

引用格式: WANG Yukun, ZHENG Zhongming, LONG Hao, et al. Development and Challenges of Nitride Vertical-cavity Surface-emitting Lasers (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2):0251203

王玉坤, 郑重明, 龙浩, 等. 氮化物垂直腔面发射激光器的发展与挑战(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(2):0251203

氮化物垂直腔面发射激光器的发展与挑战(特邀)

王玉坤, 郑重明, 龙浩, 梅洋, 张保平

(厦门大学 电子科学与技术学院(国家示范性微电子学院), 厦门 361005)

摘 要:垂直腔面发射激光器凭借阈值低、发散角小、调制速率高以及输出光束呈圆斑对称等特点, 迅速成为当下半导体激光器的研究热点。氮化镓(GaN)材料是制造紫外到绿光波段光电子器件的理想材料, 经过四十余年的研究, 蓝光和绿光LED在照明、显示等领域得到广泛应用。技术含量更高的激光器件也已进入了应用的快车道, 即将覆盖照明、通信、投影显示、光存储、医疗、微型原子钟及传感器等场景。铝镓氮(AlGaN)是GaN基半导体材料的重要代表之一, 其禁带宽度可在3.4 eV(GaN)到6.2 eV(AIN)范围内连续可调, 对应波长可覆盖200~365 nm波段, 是制造从近紫外波段到深紫外波段紫外垂直腔面发射激光器的理想材料。而铝镓氮(AlGaN)垂直腔面发射激光器经过近20年来的发展, 如今已成为半导体激光器的研究热点之一。首先回顾了GaN基垂直腔面发射激光器的发展历史, 简要介绍了其在各个波段的主要应用场景; 然后介绍蓝光、绿光及紫外垂直腔面发射激光器的研究进展; 最后分析了光注入和电注入紫外垂直腔面发射激光器发展过程中的挑战和困难, 并介绍了改进和优化的策略。

关键词:半导体器件与技术; 垂直腔面发射激光器; 氮化物; 紫外; 光电子器件; 激光器; AlGaN

中图分类号: TN365

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225102.0251203

0 引言

半导体激光器有多种结构, 例如分布反馈式激光器(Distributed Feedback Laser Diode, DFB-LD)、边发射激光器(Edge-emitting Laser, EEL)和垂直腔面发射激光器(Vertical-cavity Surface-emitting Laser, VCSEL)等。其中, VCSEL可以依托其垂直腔的特点制备成二维阵列, 进行大尺寸二维集成, 并且拥有圆形远场光斑、单纵模输出、低功耗、圆片测试等优点。

VCSEL在半导体激光器历史中发展虽较晚, 但其研究已超过40年。1977年, 东京工业大学的伊贺健一等第一次提出了VCSEL的构想^[1-2]。这种结构是一种上下法布里-珀罗腔(F-P), 两片反射镜夹着中间的有源层。典型的制作方法是在蓝宝石衬底上外延制备下分布布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR), 接着制备相应量子阱等有源层结构, 之后再制备上DBR。电泵VCSEL器件则还要额外制备上电极和底电极等结构。最初的VCSEL主要基于砷磷化物(如: GaInAsP)材料体系制备。通过氧化有源区边缘的砷化物来形成电流和光学限制层, 从而实现对腔内光场和电流的局域化。

与传统的边发射激光器相比, VCSEL有如下优点: 1) 圆形光斑, 易与光纤耦合; 2) 同一基底上能够同时制作多个器件, 从而实现二维集成, 降低成本, 提升效率^[3-4]; 3) 谐振腔长度为微米量级, 与波长接近, 纵模间距较大, 器件容易实现单纵模工作, 动态单模性较好, 拥有较大的弛豫振荡频率^[3]; 4) 制备过程中无需解理外延片形成谐振腔, 腔长可通过外延精确控制, 激光波长重复性高。

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2017YFE0131500), 国家自然科学基金(No. 62174140), 福建省自然科学基金(No. 2019J05023), 厦门市青创基金(No. 3502Z20206055)

第一作者: 王玉坤(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为深紫外LED及VCSEL。Email: wangyukun@stu.xmu.edu.cn

通讯作者: 龙浩(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为半导体光电子学、发光二极管、半导体可见光激光器。Email: longhao@xmu.edu.cn

张保平(1963—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为宽禁带半导体材料与光电子器件, 微纳结构制造及应用。Email: bzhang@xmu.edu.cn

收稿日期: 2021-10-27; **录用日期:** 2021-11-18

<http://www.photon.ac.cn>

1979年,在提出 VCSEL 概念两年后,伊贺健一便在 77 K 温度下实现了第一支电注入 GaInAsP/InP VCSEL 的脉冲激励^[5];1987年其又在 77 K 实现了 GaAs/AlGaAs VCSEL 的脉冲激励^[6];1989年实现了室温下 GaAs/AlGaAs VCSEL 的连续激励^[7],阈值电流小于 10 mA。相较于红外及红光 GaAs 基 VCSEL 的迅速发展,具有更优越特性的 GaN 可见光 VCSEL 仍处于实验室研究阶段,发展缓慢^[8]。这主要源于高质量 GaN 薄膜生长及器件工艺的困难^[9]。1989年,AMANO H 等在 Mg 掺杂 GaN 中引入电子束辐射,首次成功实现了稳定的 p-GaN 薄膜^[10]。1991年,NAKAMURA S 等采用热退火方法解决了 GaN 中 p 掺杂的问题,并阐明其机理^[11]。而第一支 GaN VCSEL 是在 1996 年由 REDWING J M 等^[12]报道的具有全外延结构的光泵浦 GaN VCSEL,阈值泵浦能量高达 2.0 MW/cm²。

红光以及红外波段 VCSEL 主要使用 GaAs 材料体系,其中 650 nm、850 nm、980 nm 波段主要应用在短距离光通信中,1.3 μm 和 1.55 μm 波段主要应用在长距离光纤通信中。此外,GaAs VCSEL 在传感、医疗、红外照明、激光雷达、原子钟等方面也有着广泛的应用。与 GaAs VCSEL 相比,GaN VCSEL 的发光波长集中于紫外与可见光波段。可以应用于半导体激光照明、可见光通信、激光投影显示、高密度光存储、生物医疗、微型原子钟及传感器等方面^[13]。

由于 VCSEL 出光方向与外延片表面垂直,集成为高密度二维阵列时,能够提供比单管边发射激光器更大的发光功率,因此,可见光波段的 GaN VCSEL 适用于需要高准直性光源的应用场合,如:剧院、博物馆、温室、汽车车灯、飞机头灯等情景照明。在可见光通信方面,黄绿光 GaN VCSEL 可应用于短距离塑料光纤通信^[14]和对海探测以及水下光通信领域^[15]。在显示方面,GaN VCSEL 可以完整覆盖红绿蓝三基色,同时其光束又有较好的方向性及准直性,可应用于激光电视、家庭影院、汽车或飞机挡风玻璃投影等领域。另外,GaN VCSEL 的小体积以及低功耗在移动穿戴设备中的微投影仪和视网膜投影技术等方面也将发挥重要的作用。

GaN 基紫外 LED 已经在紫外固化、皮肤治疗、净化水源、杀菌消毒、疫情防治、生化检测、紫外通信等方面被广泛应用^[16]。VCSEL 相比于 LED 具有体积更小、相干性好、光束集中等优点,紫外 VCSEL 也将有更大的应用前景。

UVA 波段(320~400 nm)一般应用于紫外固化^[16]。例如:显示屏、电子医疗、仪表等行业的 UV 胶黏剂固化;建材、家具、家电、汽车等行业的 UV 涂料固化;印刷、包装等行业的 UV 油墨固化;微电子行业的元件装配 UV 固化等。代表波长为 395 nm 和 365 nm。目前常见的紫外固化光源为汞灯和紫外 LED,若采用 UV VCSEL 代替 UV LED 和汞灯,则具有体积更小、功率密度高、单色性好,可设置最合适波长等优势。

UVB 波段(280~320 nm)主要应用在医学(294~310 nm)和农业生产(310 nm)两个方面^[16]。在医学方面,可以用于皮肤病治疗(310 nm)、癌症治疗(310 nm)、健康保健、免疫治疗(310 nm)、维生素 D₃ 促进生成(294~304 nm)、生化试剂检测、荧光检测以及蛋白质、DNA 和细菌识别等^[17]。其中皮肤病治疗的主要原理是利用 310 nm 紫外线对皮肤的黑斑效应,加速皮肤新陈代谢,提高皮肤细胞生长力,从而有效治疗多种光照性皮肤病,如:白癜风。在健康保健领域,UVB 光的照射可以调节高级神经功能、改善睡眠、降低血压等;同时,UVB 光能促进生成维生素 D₃^[17],波长为 293 nm 的 UVB 光使人体内产生维生素 D₃ 的效率是阳光的 2.4 倍。在农业生产方面,主要应用在植物照明(310 nm)、水消毒和食品运输等。使用窄带 310 nm UVB 光源照射水果和蔬菜从而产生某种植物化学物质,这种物质可以大大降低癌症和心血管疾病的风险^[17]。

目前,大多 UVB 光都采用紫外 LED 开展上述研究应用,而 VCSEL 具有激光器的多项特点,例如:单色性好、线宽窄,可以进一步改善治疗效果,并有利于研究不同波长的治疗影响。研究表明窄带宽的 UVB(310 nm)光源相比宽带宽的 UVB(280~320 nm)光源,对皮肤病的治疗效果更好,因为后者对正常皮肤的红斑和晒伤风险更高^[17],而前者对邻近部位的不良副作用也更低^[17]。使用 UVB VCSEL 作为光源,则将更易控制治疗范围,更容易选择最合适的治疗波长,减少对正常部位的损伤。

UVC 波段(200~280 nm)主要用于杀菌消毒、生物防治。原理是利用 UVC 波长的紫外线破坏微生物机体细胞中的 DNA 或者 RNA 分子结构,造成其生长性细胞或再生性细胞死亡,达到杀菌消毒的效果。根据这一特性,UVC 光源被广泛应用到空气、水、物体表面杀菌消毒。在 2019 新冠疫情中,越来越多的 UVC LED 被应用于医疗防护中。而 UVC VCSEL 可以凭借其功率密度高、发光更集中的特点,发挥其更显著的杀菌消毒效果。

1 III族氮化物 VCSEL 研究进展

GaN VCSEL 的相关研究起步较晚, GaAs 基 VCSEL 诞生的十多年后, 才出现 GaN VCSEL 的身影。1989年, 日本的科学家 AMANO H 等生长出高质量的 GaN 薄膜并解决了 p 型掺杂和量子阱有源区的问题^[10], 之后有关 GaN VCSEL 的研究开始逐步进行。GaN VCSEL 的研究最早开始于 1995 年, 东京工业大学的 HONDA T 等首先对 GaN VCSEL 的阈值特性进行了理论计算研究^[18]。第一个光泵 GaN VCSEL 在 1996 年由 ATMI 公司的 REDWING J M 等^[12]实现。之后的 1996 到 2007 年, 东京大学^[19-20]、布朗大学^[21]、日本 NTT 公司^[22]、厦门大学^[23]、台湾交通大学^[24]、瑞士洛桑理工大学^[25]等机构的研究小组也相继报道了具有不同 DBR 结构的 GaN VCSEL 的光泵激射。具有里程碑意义的事件发生在 2008 年, 王兴宗研究组^[26]制备出了世界上第一支电注入蓝光 GaN VCSEL, 这是第一次成功实现电注入 GaN VCSEL, 随后越来越多的研究人员投入到电注入 GaN VCSEL 的研发之中。

1.1 可见光 VCSEL

GaN VCSEL 是 III 族氮化物半导体激光器中的代表之一, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 是一种典型的 III-N 族半导体材料系统, 其禁带宽度在 0.7~3.4 eV 范围内连续可调, 因此, 理论上 InGaN 材料可以覆盖全部可见光波段。目前受到应用驱动和高 In 组分 InGaN 外延的瓶颈, GaN VCSEL 主要集中在蓝绿光波段。而发展 GaN 蓝光和绿光 VCSEL 的挑战在外延生长与结构设计方面^[27]。

在早期研究中, 蓝紫光波段 GaN VCSEL 报告较多。1999 年, 俄罗斯科学院的 KRESTNIKOV I L 等实现了第一支蓝光 GaN VCSEL^[28]。同年, 东京大学的 SOMEYA T 等报道了第一支蓝光混合双 DBR 结构的 GaN VCSEL^[19], 这意味着有实用价值的蓝色 VCSEL 在 GaN 材料系统中实现。之后, 蓝紫光波段 GaN VCSEL 的研究进展飞速, 研究人员也通过使用双介质 DBR 替代混合 DBR 结构来获得更高品质因子(Q 值)的谐振腔, 提高器件质量。

近期, 在蓝紫光波段 GaN VCSEL 的研究中比较有代表性的机构包括: 布朗大学、台湾交通大学、日亚公司、厦门大学、名城大学、斯坦雷电气公司等研究单位, 比如: 台湾交通大学的王兴宗教授研究组于 2008 年制成了第一支电注入蓝光 GaN VCSEL^[26], 开创了电注入 GaN VCSEL 的先河。日亚公司在 2008 年实现了最大输出功率可达 700 μW 的蓝光电泵浦 GaN VCSEL^[29]。厦门大学的张保平研究室^[30]于 2014 年制造了 Q 值高达 3 570、阈值电流低至 0.93 mA 的高质量 VCSEL。2015 年, 索尼公司使 GaN VCSEL 输出功率首次达到了毫瓦量级^[31]。随后, 日本名城大学通过合理优化生长参数实现了高质量 AlInN/GaN DBR 的生长, 以此为基础在 2018 年报道了连续输出功率 6 mW, 阈值电流密度 9 kA/cm²(对应阈值电流 4.5 mA), 斜率效率 0.87 W/A, 发散角 5.1°的蓝光 VCSEL^[32]; 次年报道了腔长为 4λ , 连续输出功率 1.8 mW, 微分电阻 90 Ω 的蓝光 VCSEL, 并且探究发现 GaAs 体系的短腔结构并不适合 GaN 体系 VCSEL^[33]。2019 年, 斯坦雷电气公司基于埋入 SiO_2 横向光限制技术, 采用花状结构实现了 441.7 nm 环形阵列锁相 GaN VCSEL^[34], 具有高达 30% 的差分量子效率、15.8 mW 的高输出功率和 2.8°的窄发散角度。同年斯坦雷电气公司^[35]和索尼公司^[36]又分别在增大输出功率和减小阈值电流两个方面取得了突破。2020 年, 斯坦雷电气公司提出了蓝色 GaN VCSEL 中的一种新型纳米圆柱波导^[37], 在光输出功率和电光转换效率方面提供了横向光学约束和优异的输出性能。2020 年, 加利福尼亚大学的 KEARNS J A 等将埋入式隧道结(Buried Tunnel Junction, BTJ)应用在半极性 GaN VCSEL 中^[38], 在减小损耗和提高注入效率方面获得很大改善。台湾交通大学的 CHANG T C 等第一次将 TiO_2 高反射率差光栅(High-index-contrast Grating, HCG)引入电驱动 GaN VCSEL, 并成功激射^[39]。2020 年, 厦门大学张保平等通过引入横向光学限制^[40], 使所需载流子浓度降低, 降低了有源区结温和光谱展宽, 实现了 GaN VCSEL 较低的阈值电流和较高的输出功率^[41]。同年, 耶鲁大学 ELAFANDY R T 等报道了一种使用纳米多孔 GaN 与 GaN 交替的底部导电 DBR 的蓝光 VCSEL^[42], 其激射波长为 434 nm, 阈值电流密度为 42 kA/cm², 最大光输出功率为 0.17 mW。

