流扩展层实现均匀的横向电流扩散。在 AlN 基底层与 AlGaIn 电流扩展层之间插入一层  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 < x < 1$ ) 能够减少晶格失配带来的位错，达到调整应力的目的。

有源区一般由  $(n+1)$  个 AlGaIn 量子垒和  $n$  个 AlGaIn 量子阱间隔排列，发光二极管的发光波长主要取决于量子阱的铝组分。此外，由于阱或垒的厚度、高度变化都能影响有源区内电子和空穴的分布，因此也会对发光波长产生影响。另外，紫外发光二极管生长在纤锌矿晶体的 +C 极性面，这导致 AlGaIn 异质结界面处存在较强的极化电荷，因此在量子阱中产生极化电场，继而发光波长红移，这个过程叫做量子限制斯塔克效应。极化场的强度在很大程度上取决于有源区的应变状态及量子阱、量子垒之间的铝组分差异。

引用 p 型 AlGaIn 层是为了阻止电子从有源区泄露，同时促进空穴注入有源区。也可以利用 p 型 AlGaIn 层中的铝组分的变化，达到极化掺杂的目的来增强空穴注入。

## 5 一种半导体紫外发光器件的制备方法

图 5-1 为此 AlGaIn 基半导体紫外器件的结构示意图。其外延结构包括依次设置的衬底 1、AlN 缓冲层 2、n 型 AlGaIn 层 3、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  发光有源区 4、最后一个 AlGaIn 量子垒层 5、p 型 AlGaIn 电子阻挡层 6、p 型 AlGaIn 层 7 和接触层 8，其中  $0.01 \leq x < y \leq 1$ 。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  发光有源区包含： $N$  个量子阱层与  $N$  个 AlGaIn 量子垒层，其中  $2 \leq N \leq 20$ ；其中， $N$  个量子阱层与  $N$  个 AlGaIn 量子垒层中铝组分恒定不变，且  $N$  个量子阱层与  $N$  个

AlGa<sub>x</sub>N 量子垒层交替设置；使得第一个 AlGa<sub>x</sub>N 量子垒层靠近 n 型 AlGa<sub>x</sub>N 层设置， 最后一个量子阱层靠近最后一个 AlGa<sub>x</sub>N 量子垒层设置。其中， 最后一个 AlGa<sub>x</sub>N 量子垒层中掺杂有 Mg， 最高的铝组分数值小于或者等于 p 型 AlGa<sub>x</sub>N 电子阻挡层中的铝组分数值， 其最低铝组分数值大于量子阱层中铝组分数值。

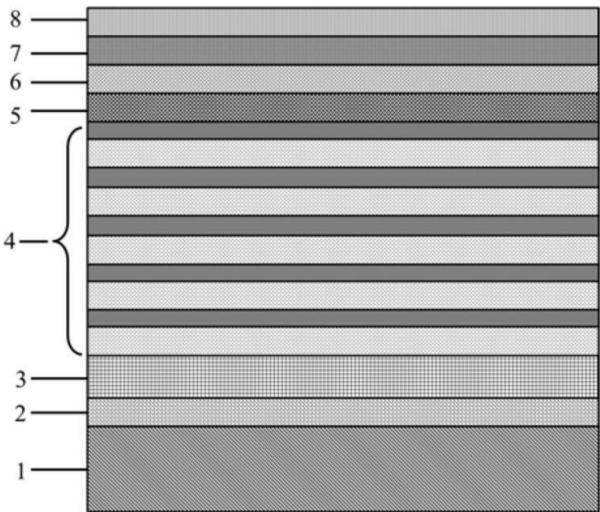


图 5-1 此 AlGa<sub>x</sub>N 基半导体紫外器件的结构示意图

其中，衬底 1 是蓝宝石衬底，也可以是 GaN、6H-SiC、4H-SiC、Si、AlN 衬底或者溅射了 AlN 的蓝宝石衬底。

AlN 缓冲层 2 是由依次生长的低温 AlN 成核层和高温 AlN 模板层组成，生长压力均在 50~200 mbar 之间。其低温 AlN 成核层生长温度在 800~1000℃之间，最优温度在 950℃附近，厚度在 15~200 nm 之间，最好控制在 20 nm；其后生长的 AlN 模板层生长温度在 1150~1300℃，最优温度在 1250℃，厚度为 500~5000 nm，最优厚度为 2000 nm。