在绿光 GaN VCSEL 方面, 由于量子限制 Stark 效应和高密度缺陷和位错, 绿光发射 InGaN/GaN 量子阱的量子效率较低^[43], 被称为“绿色间隙”^[44]。2008 年, CAI L E 等^[23]通过优化 InGaN/GaN 量子阱的生长, 首次实现了光泵浦下蓝绿光 GaN VCSEL 的激射, 室温下激射波长为 498.8 nm, 线宽为 0.15 nm。

近年来, 厦门大学张保平研究室在绿光 VCSEL 方面取得较多进展^[43]。2016 年, WENG G 等首次实现

了电注入绿光 GaN VCSEL 的连续激光^[45],该 GaN VCSEL 器件采用 InGaN 量子点作为增益介质,室温连续激光波长为 560.4 nm,并且具有 0.61 mA 的低电流阈值。2017 年,MEI Y 等^[46]使用 InGaN 量子点作为有源区,通过调节腔长将该器件的波长从 491.8 nm(蓝绿色)拓展到 565.7 nm(黄绿色),覆盖了大部分的“绿色间隙”。同年,XU R B 等^[47]通过使用量子阱有源区中的量子点(QD-in-QW),实现了电注入下同时发射蓝光和绿光的 GaN VCSEL,该器件首先在约 2 μA 的阈值电流处激射,发射波长为 545 nm 的绿光,随着电流的增加,在 430 nm 处出现另一个激射峰,阈值电流约为 5 mA。2018 年,XU R B 等^[48]通过将宽谱蓝光 InGaN/GaN 量子阱与微腔相结合,实现了基于量子阱中局域态的绿光 VCSEL,由于谐振腔效应,与腔模共振的局域态发光模式的复合效率大幅提升,使得大注入电流下绿光(493 nm)得到显著提升,实现激射。以上研究为绿光 VCSEL 的后续发展提供了重要的思路。

2020 年,索尼公司的研究人员报道了基于多层介质膜的绿光 VCSEL^[49],在半极性 GaN 衬底上设计了腔长为 20 μm ,底部 DBR 为多层弯曲介质膜($\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$) 的结构。其顶部 DBR 与 p-GaN 层之间插入一层 30 nm 的 ITO 层,阈值电流为 1.8 mA(对应阈值电流密度为 14.4 kA/cm^2),激射波长为 515.2 nm。

1.2 紫外 VCSEL

目前,用于制作紫外 VCSEL 的材料主要是 AlGaIn 合金体系。III 族氮化物材料 AlN、GaN、InN 及其合金半导体都具有直接带隙、耐高温、抗辐射、抗腐蚀、击穿电压高、热导率高等优点。通过改变其中的 Al 组分,可以调节 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的禁带宽度,使得在 3.4 eV 到 6.0 eV 之间连续变化^[50],非常适合应用于近紫外(320~400 nm)、中紫外(280~320 nm)及深紫外(200~280 nm)的半导体激光器(Laser Diode, LD)、发光二极管(Light Emitting Diode, LED)和光电探测器(Photodetector, PD)等。

紫外波段的半导体激光器中,传统的边发射激光器发展较快,较早实现了光泵和电泵激射^[51-55]。相比于边发射激光器,VCSEL 在紫外波段的进展则相对缓慢。1995 年,东京工业大学的 HONDA T 等首先在紫外波段对 AlGaIn VCSEL 的阈值特性进行了理论计算研究^[18]。1996 年,REDWING J M 等实现了光泵激射的紫外 VCSEL^[12]。近 30 年来,紫光、蓝光、绿光波段的 VCSEL 都实现了光泵浦和电泵浦激射,但是至今没有紫外电泵 VCSEL 的报道。

1.2.1 UVA (320~400 nm) VCSEL

1996 年,美国先进技术材料公司(Advanced Technology Materials, Inc.)的 REDWING J M 等成功实现了紫外 363 nm 光泵 VCSEL 的激射^[12],其结构和不同激发功率下的光谱如图 1。上、下 DBR 均由 30 个周期的 $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}$ (39.7 nm)/ $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ (37.2 nm) 构成,有源层为 10 μm 的 GaN。激射波长为 363.5 nm,激射阈

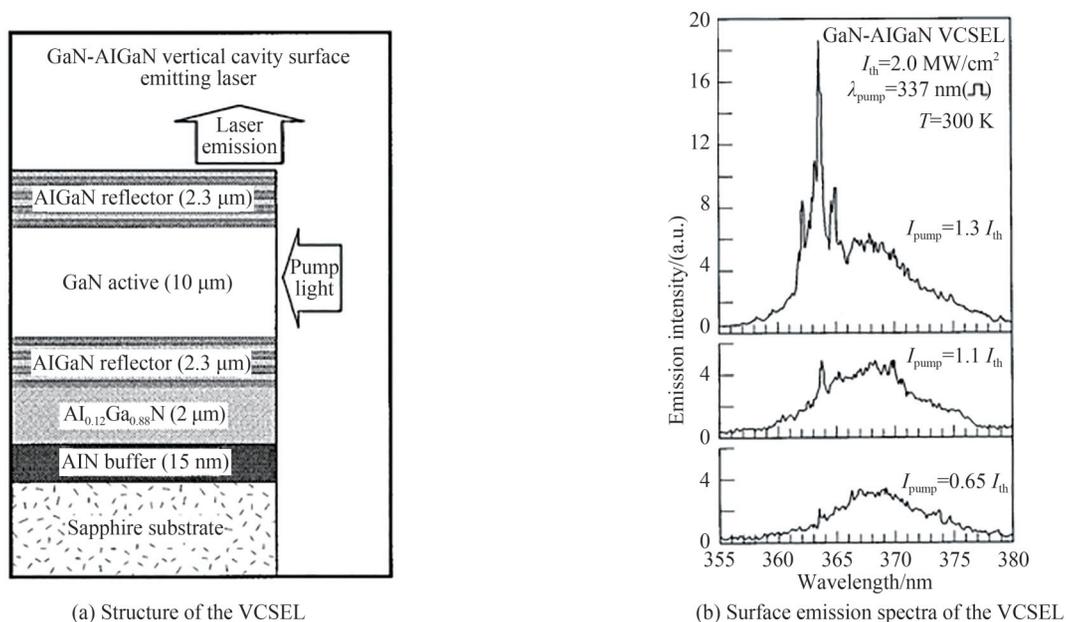


图 1 363 nm VCSEL 的结构与发光光谱^[12]

Fig. 1 Structure and emission spectra of the 363 nm VCSEL^[12]

值为 2 MW/cm^2 。

2000年,布朗大学(Brown University)的 ZHOU H L等制备出了 383 nm 光泵激射的 VCSEL^[56], 阈值为 30 mW , 线宽小于 0.1 nm , 其结构如图 2。有源区为 20 对 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}(4 \text{ nm})/\text{GaN}(6 \text{ nm})$ 量子阱, 上 DBR 为 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$, 下 DBR 为 60 对 $\text{GaN}/\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ 。这种混合 DBR 结构相比于全氮化物 DBR 结构, 上表面的介质膜 DBR 制备工艺简单、反射率高且高反带的带宽更宽。

2010年, 南洋理工大学的 CHEN R 等采用纳米球光刻(Nanosphere Lithography, NSL)制备了平均直径约为 500 nm 的纳米柱^[57], 实现了底部为 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ DBR、顶部为 $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ DBR 组成的纳米柱阵列结构的 VCSEL。该结构可以提供优异的光学限制, 降低激射阈值, 如图 3 所示。该器件在 343.7 nm 处激

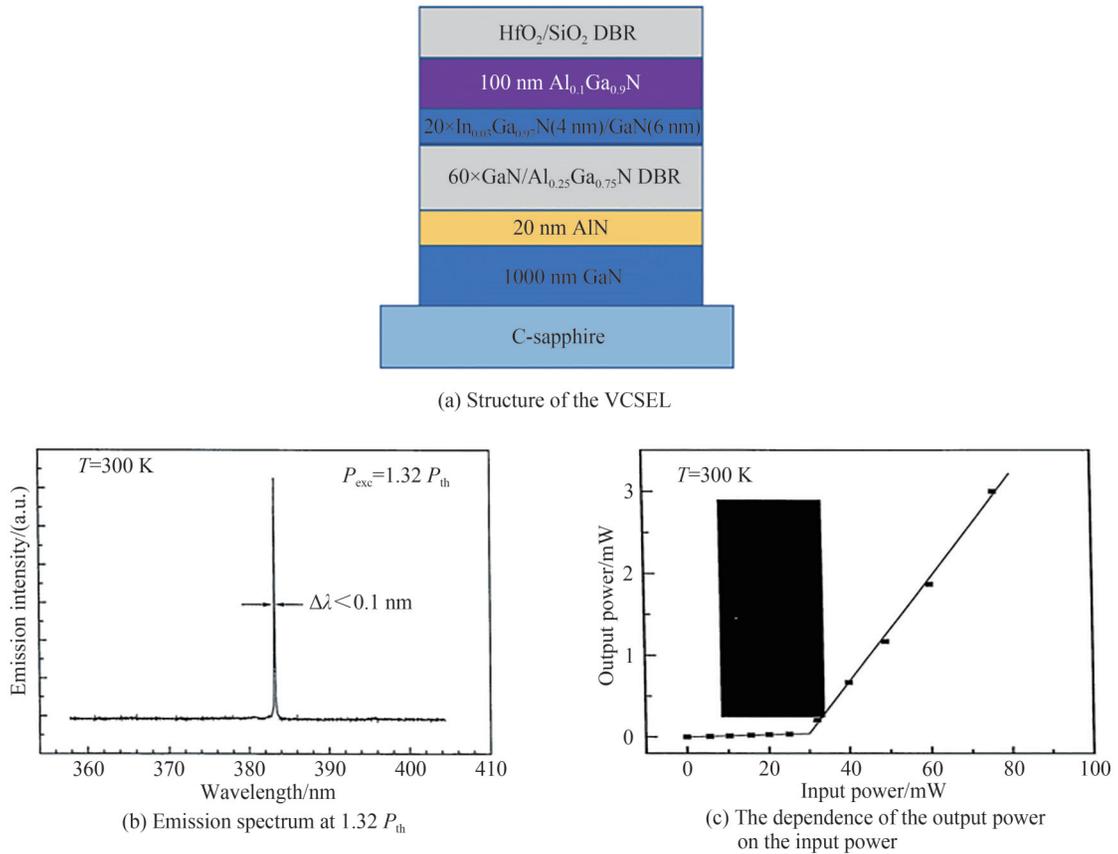


图 2 383 nm VCSEL 的结构、发光光谱与输出功率曲线^[56]
Fig. 2 Structure, emission spectrum and output power of the 383 nm VCSEL^[56]

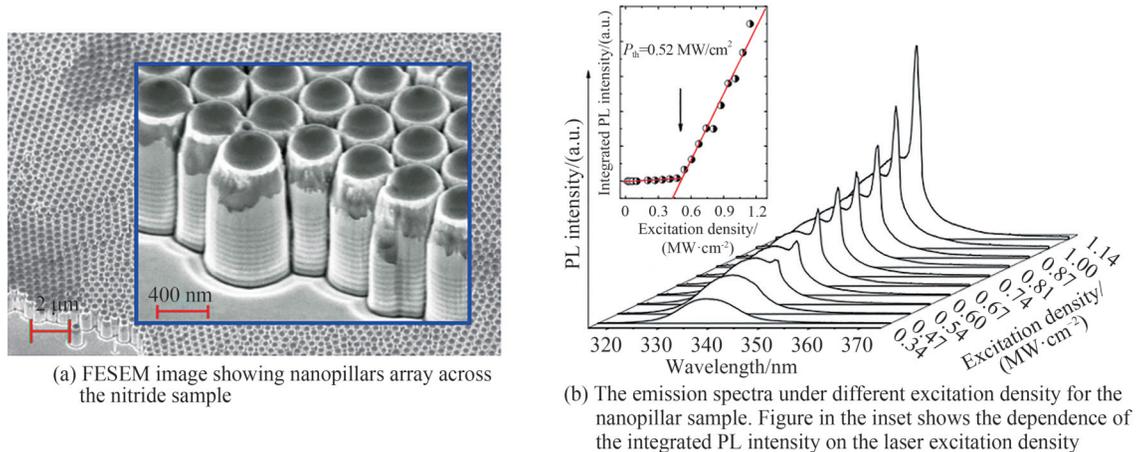


图 3 343.7 nm VCSEL 的场发射扫描电子显微镜图片和 PL 光谱^[57]
Fig. 3 FESEM image and PL spectra of the 343.7 nm VCSEL^[57]

射, 激光阈值为 0.52 MW/cm^2 。

2015年, 乔治亚理工学院 LIU Y S 等制备了 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 量子阱的紫外 VCSEL^[58], 其结构如图 4(a), 激光波长 367.5 nm , 线宽为 1.4 nm , 阈值为 1 MW/cm^2 , 是当时报道的最低阈值。该器件采用了混合 DBR 结构, 氮化物作为下 DBR, $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 作为上 DBR。2016年, 该课题组又优化了类似结构的紫外 VCSEL^[59], 其结构如图 4(c)。该 VCSEL 激光波长为 374.9 nm , 阈值为 1.64 MW/cm^2 。两支 VCSEL 的相关光谱如图 4(b)、(d)。

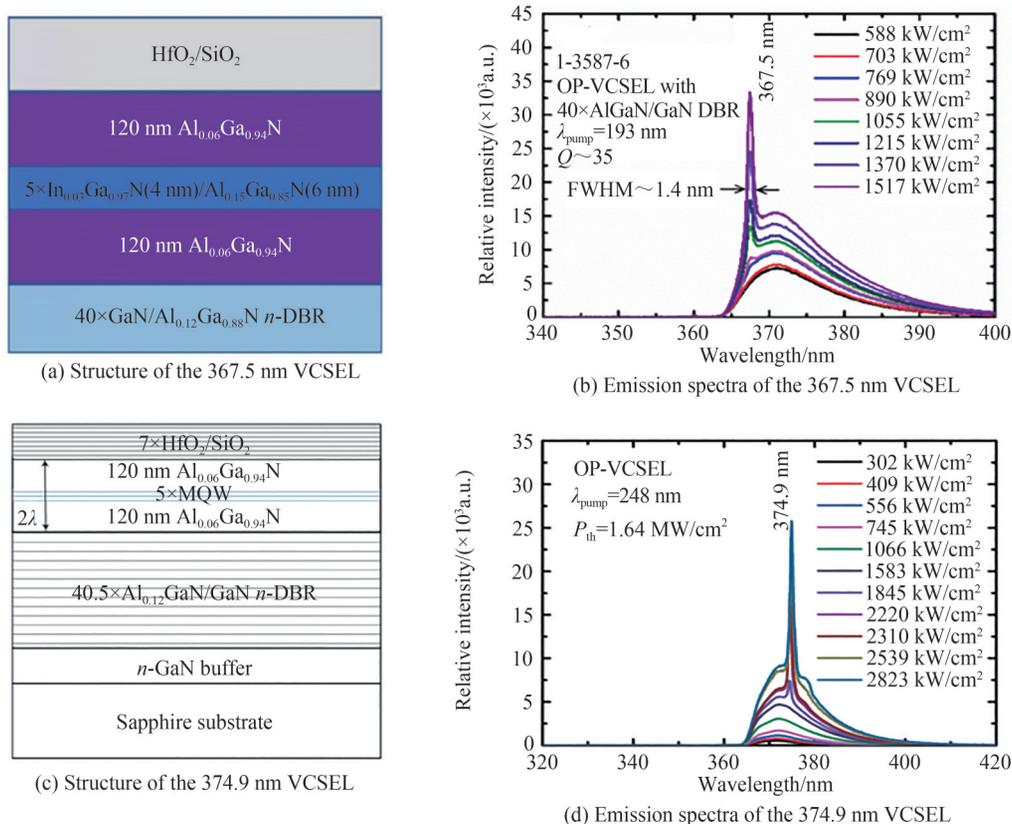


图 4 367.5 nm 和 374.9 nm VCSEL 的结构和发光光谱^[58-59]

Fig. 4 Structure and emission spectra for the 367.5 nm and the 374.9 nm VCSELs, respectively^[58-59]

2018年, 台湾交通大学的 CHANG T C 等采用 TiO_2 高对比度光栅 (High-Contrast Grating, HCG) 作为顶部反射镜, 制备了紫外光泵 VCSEL^[60]。其激光波长为 369.1 nm , 具有 0.69 MW/cm^2 的阈值, 输出特性如图 5。HCG 具有厚度薄、高反带宽、偏振可调以及谐振波长灵活可调等优点, 已经在长波长 GaAs 系的 VCSEL 中得到了广泛研究, 但其制造工艺特别复杂, 尚未进入实际应用。

2019年, 乔治亚理工大学的 PARK Y J 等引入空气隙 DBR 来增大 DBR 两种材料折射率差^[61], 实现了具有高反射率的 DBR, 进而利用该结构实现了阈值功率密度低至 270 kW/cm^2 的 375 nm 激光, 其结构如图 6。

2021年, 厦门大学张保平研究组在 UVA 波段实现了 $376\sim 409 \text{ nm}$ 的光泵激光^[62], 光谱如图 7 所示。因为器件具有双介质 DBR 和利用衬底转移技术制作的楔形腔, 从而实现了渐变腔长。在 InGaN/GaN 多量子阱有源区采用周期性增益结构, 增强了腔模场与有源层之间的耦合。腔内光场由腔长调制, 因此, 在单个 VCSEL 芯片的不同点上实现了不同波长的可调谐激光。不同波长下的阈值泵浦功率密度为 $383\sim 466 \text{ kW/cm}^2$, 其中紫外部分的阈值泵浦功率密度最低。

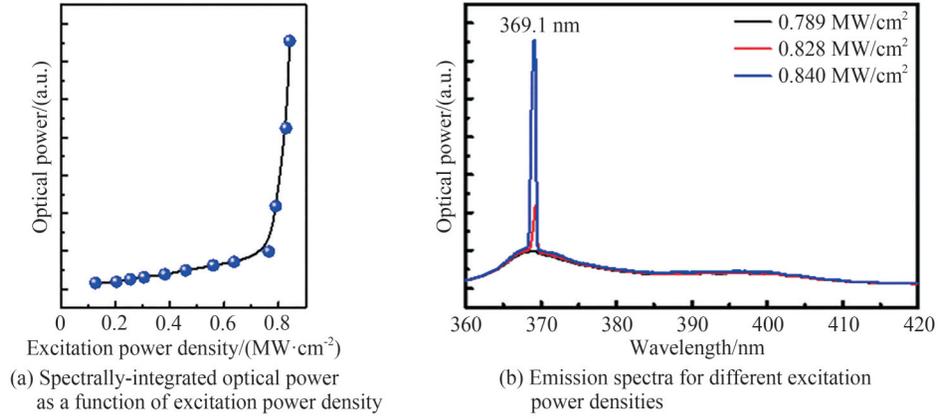


图5 HCG VCSEL 的输出特性^[60]
Fig. 5 Output characteristics of the HCG VCSEL^[60]

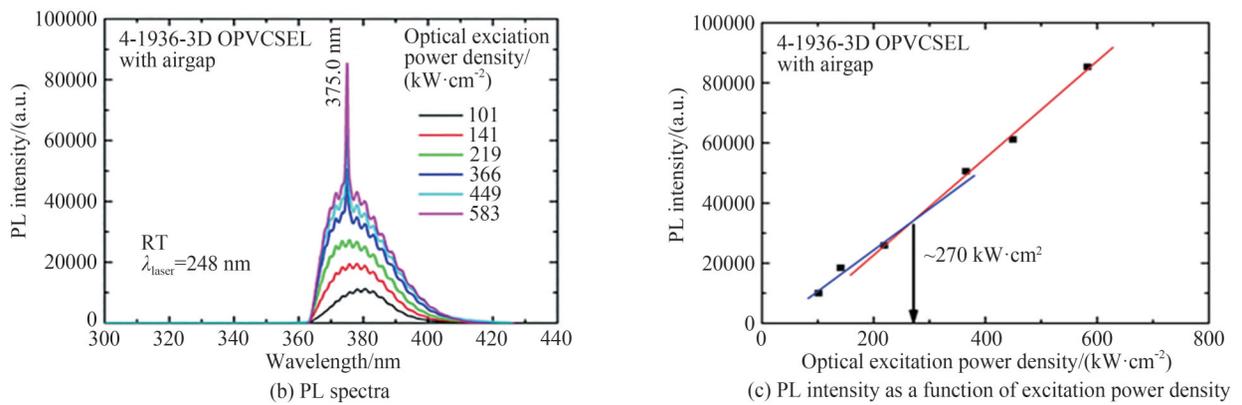
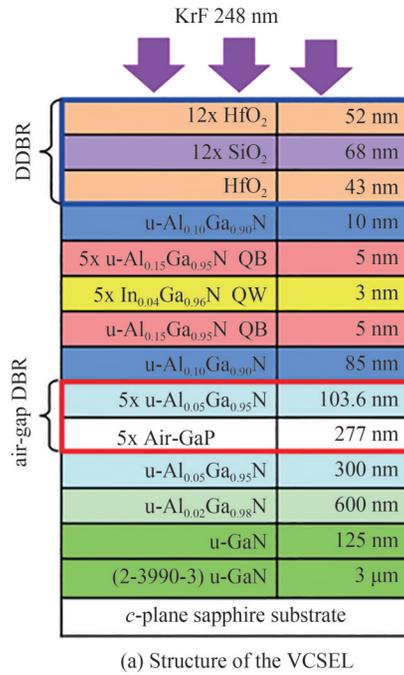


图6 375 nm VCSEL 的结构,发光光谱和输出曲线^[61]
Fig. 6 Structure, emission spectrum and output characteristic of the 375 nm VCSEL^[61]

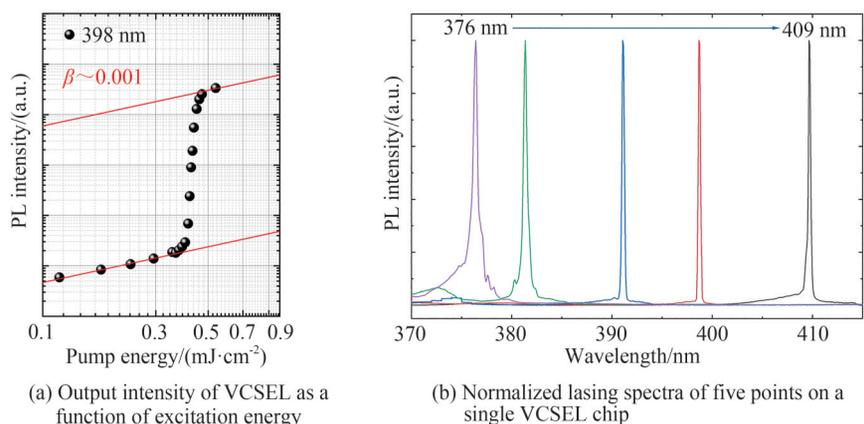


图7 渐变腔长UVA VCSEL的发光光谱和输出曲线^[62]
Fig. 7 Emission spectrum and output characteristic of the graded cavity length VCSEL^[62]

1.2.2 UVB(280~320 nm)VCSEL

2020年,HJORT F等报道了310 nm的光泵VCSEL的激射^[63]。器件外延层、表面形貌和整体结构如图8(a)。外延层利用MOCVD生长,再通过电化学腐蚀的方法去除衬底,在300 °C、50 MPa压力下,通过真空热压键合将台面转移到Ti/Au覆盖的硅基底上。有源层为AlGaIn量子阱,上、下DBR均为HfO₂/SiO₂ DBR。顶部DBR的高反带中心为320 nm,峰值反射率超过99%。底部反射镜为介质膜DBR和金属Al镜组合。利用Al反射镜, DBR在激射波长段的反射率得到了提高,激光阈值10 MW/cm²左右,线宽为3 nm,光谱如图8(b)、(c)所示。

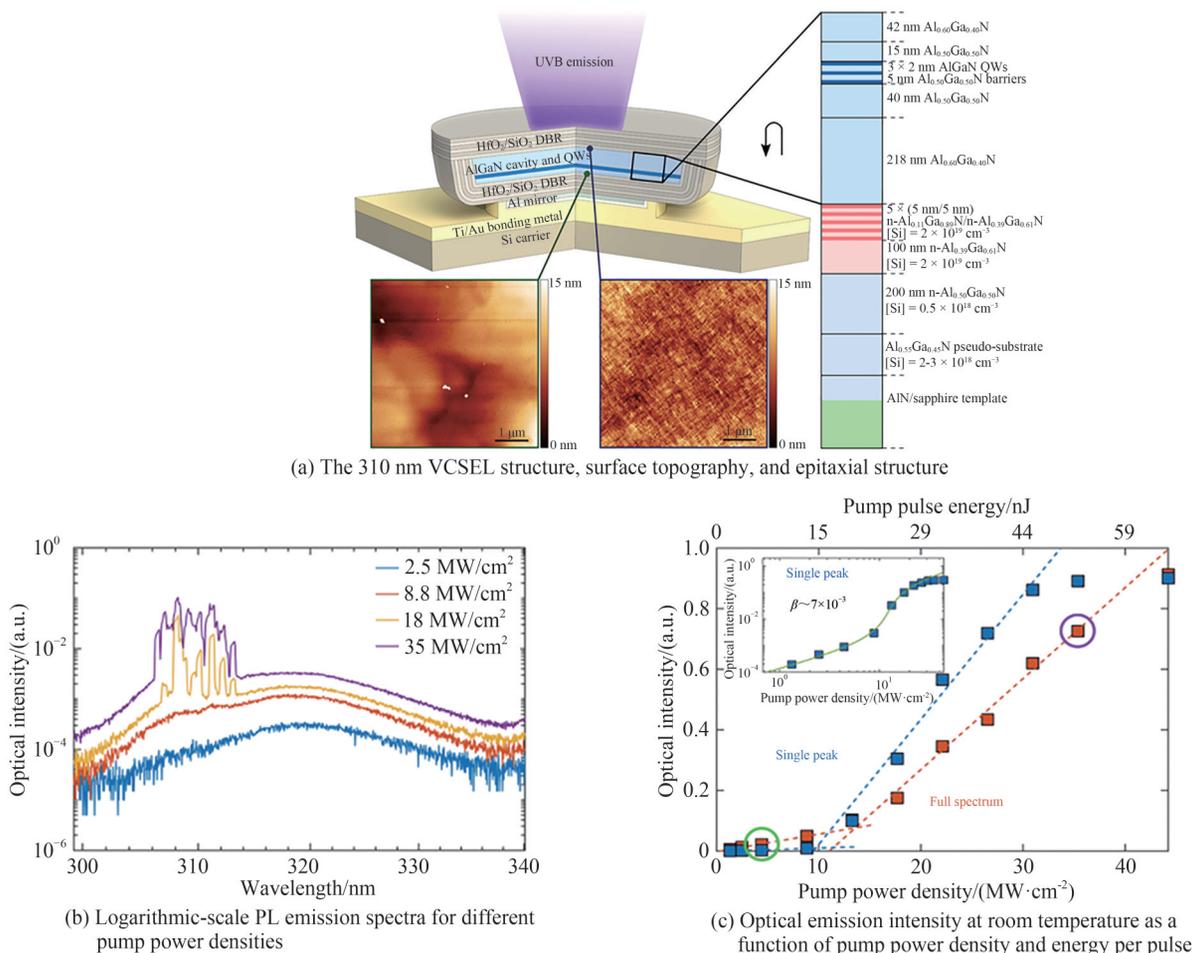


图8 310 nm VCSEL 的结构、表面形貌、发光光谱和输出曲线^[63]
Fig. 8 Structure, surface topography, emission spectrum and output characteristic of the 310 nm VCSEL^[63]