n 型 AlGa<sub>x</sub>N 层 3 中铝组分在 0.4~0.6 之间，最好控制在 0.55 左右；掺杂的施主杂质是硅，硅掺杂浓度在 1E17~1E20/cm<sup>3</sup> 之间；生长温度范围在 1100~1200℃，最优温度为 1150℃；生长压力在 50~200 mbar 之间，最优的压力为 150 mbar。n 型 AlGa<sub>x</sub>N 层 3 的厚度范围在 500~5000 nm，最优的厚度为 2000 nm。

Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N / Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N 发光有源区 4 为五个周期结构，每一周期包括量子垒层和量子阱层，该发光有源区的最后一层是量子阱层 401；量子垒层和量子阱层 401 都采用 AlGa<sub>x</sub>N 材料，量子垒层中铝组分高于量子阱层中铝组分，量子垒层中铝组分范围为 0.4~0.6，优选 0.5，量子阱层中铝组分范围为 0.3~0.4，优选 0.37。量子阱层厚度 1.5~10 nm，优选 1.5~3 nm，量子垒层厚度 4~20 nm，优选 8~12 nm。量子阱层不掺杂；量子垒层可以掺杂也可以不掺杂，优选是掺杂一定量的 Si 受主，Si 掺杂浓度为 1E17~1E20/cm<sup>3</sup>。Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N / Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N 发光有

源区 4 的生长温度都控制在 1000~1200℃之间，最优值为 1100℃，生长压力在 50~200 mbar 之间，最优的压力为 150 mbar。

图 4 为最后一个铝镓氮量子垒层结构设计，铝组分沿着生长方向上线性递减，在接触最后一个量子阱 401 时最大，在接触电子阻挡层 6 时最小，优选最大铝组分值等于电子阻挡层 6 中的铝组分，最小铝组分值等于前 5 个量子垒中的铝组分。将生长温度调节至 1000℃~1200℃之间，最优值为 1100℃，生长压力在 50~200 mbar 之间，最优的腔内压力为 150 mbar。通入 Al 源和 Ga 源，使 Ga 源的气流流量恒定而 Al 源的气流流量随生长时间逐渐变小，也可以使 Al 源的气流流量恒定而 Ga 源的气流流量随生长时间逐渐变大，还可以使 Al 源和 Ga 源的气流流量比值随生长时间逐渐变小，生长出 5~100 nm 厚的 Al 组分渐变最后一个量子垒层。该层掺杂少量的 Mg 受主，Mg 掺杂浓度小于  $1\text{E}18/\text{cm}^3$ 。

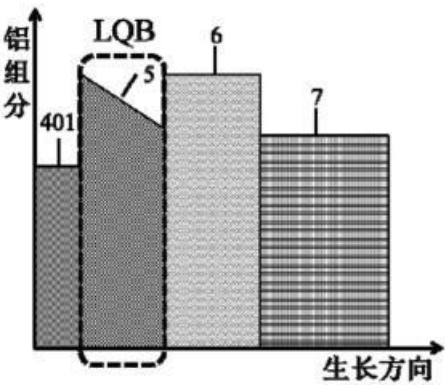


图 4 最后一个铝镓氮量子垒层结构设计

p 型 AlGa<sub>N</sub> 电子阻挡层 6，掺杂杂质为 Mg，掺杂浓度为  $1\text{E}18\sim5\text{E}20/\text{cm}^3$ ，其厚度是 10~200 nm，优选 50~80 nm；生长温度在 850~1000℃之间，960℃为最优的生长温度，生长压力在 50~200 mbar 之间，最优的压力为 150 mbar。

接触层 8 制作在 p 型 AlGa<sub>N</sub> 电子阻挡层 6 上；p 型接触层 7 可以是 p-GaN，也可以是低铝组分的 p-AlGa<sub>N</sub>，掺杂 Mg 为主，Mg 掺杂浓度以能够提供尽量多空穴同时不会导致材料质量显著劣化为限，Mg 掺杂浓度为  $1\text{E}18\sim1\text{E}20/\text{cm}^3$ ，该层厚度 10~200 nm，该层优选厚度是 50~100 nm。