1.2.3 UVC(200~280 nm) VCSEL

当波长进一步缩短到UVC波段时,VCSEL激射比近紫外和中紫外更加困难,主要是因为DBR及有源区的光学损耗更高、制备工艺更难。近期,厦门大学张保平研究组在深紫外VCSEL方面取得了一系列重大进展。2018年,ZHENG Z等详细分析了AlGaN平板微腔中的光损耗,并成功制作了基于AlGaN量子点有源层和上、下DBR均为HfO₂/SiO₂的微腔^[64]。通过计算,ZHENG Z等认为光学损耗的主要来源是界面散射损耗,可以通过减小激光剥离后的表面粗糙度以及调整粗糙界面与腔内光场驻波的波节重合来降低界面散射损耗。2021年,ZHENG Z等成功实现了双介质膜DBR结构的UVC VCSEL的光泵激射^[65],器件结构如图9(a)。该器件主要利用了激光剥离技术剥离蓝宝石衬底,优化抛光工艺和DBR设计,从而制备了全介质膜DBR结构的VCSEL。这是迄今世界上第一支UVC波段VCSEL激射,也是目前为止波长最短的紫外VCSEL。该有源区为5对Al_{0.4}Ga_{0.6}N(2 nm)/Al_{0.5}Ga_{0.5}N(6 nm)多量子阱层,上DBR为7.5对HfO₂/SiO₂,下DBR为15.5对HfO₂/SiO₂,激射波长为275.9 nm,线宽为0.78 nm,阈值功率密度为1.21 MW/cm²。器件发光特性如图9(b)、(c)所示。

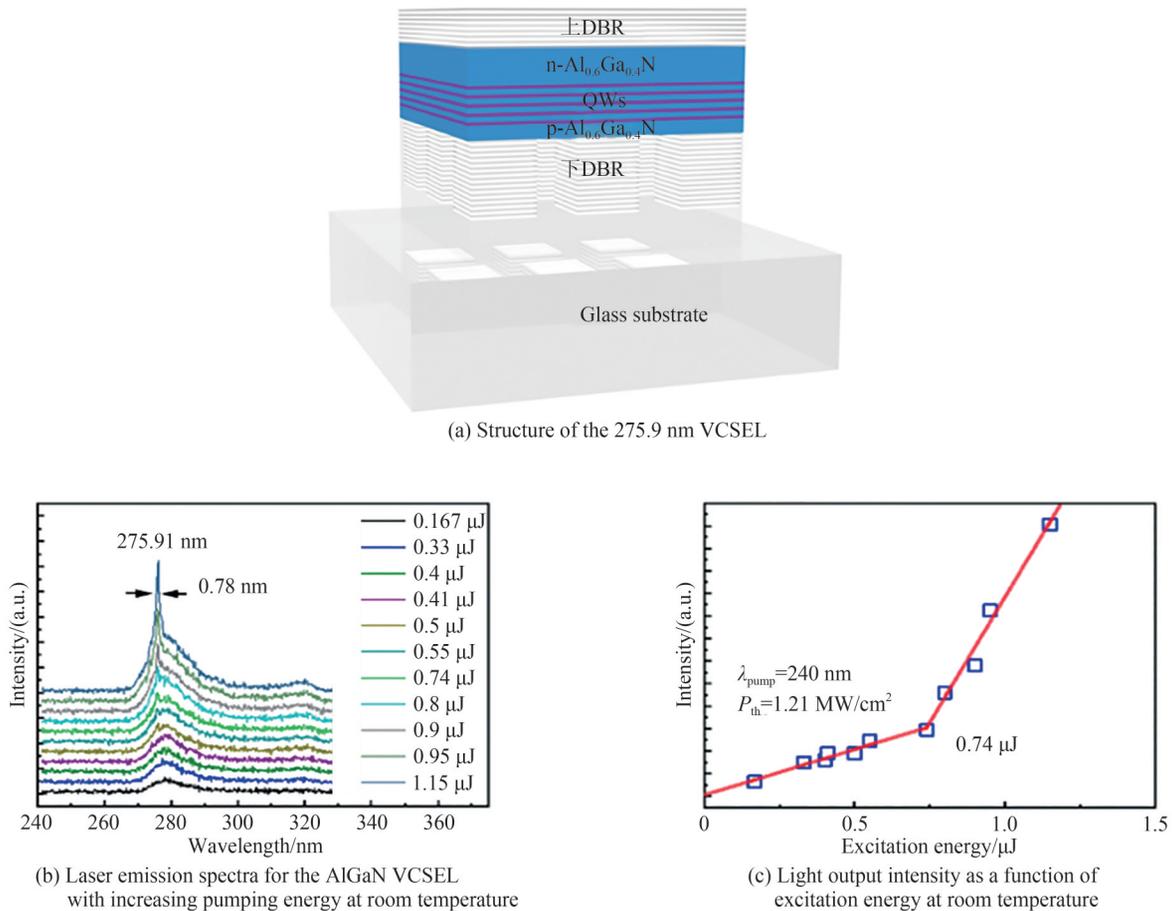


图9 275.9 nm VCSEL的结构,发光光谱与输出曲线^[65]
Fig. 9 Structure, emission spectrum and output characteristic of the 275.9 nm VCSEL^[65]

2 紫外VCSEL的难点及解决方法

相较于其他波段的VCSEL,紫外波段的VCSEL发展受到很多挑战,尤其是深紫外波段(<280 nm)VCSEL。实现紫外波段VCSEL面临着包括高质量晶体的获得、DBR的制备、衬底剥离以及薄膜表面粗糙度的控制等难题。对于电泵紫外VCSEL,还需要关注电流扩展和载流子注入效率等问题。

2.1 光泵VCSEL

制备光泵紫外VCSEL的关键问题包括^[66]:1)需要较高Al组分的AlGaN外延片,但Al组分越高,外延温度过高及Al元素的表面迁移困难均导致高晶体质量的AlGaN外延片不容易制备;2)高质量的紫外DBR

制备困难,氮化物 DBR 存在晶格失配、热膨胀系数失配、面内组分不均匀和低折射率差等不足,因此难以得到具有高反射率的 DBR;3)介质膜 DBR 需要剥离衬底的工艺,衬底转移也存在诸多困难,同时介质膜 DBR 在深紫外段也存在部分吸收的问题。

2.1.1 高晶体质量 AlGaIn 外延片的生长

AlGaIn 材料,特别是高 Al 组分 AlGaIn 材料的外延生长仍存在很多难点,其原因有以下几点:1)由于缺乏同质衬底,通常采用异质衬底外延 AlGaIn 材料,如:蓝宝石、SiC 和 Si 衬底等。这些衬底材料与 AlGaIn 材料在晶格常数和热膨胀系数上存在较大差异,因此,AlGaIn 薄膜中存在较大的内部张应力,容易导致薄膜内部高密度的位错、薄膜表面粗糙、龟裂、载流子迁移率低等问题,严重降低了 AlGaIn 的晶体质量和光电学性能;2)外延中,衬底上台阶和扭结位置具有较低的能量,有利于反应物附着和二维生长。但相比于 Ga 原子,Al 原子具有粘滞系数大和表面迁移率低的特点,难以迁移到台阶或者扭结处。因此 AlGaIn 容易形成三维岛状生长模式,从而形成马赛克分布的亚晶粒,这些亚晶粒随着外延生长融合,产生了张应力。该张应力与亚晶粒尺寸成反比,并且随着薄膜厚度的增大而增大。当薄膜厚度到达临界厚度时,所积累的张应力能量通过位错或龟裂方式进行释放^[67],而位错在 AlGaIn 晶体中成为非辐射复合中心,极大地恶化器件性能。图 10 描述了 AlGaIn 多量子阱内量子效率 (Internal Quantum Efficiency, IQE) 与量子阱内位错密度 (Dislocation Density, DD) 的关系^[68],可以看出,随着 DD 的增大, IQE 逐渐降低;3)在 MOCVD 生长 AlGaIn 材料中,Al 金属有机源比其他金属有机源化学性质更活泼, TMAI 和 NH_3 在高温下存在严重的预反应,产生微小颗粒落在衬底上,会导致缺陷产生,同时寄生反应使源的利用效率下降。因此,为了生长高质量高 Al 组分 AlGaIn 材料,必须克服异质外延晶格失配大、位错密度高、Al 原子表面迁移率较低、寄生反应强烈等问题,这需从生长工艺上予以改进。

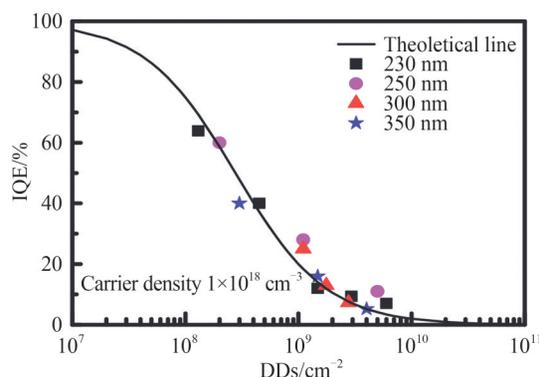


图 10 AlGaIn 多量子阱内量子效率 (IQE) 随量子阱中位错密度 (DD) 的变化^[68]

Fig. 10 Variation of internal quantum efficiency of AlGaIn multiple quantum wells with dislocation density in quantum wells^[68]

尽管 AlGaIn 薄膜生长过程中存在困难,但由于其突出的应用前景,高质量的 AlGaIn 材料的生长始终是研究热点,也取得了许多成果。为了减少蓝宝石衬底上 AlGaIn 层的应力,得到高质量 AlGaIn 外延层,研究者们采用各种插入层技术或 AlN 模板来调节应力,抑止裂纹产生。KAMIYAMA S 和 AMANO H 等^[69-70]分别提出了低温 AlN 和 AlGaIn 插入层技术,获得了无裂纹的 AlGaIn 外延层。但是这种方法由于低温插入层的质量较低,会导致后续的 AlGaIn 外延层质量的劣化,而多层低温缓冲层的插入需要多个升降温过程,导致更多的热失配应力积聚,也使得这种方法的效果打了折扣。BYKHOVSKI A D 等^[71]和 ZHANG J P 等^[72-73]分别采用 GaN/AlN 以及 GaN/AlGaIn 超晶格结构来缓解张应力。AlN 材料的晶格常数小于 AlGaIn 的晶格常数,当在蓝宝石上采用 AlN 模板生长 AlGaIn 材料时,AlGaIn 会受到压应力而不易龟裂,并且 AlN 的带隙宽度大,对高于 200 nm 波长的紫外光完全透明。同时,AlN 材料具有优良的热导性能和热稳定性。研究结果表明,AlN 基板可以改善 III 族氮化物的晶体质量,降低位错密度。所以,高质量的 AlN 模板可以提高 AlGaIn 质量,从而提高深紫外器件的性能。然而,由于 c 面蓝宝石和 AlN 之间的面内晶格失配高达 13%,以及 TMAI 和 NH_3 之间存在强烈的气相预反应,AlN 模板生长也面临着严峻的挑战。

此外,日本滨松光子学株式会社采用了一种侧向外延 (Epitaxial Lateral Overgrowth, ELO) 技术,在

AlGaIn模板上制备SiO₂条状掩膜,并进一步侧向外延AlGaIn材料,成功获得了Al组分高达30%的高质量无裂纹AlGaIn外延层。但值得注意的是,这种方法对于高Al组分的AlGaIn材料有一定的局限性,Al组分不宜过高,上限约为30%。而且ELO工序复杂,需要光刻、干法刻蚀以及后续的退火等过程^[74]。VENNEGUES P等报道称^[75],GaIn模板上生长的高温(High Temperature, HT)AlN插入层通过形成V型槽结构能够有效地释放应力。因此采用MOCVD方法在高质量GaIn模板层上,以HT-AlN为插入层,生长了高Al组分Al_xGa_{1-x}N(0.33≤x≤0.79)外延薄膜。研究发现,HT-AlN插入层中的V型槽结构对AlGaIn外延层的生长能够起到亚微米横向外延(ELO)作用,而且AlN插入层能够有效地缓解AlGaIn薄膜中的应力,从而获得高质量无裂纹的AlGaIn薄膜。与ELO生长方法相比,该方法具有成本低、生长工序简单等优点。

除了以上研究和探索来提高AlGaIn薄膜生长质量,目前还存在其他的改良方法:1)Al组分渐变的AlGaIn缓冲层;2)图形化衬底等手段改善AlGaIn薄膜的晶体质量;3)表面活性剂TMIn辅助生长,增强高Al组分AlGaIn表面吸附单体的迁移率来降低缺陷密度;4)两步生长法^[76]或三步生长法^[77]等。以上四种方法均可以在一定程度上提高AlGaIn晶体质量。

2.1.2 DBR的制备

在制备VCSEL时,DBR结构的选择通常有三种方式:全氮化物DBR结构、混合DBR结构和全介质膜DBR结构。对于全氮化物DBR结构VCSEL,即上、下DBR均为外延生长的氮化物,用于组成DBR的两种氮化物之间往往晶格失配大或者折射率差小,使得二者构成的DBR的高反带宽窄、反射率偏低、材料层数要求高,很难得到高质量的DBR。

混合DBR结构,即下DBR为外延生长的氮化物DBR,上DBR为介质膜(如:氧化物)DBR,这种结构仍然要面临着与全氮化物DBR相同的外延困难。全介质膜DBR结构,即上、下DBR均由介质膜(通常为氧化物)材料构成。常用的DBR材料有SiO₂、HfO₂、Ti₃O₅、Ta₂O₅、TiO₂、ZrO₂等。选用其中合适的材料,如:SiO₂/TiO₂、SiO₂/Ta₂O₅、HfO₂/SiO₂、SiO₂/ZrO₂等能以较小的对数实现99%以上的反射率。由于介质膜材料种类多,折射率差较大,且制备工艺技术成熟,易于获得宽带宽、高反射率的DBR。但在紫外尤其是深紫外波段,许多氧化物同样存在着强烈的光学吸收。因为SiO₂和HfO₂在紫外光段具有较低的消光系数,可以有效地避免对紫外光的吸收,通常采用SiO₂作为DBR中的低折射率材料,而高折射率材料常用HfO₂。各种氧化物在300 nm处的折射率与消光系数如表1所示。

表1 各种透明氧化物在300 nm左右的折射率与消光系数

Table 1 Refractive index and extinction coefficients for various transparent oxides around 300 nm

Material	Refractive index	Extinction coefficient	Reference
SiO ₂	1.5	0	[78]
HfO ₂	1.98	7.67×10^{-3}	Ours
Ti ₃ O ₅	2.3	0.2	[79]
Ta ₂ O ₅	2.4	0.2	[78]
TiO ₂	2.8	1	[80]

2.1.3 衬底的转移

全介质膜DBR结构虽然有着宽带宽、高反射率等优点,但是需要去除外延生长使用的原始衬底并将氮化物薄膜转移到其他支撑衬底上以沉积上DBR。这种制备方式增加了器件制备工艺的复杂性。2008年日亚化学报道了第一支基于全介质膜DBR结构的GaIn VCSEL的室温连续激射^[50]。器件外延使用蓝宝石为衬底,之后将样品键合到了Si支撑基底上,并使用激光剥离的方法将蓝宝石衬底去除。

AlGaIn外延片常用的衬底为蓝宝石衬底,是一种硬度大、禁带宽度大的材料。通常剥离蓝宝石衬底的方法有三种:激光剥离(Laser Lifted Off, LLO)^[81-83]、选择带隙的光电化学腐蚀(Bandgap Selected Photo-electrochemistry Etching, BGS-PECE)^[84-89]和氢氛围的各向异性热腐蚀(Hydrogen-environment Anisotropic Thermal Etching, HEATE)^[90-93]。BGS-PECE对牺牲层的极性、导电类型和带隙的宽度都有要求,Ga极性和p型导电材料都会使得牺牲层难以被腐蚀,并且牺牲层的带隙必须是整个外延结构中最小的。如果横向腐蚀的速率较低,则无法实现衬底与外延层的大面积剥离,这些因素都限制了该技术的应用。HEATE方法

的横向分解速率也较低,同样不利于外延片的大面积剥离。

相比之下,LLO适用的范围更广,其原理是采用激光加热分解氮化物,只需要材料对该波段的光有吸收。通过激光加热与蓝宝石接触的外延层,当光密度达到阈值,材料就会因为吸光而产生热使自身分解,达到衬底剥离的效果。但是,相比于GaN材料,AlGaIn材料的禁带宽度大,吸收系数小,分解温度高,使得激光剥离AlGaIn外延层更具挑战。通常,剥离AlGaIn外延层需要考虑以下几个问题:

1) 若AlGaIn外延层生长在GaIn模板层上,则会导致整个AlGaIn外延层都受到了较大的张应力,而在激光剥离的过程,产生的瞬时高温使得外延层进一步膨胀,从而裂开。在较大的剥离能量下,会导致大部分AlGaIn外延层脱落。所以,为了较为完整的激光剥离效果,合适的剥离条件至关重要。

2) 若AlGaIn外延层使用了AlN模板层,则一般通过分解生长于AlN层上的AlGaIn层来实现衬底的剥离,这需要所用的激光具有较高的能量密度,并且AlGaIn层对该激光有较高的吸收。ZHENG Z等^[65]制备的UVC VCSEL就是利用了这种方式。

3) 由于激光剥离后外延片表面的粗糙度会极大地影响腔内光学损耗,从而影响腔的品质因子。粗糙度越大,光学散射损耗越大。同时,波长越短,散射损耗也越大。所以,在深紫外波段,散射损耗是一项很重要的损耗,激光剥离后需要对AlGaIn表面进行平滑,例如化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, CMP)。

2.2 电泵 VCSEL

由于电泵VCSEL和光泵VCSEL的载流子注入方式不同,所以电泵VCSEL在结构上要比光泵更复杂,困难更多:1)需要电流扩展结构以便向有源区提供足够且稳定的高浓度载流子,达到粒子数反转,形成持续的输出光。特定波段电泵VCSEL的电流扩展层,需要同时满足电流输运和光子透过性。2)尽可能高的载流子注入效率。对于短波长尤其是深紫外波段VCSEL,垒层与电子阻挡层的带阶更小,电子的泄露更为严重,所以要考虑合理设置电子阻挡层(EBL)。

2.2.1 电流扩展层

在GaAs基VCSEL中,高电导率的GaAs/AlGaAs DBR较容易实现。因此,电极一般都沉积在DBR表面,电流穿过DBR均匀注入谐振腔,不产生拥堵,如图11(a)所示^[94]。但在GaN VCSEL中生长高电导率的氮化物DBR十分困难,尤其是p侧DBR。因此GaN VCSEL如果想要进行电注入就必须制备腔内接触电极,使电流绕过DBR注入谐振腔,如图11(b)所示^[26]。除了工艺较为复杂外,腔内接触电极结构也会造成电流拥堵,增大器件串联电阻以及增大谐振腔内吸收。另外由于p-GaN的低电导率,必须在电极金属与p-GaN之间制备电流扩展层,通常做法是沉积氧化铟锡(ITO)层或者生长隧道结以实现欧姆接触与电流扩展。

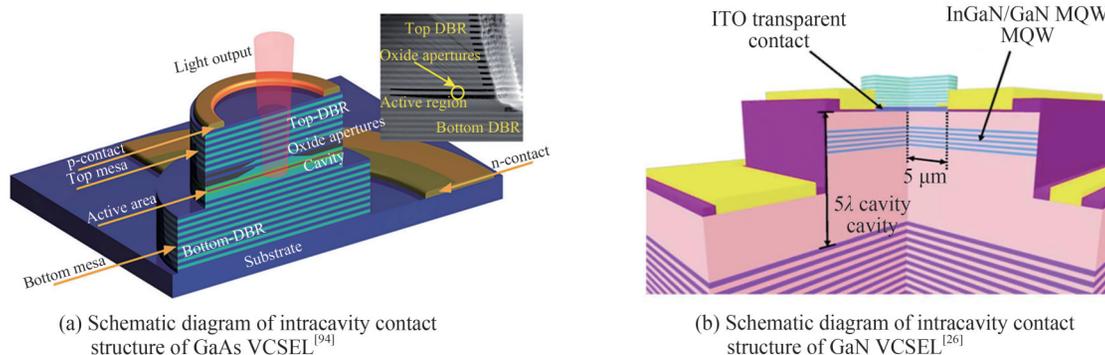


图 11 VCSEL 的腔内接触^[94,26]
Fig. 11 Intracavity contact of VCSEL^[94,26]

ITO是宽带隙的薄膜材料,其带隙为3.5~4.3 eV。由于ITO同时具有良好的导电性和透光性,所以在可见光VCSEL中已经得到较多的应用。但ITO对紫外波段具有非常高的吸收系数,不适合应用于紫外VCSEL。目前有希望使用隧道结(Tunnel-junction, TJ)或者新型二维导电材料如石墨烯等作为电流扩展层以减小光学损耗,提升器件性能。最近一些AlGaIn基隧道结的应用^[95-99]证明了其应用于电注入UV VCSEL

的重大潜力。隧道结,即利用电子的隧穿效应,一般是重掺杂的p区(费米能级进入价带)的价带电子隧穿到相邻的重掺杂的n区(费米能级进入导带)的导带,从而实现导电功能。

2015年,瑞士洛桑理工学院的MALINVERNI M^[98]等将埋入式的隧道结(Buried Tunnel Junction, BTJ)结构引入GaN微型LED中。结构如图12,采用分子束外延生长GaN隧道结,在净受主浓度接近 10^{20} cm^{-3} 的情况下实现了具有超薄耗尽宽度的p-n结,从而实现有效的带间隧穿。此隧道结在器件中呈现n-p-n结构,10 V反向偏压下表现出小于 $5 \times 10^{-5} \text{ A cm}^{-2}$ 的低泄漏电流密度。而在正向偏压3.3 V和4.8 V时,电流密度分别为 $20 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $2000 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,在+5 V测量下整个器件的比串联电阻为 $3.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。通过隧道结结构,使得整个LED实现了良好的电流限制与均匀的电注入,同时也证明了隧道结结构能在III族氮化物中实现,以此替代传统的透明导电氧化(Transparent Conducting Oxide, TCO)层。

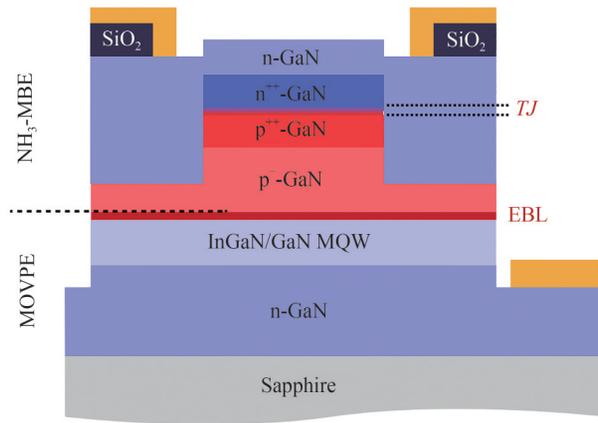


图12 埋入式隧道结结构示意图^[98]

Fig. 12 Schematic diagram of the buried tunnel junction^[98]

2016年,加利福尼亚大学的LEONARD J T研究了405 nm VCSEL中的ITO膜层和隧道结两种结构在光学损耗、散热、输出功率三方面的区别^[100]。根据图13中多层ITO薄膜的折射率和吸收系数分布^[99,101-102],ITO薄膜在紫光波段吸收系数高,在405 nm VCSEL中ITO造成的损耗占其总内部损耗的比例约为74% ($\sim 30 \text{ cm}^{-1}$)。由于n型氮化物在短波长(尤其是紫外)的吸收系数小于ITO,所以不仅无需限制TJ厚度,而且还可以通过增大TJ厚度改善电流扩散,实现了极低的损耗。在LEONARD J T的另一项关于TJ的研究中^[99],通过使用TJ能够将VCSEL的模拟阈值模态增益降低到约 14 cm^{-1} ,腔内接触实现 $< 5 \text{ cm}^{-1}$ 的损耗,突出了TJ结构对于紫光和紫外VCSEL在改善电流扩散和减小损耗两个方面的重要性。

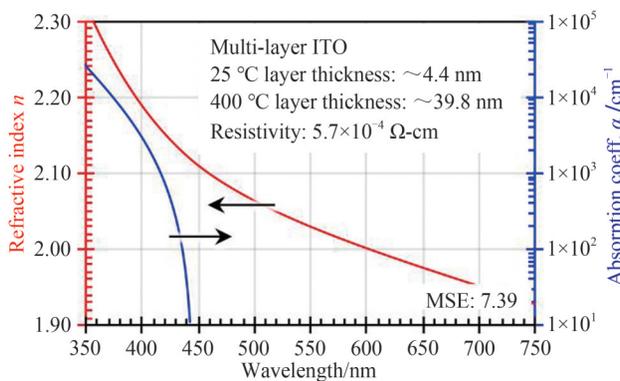


图13 多层ITO薄膜的折射率和吸收系数分布^[98,100-101]

Fig. 13 Refractive index and absorption coefficient dispersion for multi-layer ITO films^[98,100-101]

表2列出了该器件p侧各层材料的导热系数^[103-106],具有隧道结结构的VCSEL结构如图14所示,结合表3和图14可以得到,氮化物的散热能力高于氧化物,使用TJ替代ITO可以有效改善散热。由于p-GaN对紫外波段的吸收高于n-GaN,所以对于TJ,可以减小p-GaN厚度以改善光学损耗,有效提升VCSEL的性

能。在 $12\ \mu\text{m}$ 的孔径下, TJ VCSEL 的峰值功率约为 $550\ \mu\text{W}$, 阈值电流密度约为 $3.5\ \text{kA}/\text{cm}^2$, 而 ITO VCSEL 的峰值功率约为 $80\ \mu\text{W}$, 阈值电流密度约为 $7\ \text{kA}/\text{cm}^2$ 。结果表明, TJ 结构的引入降低了 VCSEL 的阈值电流密度, 提高了峰值功率。

表 2 图 14 中双介质 DBR VCSEL 的 p 侧部分材料的典型室温导热系数
Table 2 Typical thermal conductivities for some of the materials on the p-side of the VCSEL in Fig. 18 at room-temperature

Material	Thermal conductivities/ $(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K})$	Reference
GaN	1.3	[106]
ITO	0.05	[103]
Ta ₂ O ₅	0.004 5	[104]
SiO ₂	0.007	[105]

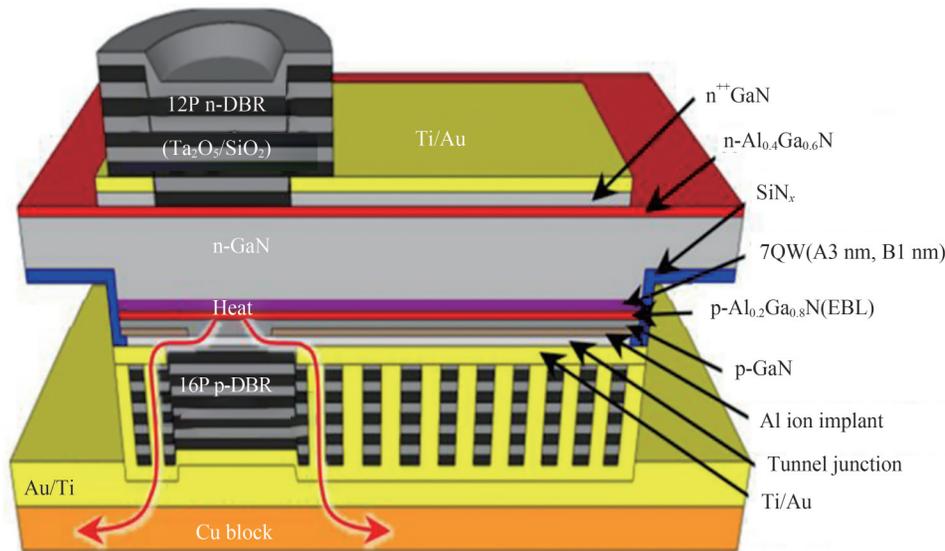


图 14 具有隧道结(TJ)结构的 VCSEL 结构示意图^[100]
Fig. 14 Schematic diagram of a VCSEL with TJ^[100]

2.2.2 载流子注入效率(载流子泄露、p 掺杂)

2.2.2.1 电子阻挡层

对于 AlGaIn 基 VCSEL, 由于 AlGaIn 的 p 型掺杂更加困难, 导致载流子非平衡注入有源区的情况严重, 电子从有源区泄露到 p 区也更严重。因此, 需要设计更优的电子阻挡层(EBL)来阻止电子泄露。由于在紫外 VCSEL 中, 尤其是深紫外波段, 电子势垒层需要与量子阱中的垒层形成有效的电子带阶, 材料可选择范围越来越小, 必须采用 AlN 或高 Al 组分 AlGaIn 层。

在 2014 年, MEHNKE F 等用 AlN 作为深紫外 LED 的 EBL^[107], 改善了电子泄露的问题和外量子效率。但是较厚的 AlN 会带来导电性不足的缺陷; 厚度变薄时, 又会增加电子隧穿的概率。

1986 年日本的伊贺健一等提出了多量子势垒(Multiquantum Barrier, MQB)的概念, 由于电子波动性明显, MQB 对电子波存在着干涉增强的作用, 合理设置各层厚度可使得对电子的反射率提高, 进而起到对电子的阻挡效果^[108]。2010 年, 日本的 HIRAYAMA H 等报道了将 MQB 引入深紫外 LED 来提高外量子效率^[109], 器件结构如图 15。通过将“有效”势垒高度增加了 30%~50%, 最终将 250~260 nm 波段 AlGaIn LED 的外量子效率(EQE)提高了 2.5 倍以上。这说明 MQB 结构的 EBL 可以有效改善深紫外 AlGaIn 发光器件的性能。