本结构的 AlGa<sub>N</sub> 基半导体紫外具有以下优势：

- a) 可以消除 LQB/EBL 界面的极化电荷，从而消除 LQB/EBL 界面的电子集聚，该界面集聚的电子无益于发光；
- b) Al 组分递减 LQB 层中会自发形成负的体极化电荷，这些体极化电荷会导致

LQB/EBL 界面附近导带升高，能够增强电子阻挡效果，减少电子泄漏；

- c) Al 组分递减的 LQB 层中会自发形成负的体极化电荷能够诱导出很高的空穴浓度；
- d) Al 组分递减的 LQB 层中会导致 EBL / p-AlGa<sub>N</sub> 界面附近导带拉平，降低 EBL 中价带处的空穴势垒，可改善空穴输运。总之，电子阻挡效果的提高以及空穴注入的改善能有效降低电子泄漏从而提高器件发光效率，大大提高其输出光功率。

综上所述，优点在于：优化 AlGa<sub>N</sub> 基半导体紫外器件的能带结构，在最后一个 AlGa<sub>N</sub> 量子垒层中采用渐变的铝组分来提升 LQB / EBL 区的电子势垒高度，并降低 LQB / EBL 区的空穴势垒高度，从而能有效地增加电子限制效果、增强空穴注入效率，提高发光器件的发光效率，尤其对高注入下 AlGa<sub>N</sub> 基半导体紫外发光器件更为有效。

## 6 半导体紫外发光器件的最新进展

2017 年，日本信息通信研究机构的 S. I. Inoue 等人报道了 AlGa<sub>N</sub> 基深紫外 LED (DUV LED, deep ultraviolet light-emitting diode) 在波长 265 nm、输出功率大于 15 mW 下，采用大面积纳米图形结构制作 LED，使光提取效率提高了 3 倍，可满足实用化需求，为 AlGa<sub>N</sub> 基 DUV LED 大规模应用奠定了基础。

2018 年，美国威斯康星大学麦迪逊分校的 D. Liu 等人报道了一种在 AlN 本体单晶衬底上使用 p 型 Si 增强空穴注入 400 nm 厚的 AlN 同质外延 229 nm UV LED，氮化物异质结构使用金属有机化学气相外延 (MOVPE) 法淀积，76 A/cm<sup>2</sup> 电流连续波工作状态下 AlN / Al<sub>0.77</sub>Ga<sub>0.23</sub>N 多量子阱 LED 未出现效率下降，实现了本体衬底固有的低位错密度特性，证实了该结构是实现 UVC LED 的有效方法。

2018 年，德国的 N. Susilo 等人报道了一种采用 MOVPE 法生长在溅射和高温退火 AlN /蓝宝石衬底上的 AlGa<sub>N</sub> 基 DUV LED，这种 350 nm 结构与常规 ELO AlN /蓝宝石相比，具有相似的缺陷密度、输出功率特性和外部量子效率，但曲率 ( $-80 \text{ km}^{-1}$ ) 比 ELO 结构低 1 倍，且降低了复杂性和成本。

2018 年，中国科学院半导体研究所的 L. Zhao 等人推出了一种在溅射淀积 AlN 模板上制作的 AlGa<sub>N</sub> 基 UV LED，把外延 AlN / AlGa<sub>N</sub> 超晶格结构插入 LED 结构和 AlN 模板之间以降低位错密度，这种 282 nm LED 的光输出效率在 20 mA 时达到 0.28 mW，外部量子效率为 0.32%。

最近，中国科学院半导体研究所照明研发中心与北京大学纳米化学研究中心、北京石墨烯研究院刘忠范团队合作，开发出了石墨烯/蓝宝石新型外延衬底，并提出了等离子体预处



理改性石墨烯，促进 AlN 薄膜生长实现深紫外 LED 的新策略。通过 DFT 计算发现，等离子体预处理向石墨烯中引入的吡咯氮，可以有效促进 AlN 薄膜的成核生长。在较短的时间内即可获得高品质 AlN 薄膜，其具有低应力、较低的位错密度，深紫外 LED 器件表现出了良好的器件性能。