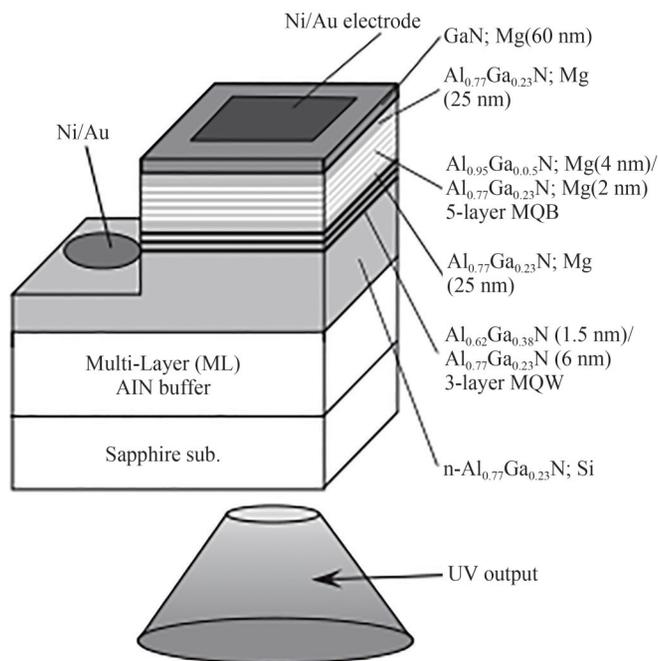


图 15 具有多量子势垒电子阻挡层的 250 nm AlGaIn 多量子阱 LED 的示意图结构^[109]
 Fig. 15 Structure of the 250 nm AlGaIn MQW LED with MQB EBL^[109]

2.2.2.2 p 型掺杂 AlGaIn 材料生长

在 GaN 基 VCSEL 中, p 型 AlGaIn 层的掺杂一直很难提高, 影响了空穴横向扩展能力, 所以需要额外的电流扩展层以改善电流拥堵问题。目前, 镁(Mg)是用于 III 族氮化物最普遍的 p 型掺杂剂。然而, 因为 Mg 受主的激活能大^[110], 获得高电导率 p 型 AlGaIn 层仍然比较困难。图 16 总结了 Mg 掺杂 AlGaIn 中的激活能与 Al 组分的变化关系^[111-116]。Mg 的激活能从 GaN 中的 ~170 meV 增加到 AlN 中的 630 meV。高的激活能意味着高 Al 组分氮化物在常温下只有少部分(约 1/10⁹)的 Mg 受主杂质热激活出空穴^[117], 这直接导致空穴浓度的下降, 电阻率增大。

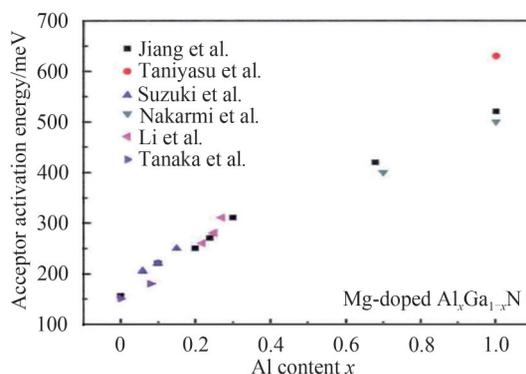


图 16 Mg 受主激活能大小随 Al 组分 x 的变化^[111-116]
 Fig. 16 Variation of Mg acceptor activation energy with Al component x ^[111-116]

其次, Mg 在 GaN 和 AlN 中的固溶度低, 影响了 AlGaIn 薄膜的有效掺杂效率。由于 AlN 中的 MgAl 形成焓比 GaN 中 MgGa 形成焓高得多, Mg 在 AlN 中的固溶度比在 GaN 中的固溶度低几十倍。因此, 随着 Al 组分增大, AlGaIn 薄膜中 Mg 固溶性问题变得愈加严重^[118-119]。在高 Al 组分 AlGaIn 薄膜中, 受固溶度的限制, Mg 原子的掺入量低, 因此相应的空穴浓度也更低。为了实现高空穴浓度, 实验上通常会增大 Mg 掺杂剂浓度(10²⁰~10²¹ cm⁻³)。然而, 随着 Mg 掺杂浓度的增大, 空穴浓度会先达到饱和; 若 Mg 掺杂浓度继续增大, 则空穴浓度会下降, 形成价带尾态和杂质带。同时, 当过量的 Mg 掺入时, 容易导致晶体质量变差, 大量缺陷充当空穴的俘获或者散射中心, 反而减小空穴浓度和迁移率^[120]。

最后,在p型AlGa_N材料中存在高密度的补偿缺陷,如氮空位 $V_N^{[121-122]}$, $Mg_{Ga}-V_N^{[123-124]}$,间隙Mg原子 $Mg_i^{[125]}$ 等。其中, Mg_{Ga} 代表占据Ga的Mg原子;而 V_N 作为受主补偿中心,常常导致p型Ga_N中出现2.92 eV光致蓝光峰。相比于Ga_N,由于 V_N 在AlN中的形成能更低, V_N 更容易形成 $^{[121,126]}$ 。通常间隙Mg在Ⅲ族氮化物中充当双施主 $^{[127]}$ 。由于p型AlGa_N中的大部分点缺陷充当施主角色,自补偿效应增强,导致载流子浓度和迁移率下降。此外,在MOCVD生长过程中,Mg掺杂同时会引入O和H杂质,其中,O通常充当施主,不利于p型导电,而形成的Mg-H络合物使Mg被钝化 $^{[128]}$,在Ga_N材料中Mg-H络合物的成键方式分别为(a)Mg_{Ga}-N-H,(b)Mg_iH₂,(c)Mg_{Ga}-N-Ga_i-H₂,(d)Mg_{Ga}-N-Mg_i-H $^{[129-130]}$ 。只有经过高温退火后或者电子束照射后才能实现激活,获得空穴载流子。

Ⅲ族氮化物的高效p型掺杂一直是国际性的难点,尤其对高Al组分的AlGa_N而言,由于受主能级位置随着Al组分增大而变深,获得低阻、高空穴浓度的难度显著增加。近年来,国际上对AlGa_N的p型掺杂研究,除了均匀Mg掺杂还包括:超晶格掺杂、Mg- δ 掺杂法、金属调制掺杂、渐变Al组分极化场掺杂以及其他掺杂剂等方法:

1) 超晶格掺杂近年来,调制掺杂的p型超晶格结构被用于提高Mg的激活效率。在窄带隙Ga_N层和宽带隙AlGa_N层构成的Ga_N/AlGa_N超晶格结构中,Mg均匀掺杂浓度达到 $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。由于能带结构的周期性改变,空穴可以扩散到窄带隙区,使整体空穴浓度增大。SIMON J等理论上预测 $^{[131]}$,接近50%的受主被激活,比未由能带调制的薄膜高出10倍左右。然而,如果AlGa_N层太厚,二维空穴气可能会聚集在超晶格界面处,这限制了自由空穴在垂直方向上的运输。为此,采用超薄AlGa_N层的短周期超晶格结构,通过量子隧穿或者热电发射过程实现空穴的垂直方向运输 $^{[132-133]}$ 。在应变界面的强极化场作用下,Al组分为60%以上的薄膜中,受主激活能降低了17 meV $^{[133]}$ 。这种短周期超晶格结构已经应用于AlGa_N基的深紫外LED器件中 $^{[134-136]}$ 。另外,NIKISHIN S A等提出了由AlN作为垒层(1.75~1.5 nm),Mg掺杂Al_{0.08}Ga_{0.92}N作为阱层(0.5~0.75 nm)所构成的短周期超晶格结构,实现了空穴浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,低电阻率为 $6 \Omega \cdot \text{cm}^{[137]}$ 。同时,Mg掺杂Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N短周期的超晶格结构也应用在紫外LED器件中 $^{[113]}$,作为透明p型电极且吸收率低。

2) δ 掺杂法是指在生长过程中,脉冲式进行Mg掺杂,使掺杂原子浓度在生长方向上呈现出类似 δ 函数分布的一种掺杂方法,即杂质只分布于掺杂层,其它区域为0。这样,Mg掺杂薄层减小了自补偿,提高了Mg在Al或者Ga位的并入 $^{[138]}$ 。这种方法有利于减小受主激活能,提高空穴浓度。CHEN Y D等提出在Mg的 δ 掺杂过程中采用In作为表面活性剂 $^{[139]}$,在Al组分高达40%的p型AlGa_N薄膜中,空穴载流子浓度达到 $4.75 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

3) 金属调制掺杂金属调制外延法(MME)适用于MBE生长。在生长过程中,Mg源和Ga源周期性地切换。NAMKOONG G等采用MME方法对Ga_N进行掺杂 $^{[140]}$,空穴浓度能够达到 10^{19} cm^{-3} 。但是,采用该方法生长无反相畴结构的高Al组分AlGa_N非常困难。而且,由于Mg_{Al}的形成能高,Mg原子不容易替换Al位置,因此,迄今采用该方法生长的p型AlGa_N中的最高Al组分仅为27%。

4) 渐变Al组分极化场掺杂由于AlGa_N属于极性材料,其异质结薄膜在某一晶格方向上具有内建电场。在异质结界面上存在的极性掺杂特征导致界面处出现一层高密度载流子。SIMON J等提出一种组分渐变的异质层 $^{[141]}$,电荷分布满足于 $\rho(z) = -\nabla \cdot \mathbf{P}(z)$ 。其中, $\rho(z)$ 为电荷密度, ∇ 为散射算符, $\mathbf{P}(z)$ 是极化强度。当Al_xGa_{1-x}N在(000 $\bar{1}$)面上,从Al组分 $x=0$ (Ga_N)渐变到 $x=1$ (AlN)生长时,此时薄膜存在着张应变,极化电荷为负电荷($\rho < 0$),相同数量的空穴会从各种受主杂质或者缺陷中产生来中和负电荷,效果类似于p型掺杂。

考虑改变Al组分渐变方向即从 $x=1$ (AlN)到 $x=0$ (Ga_N)渐变生长,ZHANG L等提出了在厚AlN缓冲层上生长组分渐变的AlGa_N层。由于厚AlN缓冲层可以被认为是完全弛豫,因此在Al极性面上没有应变,只存在自发极化现象 $^{[142]}$ 。由于存在晶格失配,在AlN缓冲层上生长的AlGa_N中的应变为压应变,存在自发极化和压电极化,在AlN/AlGa_N界面上的净电荷密度为负,导致渐变的AlGa_N层出现自由移动的空穴,类似于p型掺杂作用。目前,尽管该方法能够实现诱导产生空穴,但在器件应用方面,非故意掺杂下的载流子数量,尤其空穴数量不足 $^{[143-144]}$ 。但通过结合极化诱导方法与有意掺杂手段,能够获得接近简并的p型

掺杂效果。

5) 尝试其他掺杂剂由于Mg掺杂AlGa_{1-x}N生长困难,人们也在尝试其它可能的掺杂剂。2012年,KAWANISHI H等将碳作为掺杂剂制备p型AlGa_{1-x}N薄膜^[145],Al组分为10%时,其空穴浓度达到 $3.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。2013年,LI S等采用Be掺杂剂,用MBE生长出极化掺杂的线性渐变Al_xGa_{1-x}N(x 变化范围为70%~100%),诱导空穴浓度达到 10^{18} cm^{-3} ^[146]。

3 总结及展望

1979年VCSEL的问世标志着新型激光器的历史元年,而如今,距离实现第一个Ga_{1-x}N VCSEL已有二十多年,凭借着单色性好、方向性好、圆形光斑、可二维集成等优点,GaN VCSEL的应用场景已经覆盖了照明、通信、投影显示、光存储、医疗、微型原子钟及传感器等各个方面。

自从1995年HONDA T等首先对Ga_{1-x}N VCSEL的阈值特性进行理论计算研究以及1996年REDWING J M等实现第一个光泵Ga_{1-x}N VCSEL,世界各大研究机构对Ga_{1-x}N VCSEL的研究脚步就从未停止,之后的二十年,GaN VCSEL的研究进展迅猛。东京大学、布朗大学、日本NTT公司、厦门大学、台湾交通大学、瑞士洛桑理工大学等机构的研究小组也相继实现了各种结构Ga_{1-x}N VCSEL的光泵激射。2008年,台湾交通大学的王兴宗研究组成功实现了世界上第一支电注入Ga_{1-x}N VCSEL,标志着Ga_{1-x}N VCSEL发展的新纪元。随后越来越多的研究人员投入到电注入Ga_{1-x}N VCSEL的研发之中,如今蓝光和绿光VCSEL已经实现光泵和电泵激射,而紫外VCSEL已经延伸到了深紫外波段,目前为止实现了最短波长275.9 nm的光泵激射,电注入紫外VCSEL的解决方案还在研究当中。

对于紫外VCSEL,氮化镓(GaN)、氮化铝(AlN)及其三元合金的Ⅲ族氮化物,具有直接带隙宽、高击穿电压、高热稳定性以及高的发光效率,AlGa_{1-x}N在光学以及电学应用方面有着广阔的前景,值得进一步研究以及探索。随着氮化物VCSEL的探索逐渐向紫外和更短波长延伸,基于AlGa_{1-x}N材料的深紫外VCSEL是今后研究的热点。然而,基于AlGa_{1-x}N的紫外VCSEL具有极大的挑战性,存在不少困难:1)低位错密度、高晶体质量的AlGa_{1-x}N外延层的获得;2)低损伤的AlGa_{1-x}N外延片激光剥离工艺;3)良好的电流扩展结构,以减少载流子注入过程中的损耗;4)良好的光学限制结构,以减少光的损失;5)合适的电子阻挡层,减少载流子泄露以提高载流子注入效率;6)AlGa_{1-x}N的p型掺杂仍然是亟需解决的关键问题。虽然存在着不少技术困难,但基于AlGa_{1-x}N的紫外VCSEL的未来仍充满了机遇,随着紫外,特别是深紫外波段在医疗诊断、生化医学与防治、原子捕获、光谱学、激光光刻、激光高密度存储等重要的领域有着更大的需求,它将成为支持未来信息社会必不可少的关键组件。

参考文献

- [1] IGA K. Vertical-cavity surface-emitting laser: Its conception and evolution[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(1): 1-10.
- [2] IGA K. VCSEL-Its conception, development, and future[C]. Microoptics Conference, IEEE, 2013.
- [3] ZHANG Jiye, LI Xue, ZHANG Jianwei, et al. Research progress of vertical-cavity surface-emitting Laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(12): 1443-1459.
张继业, 李雪, 张建伟, 等. 垂直腔面发射激光器研究进展[J]. 发光学报, 2020, 41(12): 1443-1459.
- [4] WU Feng, DAI Jiangnan, CHEN Changqing. Research progress of AlGa_{1-x}N based deep ultraviolet light emitting diodes[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2020, 49(11): 2079-2097.
吴峰, 戴江南, 陈长清. AlGa_{1-x}N基深紫外发光二极管研究进展[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(11): 2079-2097.
- [5] SODA H, K-IIGA, KITAHARA C, et al. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [6] IGA K, KINOSHITA S, KOYAMA F. Microcavity GaAlAs/GaAs surface-emitting laser with I_{th}=6mA[J]. Electronics Letters, 1987, 23(3): 134-136.
- [7] KOYAMA F, KINOSHITA S, IGA K. Room-temperature continuous wave lasing characteristics of a GaAs vertical cavity surface-emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(3): 221-222.
- [8] CAI Lie, ZHANG Baoping, ZHANG Jiangyong, et al. Fabrication and characteristics of GaN-based blue VCSEL[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(4): 452-456.
蔡丽娥, 张保平, 张江勇, 等. GaN基蓝光VCSEL的制备及光学特性[J]. 发光学报, 2016, 37(4): 452-456.
- [9] YANG Tianrui, XU Huan, MEI Yang, et al. Development of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J].

- Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 151-165.
杨天瑞, 徐欢, 梅洋, 等. GaN垂直腔面发射激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 151-165.
- [10] AMANO H, KITO M, HIRAMATSU K, et al. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI) [J]. Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters & Express Letters, 1989, 28(12): L2112-L2114.
- [11] NAKAMURA S. GaN growth using GaN buffer layer[J]. Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters & Express Letters, 1991, 30(10A): L1705-L1707.
- [12] REDWING J M, LOEBER D A S, ANDERSON N G, et al. An optically pumped GaN - AlGaIn vertical cavity surface emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(1): 1-3.
- [13] TIEN CHANG L, RONG CJUN, SHIH WEI C, et al. Development of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(3): 850-860.
- [14] CHIOU S W, LEE Y C, CHANG C S, et al. High speed red RCLEDs and VCSELs for plastic optical fiber application [C]. SPIE, 2005:129-133.
- [15] LI CY, LU HH, TSAI WS, et al. A 5 m/25 Gbps underwater wireless optical communication system [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3):1-9.
- [16] KNEISSL M, RASS J. III-Nitride ultraviolet emitters[M]. Springer, 2016.
- [17] KHAN M A, MAEDA N, JO M, et al. 13 mW operation of a 295 - 310 nm AlGaIn UV-B LED with a p-AlGaIn transparent contact layer for real world applications[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(1): 143-152.
- [18] HONDA T, KATSUBE A, SAKAGUCHI T, et al. Threshold estimation of GaN-based surface emitting lasers operating in ultraviolet spectral region[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1995, 34(7A): 3527-3532.
- [19] SOMEYA T, WERNER R, FORCHEL A, et al. Room temperature lasing at blue wavelengths in gallium nitride microcavities[J]. Science, 1999, 285(5435): 1905-1906.
- [20] SOMEYA T, TACHIBANA K, LEE J, et al. Lasing emission from an In_{0.1}Ga_{0.9}N vertical cavity surface emitting laser [J]. Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters, 1998, 37(12A): L1424-L1426.
- [21] SONG Y K, ZHOU H, DIAGNE M, et al. A quasicontinuous wave, optically pumped violet vertical cavity surface emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(13): 1662-1664.
- [22] TAWARA T, GOTOH H, AKASAKA T, et al. Low-threshold lasing of InGaIn vertical-cavity surface-emitting lasers with dielectric distributed Bragg reflectors[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(5): 830-832.
- [23] CAI L E, ZHANG J Y, ZHANG B P, et al. Blue-green optically pumped GaN-based vertical cavity surface emitting laser[J]. Electronics Letters, 2008, 44(16): 972-974.
- [24] CHU JT, LU TC, YOU M, et al. Emission characteristics of optically pumped GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(12): 121112.
- [25] FELTIN E, CHRISTMANN G, DORSAZ J, et al. Blue lasing at room temperature in an optically pumped lattice-matched AlInN/GaN VCSEL structure[J]. Electronics Letters, 2007, 43(17): 924-926.
- [26] LU T C, KAO C C, KUO H C, et al. CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting laser [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(14): 141102.
- [27] LI Fangzhi, HU Lei, TIAN Aiqin, et al. Current status and future trends of gan-based blue and green laser diodes[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2020, 49(11): 1996-2012.
李方直, 胡磊, 田爱琴, 等. GaN基蓝绿光激光器发展现状与未来发展趋势[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(11): 1996-2012.
- [28] KRESTNIKOV I L, LUNDIN W V, SAKHAROV A V, et al. Room-temperature photopumped InGaIn/GaN/AlGaIn vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(9): 1192-1194.
- [29] HIGUCHI Y, OMAE K, MATSUMURA H, et al. Room-temperature CW lasing of a GaN-Based vertical-cavity surface-emitting laser by current injection[J]. Applied Physics Express, 2008, 1(12): 121102.
- [30] LIU W J, HU X L, YING L Y, et al. Room temperature continuous wave lasing of electrically injected GaN-based vertical cavity surface emitting lasers[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(25): 251116.
- [31] IZUMI S, FUUTAGAWA N, HAMAGUCHI T, et al. Room-temperature continuous-wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated using epitaxial lateral overgrowth[J]. Applied Physics Express, 2015, 8(6): 062702.
- [32] KURAMOTO M, KOBAYASHI S, AKAGI T, et al. High-power GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with AlInN/GaN distributed Bragg reflectors[J]. Applied Sciences, 2019, 9(3): 416-429.
- [33] MURANAGA W, AKAGI T, FUWA R, et al. GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers using n-type conductive AlInN/GaN bottom distributed Bragg reflectors with graded interfaces [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58(SC): SCCC01.
- [34] KURAMOTO M, KOBAYASHI S, TAZAWA K, et al. In-phase supermode operation in GaN-based vertical-cavity

- surface-emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(4): 041101.
- [35] KURAMOTO M, KOBAYASHI S, AKAGI T, et al. Watt-class blue vertical-cavity surface-emitting laser arrays[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(9): 091004.
- [36] HAMAGUCHI T, NAKAJIMA H, TANAKA M, et al. Sub-milliamper threshold continuous wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser with lateral optical confinement by curved mirror[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(4): 044004.
- [37] KURAMOTO M, KOBAYASHI S, AKAGI T, et al. Nano-height cylindrical waveguide in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Applied Physics Express, 2020, 13(8): 082005.
- [38] KEARNS J A, PALMQUIST N C, BACK J, et al. Blue semipolar III-nitride vertical-cavity surface-emitting lasers[C]. SPIE, 2020.
- [39] CHANG T C, HASHEMI E, HONG K B, et al. Electrically injected GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with TiO₂ high-index-contrast grating reflectors[J]. ACS Photonics, 2020, 7(4): 861-866.
- [40] LIU Lixin, ZHAO Hongdong, NIU Hanben. Influences of N-DBR and double oxide-confined regions on the characteristics of electrical, optical and thermal fields in VCSEL[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, (3): 325-329.
刘立新, 赵红东, 牛憨笨. N-DBR和双氧化限制层对VCSEL电、光、热特性的影响[J]. 光子学报, 2006, (3): 325-329.
- [41] XU R, MEI Y, XU H, et al. Effects of lateral optical confinement In GaN VCSELs with double dielectric DBRs[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-8.
- [42] ELAFANDY R T, KANG J H, LI B, et al. Room-temperature operation of c-plane GaN vertical cavity surface emitting laser on conductive nanoporous distributed Bragg reflector[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(1): 011101.
- [43] XU H, MEI Y, XU R B, et al. Green VCSELs based on nitride semiconductors[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2020, 59(SO): SO0803.
- [44] LANGER T, KRUSE A, KETZER F A, et al. Origin of the "green gap": Increasing nonradiative recombination in indium-rich GaInN/GaN quantum well structures[J]. Physica Status Solidi C, 2011, 8(7-8): 2170-2172.
- [45] WENG G, MEI Y, LIU J, et al. Low threshold continuous-wave lasing of yellow-green InGaN-QD vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Optics Express, 2016, 24(14): 15546-15553.
- [46] MEI Y, WENG G E, ZHANG B P, et al. Quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers covering the 'green gap' [J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(1): e16199.
- [47] XU R B, MEI Y, ZHANG B P, et al. Simultaneous blue and green lasing of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Semiconductor Science and Technology, 2017, 32(10): 105012.
- [48] XU R, MEI Y, XU H, et al. Green vertical-cavity surface-emitting lasers based on combination of blue-emitting quantum wells and cavity-enhanced recombination[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(10): 4401-4406.
- [49] HAMAGUCHI T, HOSHINA Y, HAYASHI K, et al. Room-temperature continuous-wave operation of green vertical-cavity surface-emitting lasers with a curved mirror fabricated on {20-21} semi-polar GaN[J]. Applied Physics Express, 2020, 13(4): 041002.
- [50] LEROUX M, DALMASSO S, NATALI F, et al. Optical characterization of Al(x)Ga(1-x)N alloys (x < 0.7) grown on sapphire or silicon[J]. Physica Status Solidi B-Basic Solid State Physics, 2002, 234(3): 887-891.
- [51] HIDA K, KAWASHIMA T, MIYAZAKI A, et al. 350.9 nm UV laser diode grown on low-dislocation-density AlGaIn [J]. Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters & Express Letters, 2004, 43(4a): L499-L500.
- [52] SHATALOV M, GAEVSKI M, ADIVARAHAN V, et al. Room-temperature stimulated emission from AlN at 214 nm [J]. Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters & Express Letters, 2006, 45(46-50): L1286-L1288.
- [53] TAKANO T, NARITA Y, HORIUCHI A, et al. Room-temperature deep-ultraviolet lasing at 241.5 nm of AlGaIn multiple-quantum-well laser[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(18): 3567-3569.
- [54] YOSHIDA H, YAMASHITA Y, KUWABARA M, et al. Demonstration of an ultraviolet 336 nm AlGaIn multiple-quantum-well laser diode[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(24): 241106.
- [55] ZHANG Z Z, KUSHIMOTO M, SAKAI T, et al. A 271.8 nm deep-ultraviolet laser diode for room temperature operation[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(12): 124003.
- [56] ZHOU H L, DIAGNE M, MAKARONA E, et al. Near ultraviolet optically pumped vertical cavity laser[J]. Electronics Letters, 2000, 36(21): 1777-1779.
- [57] CHEN R, SUN H D, WANG T, et al. Optically pumped ultraviolet lasing from nitride nanopillars at room temperature [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(24): 241101.
- [58] LIU Y S, KAO T T, MEHTA K, et al. Development for ultraviolet vertical cavity surface emitting lasers[C]. SPIE, 2016.
- [59] LIU Y S, SANIUL HAQ A F M, MEHTA K, et al. Optically pumped vertical-cavity surface-emitting laser at 374.9 nm with an electrically conducting n-type distributed Bragg reflector[J]. Applied Physics Express, 2016, 9(11): 111002.

- [60] CHANG T C, KUO S Y, HASHEMI E, et al. GaN vertical-cavity surface-emitting laser with a high-contrast grating reflector[C]. SPIE, 2018.
- [61] PARK Y J, DETCHPROHM T, MEHTA K, et al. Optically pumped vertical-cavity surface-emitting lasers at 375 nm with Air-Gap/Al_{0.05}Ga_{0.95}N distributed bragg reflectors[C]. SPIE, 2019.
- [62] MEI Y, YANG T R, OU W, et al. Low-threshold wavelength-tunable ultraviolet vertical-cavity surface-emitting lasers from 376 to 409 nm[J]. Fundamental Research, 2021, 1(6): 685-691.
- [63] HJORT F, ENSLIN J, COBET M, et al. A 310 nm optically pumped AlGa_N vertical-cavity surface-emitting laser[J]. ACS Photonics, 2021, 8(1): 135-141.
- [64] PAUL O, LI Y, ZHENG Z. Loss analysis in nitride deep ultraviolet planar cavity[J]. Journal of Nanophotonics, 2018, 12(4): 043504.
- [65] ZHENG Z, MEI Y, LONG H, et al. AlGa_N-based deep ultraviolet vertical-cavity surface-emitting laser [J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(3): 375-378.
- [66] DETCHPROHM T, LI X, SHEN S C, et al. III-N Wide Bandgap Deep-Ultraviolet Lasers and Photodetectors[M]. Amsterdam;Elsevier, 2017: 121-166.
- [67] GAO H J, NIX W D. Surface roughening of heteroepitaxial thin films[J]. Annual Review of Materials Science, 1999, 29(1): 173-209.
- [68] BAN K, YAMAMOTO J, TAKEDA K, et al. Internal quantum efficiency of whole-composition-range AlGa_N multiquantum wells[J]. Applied Physics Express, 2011, 4(5): 052101.
- [69] KAMIYAMA S, IWAYA M, HAYASHI N, et al. Low-temperature-deposited AlGa_N interlayer for improvement of AlGa_N/Ga_N heterostructure[J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 223(1-2): 83-91.
- [70] AMANO H, SAWAKI N, AKASAKI I, et al. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality Ga_N film using an AlN buffer layer[J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(5): 353-355.
- [71] BYKHOVSKI A D, GELMONT B L, SHUR M S. Elastic strain relaxation and piezoeffect in Ga_N-AlN, Ga_N-AlGa_N and Ga_N-InGa_N superlattices[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(9): 6332-6338.
- [72] WANG H M, ZHANG J P, CHEN C Q, et al. AlN/AlGa_N superlattices as dislocation filter for low-threading-dislocation thick AlGa_N layers on sapphire[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(4): 604-606.
- [73] ZHANG J, WANG H M, GAEVSKI M E, et al. Crack-free thick AlGa_N grown on sapphire using AlN/AlGa_N superlattices for strain management[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(19): 3542-3544.
- [74] ZEIMER U, KUELLER V, KNAUER A, et al. High quality AlGa_N grown on ELO AlN/sapphire templates [J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 377: 32-36.
- [75] VENNEGUES P, BOUGRIOUA Z, BETHOUX J M, et al. Relaxation mechanisms in metal-organic vapor phase epitaxy grown Al-rich (Al,Ga)N/Ga_N heterostructures[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(2): 024912.
- [76] SUN X, LI D, CHEN Y, et al. In situ observation of two-step growth of AlN on sapphire using high-temperature metal-organic chemical vapour deposition[J]. CrystEngComm, 2013, 15(30): 6066-6073.
- [77] YOSHIKAWA A, NAGATOMI T, MORISHITA T, et al. High-quality AlN film grown on a nanosized concave-convex surface sapphire substrate by metalorganic vapor phase epitaxy [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(16): 162102.
- [78] R-DMARCOS L V, LARRUQUERT J I, MÉNDEZ J A, et al. Self-consistent optical constants of SiO₂ and Ta₂O₅ films [J]. Optical Materials Express, 2016, 6(11): 3622-3637.
- [79] HAKOE F, TOKORO H, OHKOSHI S. Dielectric and optical constants of lambda-Ti₅O₅ film measured by spectroscopic ellipsometry[J]. Materials Letters, 2017, 188: 8-12.
- [80] KRUCHININ V N, PEREVALOV T V, ATUCHIN V V, et al. Optical properties of TiO₂ films deposited by reactive electron beam sputtering[J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(10): 6089-6095.
- [81] CHEN M, ZHANG J Y, LV X Q, et al. Effect of laser pulse width on the laser lift-off process of Ga_N films[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(1):014203.
- [82] AOSHIMA H, TAKEDA K, TAKEHARA K, et al. Laser lift-off of AlN/sapphire for UV light-emitting diodes [J]. Physica Status Solidi C: Current Topics in Solid State Physics, 2012, 9(3-4): 753-756.
- [83] UEDA T, ISHIDA M, YURI M. Laser lift-off of very thin AlGa_N film from sapphire using selective decomposition of Ga_N interlayer[J]. Applied Surface Science, 2003, 216(1-4): 512-518.
- [84] GUO W, KIRSTE R, BRYAN I, et al. KOH based selective wet chemical etching of AlN, Al_xGa_{1-x}N, and Ga_N crystals: A way towards substrate removal in deep ultraviolet-light emitting diode [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(8): 082110.
- [85] KHARE R, HU E L, BROWN J J, et al. Micromachining in III-V semiconductors using wet photoelectrochemical etching[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1993, 11(6): 2497-2501.
- [86] TAMBOLI A C, SCHMIDT M C, HIRAI A, et al. Photoelectrochemical undercut etching of m-Plane Ga_N for