同时，魏同波与刘忠范团队合作提出了石墨烯/NPSS 纳米图形衬底外延 AlN 的生长模型，理论计算和实验验证了石墨烯表面金属原子迁移增强规律，石墨烯使 NPSS 上 AlN 的合并时间缩短三分之二，同时深紫外 LED 功率得到明显提高，使深紫外光源有望成为石墨烯产业化的一个突破口。

此外，针对深紫外发光器件中 p 型掺杂国际技术难题，刘志强提出了缺陷共振态 p 型掺杂新机制，该方法基于能带调控，获得高效受主离化率的同时，维持了较高的空穴迁移率，实现了  $0.16\ \Omega\cdot\text{cm}$  的 p 型氮化镓电导率，为后续石墨烯在深紫外器件透明电极中的应用奠定基础。

## 7 半导体紫外发光器件的发展前景

UVLED 在杀菌消毒、聚合物固化、生化探测、非视距通讯等许多领域具有广阔的应用前景和巨大的市场价值。UVC LED 光源通过破坏微生物的 DNA 和 RNA 阻止其繁殖，可以实现高效快速的广谱杀菌效果，从而对水、空气和物体表面进行杀菌消毒。在医疗应用中，通过精准控制紫外光的波长和脉冲时间（纳秒量级），可以有效破坏杀灭病变细胞，这为皮肤病和一些难治的疾病提供了一种新型的优良解决方案。紫外光的固化作用在日常生活和工业生产中应用广泛，具有光敏特性的油墨、颜料、粘合剂、涂层等材料，在紫外光照射下的聚合化并硬化，打印出多彩的海报，或形成家具的油漆保护层。在生化分析中，大多数的生物分子含有的化学键在紫外光波段（270-350 nm）有很强的光学共振，小型高效的紫外光源可以为生物探测和光电子学之间提供桥梁，使生物光子学的应用成为可能，例如基于荧光的 bioagent 识别等；光学检测也是研究蛋白质结构极为有效的方法，光学激发色氨酸和酪氨酸这两种极为重要的氨基酸则需要 280 nm 紫外光源。在特定的环境下，光通讯要求光以非直线形式传播，又因为保密的原因而要求通讯限制在短距离，根据瑞利散射原理，波长越短散射越强，另外一方面，波长越短在空气中被吸收越强，深紫外 LED 光源可以作为非视距保密光通讯的理想媒介。

半导体紫外发光器件是技术的创新，产业化技术应用及其巨大的市场潜力正在形成，对半导体紫外发光器件的研究具有重大而深远的意义。

## 参考文献

- [1] I. Akasaki, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki, High efficiency blue LED utilizing GaN film with AlN buffer layer grown by MOVPE. in Proceedings of 14th International Symposium on Gallium Arsenide and Related Compounds 1987, pp. 633–636 (1988).
- [2] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, High-power GaN p-n junction blue-light-emitting diodes. Jpn. J. Appl. Phys. 30, L1998–L2001 (1991).
- [3] S. Nakamura, M. Senoh, T. Mukai, p-GaN/n-InGaN/n-GaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes. Jpn. J. Appl. Phys. 32, L8–L11 (1993).
- [4] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes. Appl. Phys. Lett. 64, 1687–1689 (1994).
- [5] A. Fujioka, K. Asada, H. Yamada, T. Ohtsuka, T. Ogawa, T. Kosugi, D. Kishikawa, T. Mukai, High-output-power 255/280/310 nm deep ultraviolet light-emitting diodes and their lifetime characteristics. Semicond. Sci. Technol. 29, 084005 (2014).
- [6] Information on low and medium pressure mercury lamps. Retrieved 5 Oct 2015, [www.heraeus-noblelight.com](http://www.heraeus-noblelight.com).
- [7] G.Y. Lui, D. Roser, R. Corkish, N. Ashbolt, P. Jagals, R. Stuetz, Photovoltaic powered ultraviolet and visible light-emitting diodes for sustainable point-of-use disinfection of drinking waters. Sci. Total Environ. 493, 185 (2014).
- [8] Hockberger P E. A history of ultraviolet photobiology for humans, animals and microorganisms[J]. Photochemistry & Photobiology, 2002, 76(6):561–579.
- [9] Vilhunen S, Särkkä H, Sillanpää M. Ultraviolet light-emitting diodes in water disinfection[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2009, 16(4):439.
- [10] Würtele M A, Kolbe T, Lipsz M, etc. Application of Ga N-based ultraviolet-C light emitting diodes UV LEDs for water disinfection[J]. Water Research, 2011, 45(3):1481-1489.
- [11] Nishida T, Kobayashi N, Ban T. Ga N-free transparent ultraviolet light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(1):1-3.
- [12] Kneissl M, Yang Z, Teepe M, etc. Ultraviolet In Al Ga N light-emitting diodes grown on hydride vapor phase epitaxy Al Ga N/sapphire templates[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(5):3905-3908.
- [13] 王军喜, 闫建昌, 郭亚楠等. 氮化物深紫外 LED 研究新进展 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45 (6):067303-1-067303-20.
- [14] Ban K, Yamamoto J, Takeda K, etc. Internal quantum efficiency of whole-composition-range Al Ga N multiquantum wells[J]. Applied Physics Express, 2011, 4(5):052101.
- [15] Iga K, Wakao K, Kunikane T. Mode reflectivity of tilted mirrors in semiconductor lasers with etched facets [J]. Applied Optics, 1981, 20(14): 2367-71.
- [16] Iga K, Miller B. Chemically etched-mirror GaInAsP/InP lasers - Review [J]. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, 1982, 18(1): 22-9.
- [17] Stocker D, Schubert E, Grieshaber W, et al. Facet roughness analysis for InGaN/GaN lasers with cleaved facets [J]. Applied Physics Letters, 1998, 73(14): 1925-7.
- [18] Böttcher T, Zellweger C, Figge S, et al. Realization of a GaN laser diode with wet etched facets [J]. Physical Status Solidi A, 2002, 191(1): R3-R5.

- [19] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, etc. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an Al N buffer layer[J]. Applied Physics Letters,1986, 48(5):353-355.
- [20] Hardy M T, Holder C O, Feezell D F, et al. Indium-tin-oxide clad blue and true green semipolar InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> laser diodes [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(8): 081103-4.
- [21] Chyi J-I, Chua C, Yang Z, et al. InAlGa<sub>N</sub> optical emitters: laser diodes with nonepitaxial cladding layers and ultraviolet light-emitting diodes [J]. Proc of SPIE, 2011,7939(793918-1-7.
- [22] LIU D, CHO S J, PA R K J, et al. 229 nm UV LEDs on aluminum nitride single crystal substrates using p-type silicon for increased hole injection [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112 (8): 081101-1-081101-4 .
- [23] SUSILO N, HAGEDORN S, JAEGER D, et al. AlGa<sub>N</sub>based deep UV LEDs grown on sputtered and high temperature annealed AlN /sapphire [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112: 041110-1-041110-5.
- [24] ZHAO L, ZHANG S, ZHANG Y, et al. AlGa<sub>N</sub>-based ultraviolet light-emitting diodes on sputter-deposited AlN templates with epitaxial AlN /AlGa<sub>N</sub> superlattices[J]. Superlattices and Microstructures, 2018, 113: 713-719.
- [25] ZHAOLONG C, ZHIQIANG L, at al. Improved Epitaxy of AlN Film for Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes Enabled by Graphene [J]. Adv. Mater., 10.1002/adma. 201807345.
- [26] TONGBO W, et al. New AlN film growth conditions enhance emission of deep ultraviolet LEDs [J]. Appl. Phys. Lett. 114, 091107 (2019).
- [27] ZHIQIANG L et al. Semicond. Sci. Technol. 33, 114004 (2018) .
- [28] 贺龙飞, 陈志涛, 赵维, 张康, 吴华龙, 何晨光. 一种提高光效的 AlGa<sub>N</sub> 基半导体紫外器件及其制备方法:中国. 108231960 A[P]. 2018.06.29.