- microdisk applications[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2009, 156(10): H767-H771.
- [87] HABERER E D, SHARMA R, STONAS A R, et al. Removal of thick (> 100 nm) InGa_N layers for optical devices using band-gap-selective photoelectrochemical etching[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(5): 762-764.
- [88] YOUTSEY C, MCCARTHY R, REDDY R, et al. Wafer-scale epitaxial lift-off of GaN using bandgap-selective photoenhanced wet etching[J]. *Physica Status Solidi B-Basic Solid State Physics*, 2017, 254(8): 1600774.
- [89] TAUTZ M, DIAZ D D. Wet-chemical etching of GaN: underlying mechanism of a key step in blue and white LED production[J]. *Chemistryselect*, 2018, 3(5): 1480-1494.
- [90] ARITA M, KAKO S, IWAMOTO S, et al. Fabrication of AlGa_N two-dimensional photonic crystal nanocavities by selective thermal decomposition of GaN[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(12): 126502.
- [91] OGAWA K, HACHIYA R, MIZUTANI T, et al. Fabrication of InGa_N/Ga_N MQW nano-LEDs by hydrogen-environment anisotropic thermal etching[J]. *Physica Status Solidi a-Applications and Materials Science*, 2017, 214(3): 1600613.
- [92] KOUNO T, SAKAI M, TAKESHIMA H, et al. Microsensors based on a whispering gallery mode in AlGa_N microdisks undercut by hydrogen-environment thermal etching[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3589-3593.
- [93] KITA R, HACHIYA R, MIZUTANI T, et al. Characterization of hydrogen environment anisotropic thermal etching and application to Ga_N nanostructure fabrication[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015, 54(4): 046501.
- [94] LI H, WOLF P, MOSER P, et al. Vertical-cavity surface-emitting lasers for optical interconnects[J]. *SPIE Newsroom*, 2014: 25.
- [95] CLINTON E A, ENGEL Z, VADIEE E, et al. Ultra-wide-bandgap AlGa_N homojunction tunnel diodes with negative differential resistance[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(8): 082104.
- [96] KUHN C, SULMONI L, GUTTMANN M, et al. MOVPE-grown AlGa_N-based tunnel heterojunctions enabling fully transparent UVC LEDs[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(5): B7-B11.
- [97] ZHANG Y, JAMAL-EDDINE Z, AKYOL F, et al. Tunnel-injected sub 290 nm ultra-violet light emitting diodes with 2.8% external quantum efficiency[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(7): 071107.
- [98] MALINVERNI M, MARTIN D, GRANDJEAN N. InGa_N based micro light emitting diodes featuring a buried Ga_N tunnel junction[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(5): 051107.
- [99] LEONARD J T, YOUNG E C, YONKEE B P, et al. Demonstration of a III-nitride vertical-cavity surface-emitting laser with a III-nitride tunnel junction intracavity contact[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(9): 091105.
- [100] LEONARD J T, FUJIOKA H, MORKOÇ H, et al. Comparison of nonpolar III-nitride vertical-cavity surface-emitting lasers with tunnel junction and ITO intracavity contacts[C]. *Gallium Nitride Materials and Devices XI*, 2016.
- [101] LEONARD J T, COHEN D A, YONKEE B P, et al. Smooth e-beam-deposited tin-doped indium oxide for III-nitride vertical-cavity surface-emitting laser intracavity contacts[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(14): 4931883.
- [102] LEONARD J T, COHEN D A, YONKEE B P, et al. Nonpolar III-nitride vertical-cavity surface-emitting lasers incorporating an ion implanted aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(1): 145304.
- [103] ASHIDA T, MIYAMURA A, OKA N, et al. Thermal transport properties of polycrystalline tin-doped indium oxide films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(7): 073709.
- [104] WU Z L, REICHLING M, HU X Q, et al. Absorption and thermal conductivity of oxide thin films measured by photothermal displacement and reflectance methods[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(28): 5660-5665.
- [105] CAHILL D G, ALLEN T H. Thermal conductivity of sputtered and evaporated SiO₂ and TiO₂ optical coatings[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 65(3): 309-311.
- [106] PIPREK J, DEVICES S C O. *Semiconductor optoelectronic devices: introduction to physics and simulation* [M]. California: Elsevier, 2013.
- [107] MEHNKE F, KUHN C, GUTTMANN M, et al. Efficient charge carrier injection into sub-250 nm AlGa_N multiple quantum well light emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 051113.
- [108] IGA K, UENOHARA H, KOYAMA F. Electron reflectance of multiquantum barrier(MQB)[J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(19): 1008-1010.
- [109] HIRAYAMA H, TSUKADA Y, MAEDA T, et al. Marked enhancement in the efficiency of deep-ultraviolet AlGa_N light-emitting diodes by using a multiquantum-barrier electron blocking layer[J]. *Applied Physics Express*, 2010, 3(3): 031002.
- [110] LYONS J L, JANOTTI A, DE WALLE C G VAN. Effects of carbon on the electrical and optical properties of In_N, Ga_N, and Al_N[J]. *Physical Review B*, 2014, 89(3): 035204.
- [111] TANAKA T, WATANABE A, AMANO H, et al. p-type conduction in Mg-doped Ga_N and Al_{0.08}Ga_{0.92}N grown by metalorganic vapor phase epitaxy[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 65(5): 593-594.
- [112] LI J, ODER T, NAKARMI M, et al. Optical and electrical properties of Mg-doped p-type Al_xGa_{1-x}N[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(7): 1210-1212.

- [113] SUZUKI M, NISHIO J, ONOMURA M, et al. Doping characteristics and electrical properties of Mg-doped AlGa_N grown by atmospheric-pressure MOCVD[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1998, 189: 511-515.
- [114] TANIYASU Y, KASU M, MAKIMOTO T. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres[J]. *Nature*, 2006, 441(7091): 325-328.
- [115] JIANG H X, LIN J Y. Hexagonal boron nitride for deep ultraviolet photonic devices[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, 29(8): 084003.
- [116] NAKARMI M L, NEPAL N, UGOLINI C, et al. Correlation between optical and electrical properties of Mg-doped AlN epilayers[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(15): 152120.
- [117] NAM K B, NAKARMI M L, LI J, et al. Mg acceptor level in AlN probed by deep ultraviolet photoluminescence[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(5): 878-880.
- [118] ZHENG T, LIN W, CAI D, et al. High Mg effective incorporation in Al-rich Al_xGa_{1-x}N by periodic repetition of ultimate V/III ratio conditions[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2014, 9(1): 1-7.
- [119] STAMPFL C, DE WALLE C G VAN. Theoretical investigation of native defects, impurities, and complexes in aluminum nitride[J]. *Physical Review B*, 2002, 65(15): 155212.
- [120] CHAKRABORTY A, MOE C G, WU Y, et al. Electrical and structural characterization of Mg-doped p-type Al_{0.69}Ga_{0.31}N films on SiC substrate[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(5): 053717.
- [121] DE WALLE C G, STAMPFL C, NEUGEBAUER J. Theory of doping and defects in III-V nitrides[J]. *Journal of Crystal Growth* 1998, 189: 505-510.
- [122] KOZODOY P, KELLER S, DENBAARS S, et al. MOVPE growth and characterization of Mg-doped GaN [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1998, 195(1-4): 265-269.
- [123] HAUTAKANGAS S, SAARINEN K, LISZKAY L, et al. Role of open volume defects in Mg-doped GaN films studied by positron annihilation spectroscopy[J]. *Physical Review B*, 2005, 72(16): 165303.
- [124] HAUTAKANGAS S, OILA J, ALATALO M, et al. Vacancy defects as compensating centers in Mg-doped GaN[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(13): 137402.
- [125] KAUFMANN U, SCHLOTTER P, OBLOH H, et al. Hole conductivity and compensation in epitaxial GaN : Mg layers[J]. *Physical Review B*, 2000, 62(16): 10867-10872.
- [126] STAMPFL C, DE WALLE C G VAN. Doping of Al_xGa_{1-x}N[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(4): 459-461.
- [127] XU Qingjun. Study on MOCVD growth of high Al fraction AlGa_N and p-type doping of AlGa_N films[D]. Nanjing : Nanjing University, 2019.
徐庆君. 高 Al 组分 AlGa_N 薄膜的 MOCVD 生长及 p 型掺杂研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [128] GOTZ W, JOHNSON N M, WALKER J, et al. Hydrogen passivation of Mg acceptors in GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(18): 2666-2668.
- [129] NEUGEBAUER J, DE WALLE C G. Hydrogen in GaN: Novel aspects of a common impurity [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(24): 4452-4455.
- [130] REBOREDO F A, PANTELIDES S T. Novel defect complexes and their role in the p-type doping of GaN[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(9): 1887-1890.
- [131] SIMON J, CAO Y, JENA D. Short-period AlN/GaN p-type superlattices: hole transport use in p-n junctions [C]. *Physica Status Solidi C-Current Topics in Solid State Physics*, 2009.
- [132] CHENG B, CHOI S, NORTHRUP J E, et al. Enhanced vertical and lateral hole transport in high aluminum-containing AlGa_N for deep ultraviolet light emitters[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(23): 231106.
- [133] MARTENS M, KUHN C, ZIFFER E, et al. Low absorption loss p-AlGa_N superlattice cladding layer for current-injection deep ultraviolet laser diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(15): 151108.
- [134] NIKISHIN S A, HOLTZ M, TEMKIN H. Digital alloys of AlN/AlGa_N for deep UV light emitting diodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Brief Communications & Review Papers*, 2005, 44(10): 7221-7226.
- [135] TAHTAMOUNI T MAL, LIN J Y, JIANG H X. Effects of Mg-doped AlN/AlGa_N superlattices on properties of p-GaN contact layer and performance of deep ultraviolet light emitting diodes[J]. *Aip Advances*, 2014, 4(4): 047122.
- [136] LIANG Y H, TOWE E. Heavy Mg-doping of (Al, Ga) N films for potential applications in deep ultraviolet light-emitting structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(9): 095303.
- [137] BAYRAM C, PAU J L, MCCLINTOCK R, et al. Delta-doping optimization for high quality p-type GaN[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(8): 083512.
- [138] NAKARMI M L, KIM K H, LI J, et al. Enhanced p-type conduction in GaN and AlGa_N by Mg-delta-doping[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(18): 3041-3043.
- [139] CHEN Y, WU H, HAN E, et al. High hole concentration in p-type AlGa_N by indium-surfactant-assisted Mg-delta doping[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16): 162102.

- [140] NAMKOONG G, TRYBUS E, LEE K K, et al. Metal modulation epitaxy growth for extremely high hole concentrations above 10^{19} cm⁻³ in GaN[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(17): 172112.
- [141] SIMON J, PROTASENKO V, LIAN C, et al. Polarization-induced hole doping in wide-band-gap uniaxial semiconductor heterostructures[J]. Science, 2010, 327(5961): 60-64.
- [142] ZHANG L, DING K, YAN J C, et al. Three-dimensional hole gas induced by polarization in (0001)-oriented metal-face III-nitride structure[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(6): 062103.
- [143] SUN H, MOUSTAKAS T D. UV emitters based on an AlGaIn p-n junction in the form of graded-index separate confinement heterostructure[J]. Applied Physics Express, 2014, 7(1): 012104.
- [144] SUN H, PECORA E F, WOODWARD J, et al. Effect of indium in Al_{0.65}Ga_{0.35}N/Al_{0.8}Ga_{0.2}N MQWs for the development of deep-UV laser structures in the form of graded-index separate confinement heterostructure (GRINSCH) [J]. Physica Status Solidi a-Applications and Materials Science, 2016, 213(5): 1165-1169.
- [145] KAWANISHI H. Carbon-doped p-type (0001) plane AlGaIn (Al=0.06 to 0.55) with high hole density[C]. SPIE, 2012.
- [146] LI S, ZHANG T, WU J, et al. Polarization induced hole doping in graded Al_xGa_{1-x}N ($x=0.7\sim 1$) layer grown by molecular beam epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(6): 062108.

Development and Challenges of Nitride Vertical-cavity Surface-emitting Lasers (Invited)

WANG Yukun, ZHENG Zhongming, LONG Hao, MEI Yang, ZHANG Baoping
(School of Electronic Science and Engineering (National Model Microelectronics College), Xiamen University,
Xiamen 361005, China)

Abstract: There are many kinds of semiconductor lasers, such as Distributed Feedback Laser Diode (DFB-LD), Edge Emitting Laser (EEL) and Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL). Among them, VCSEL has many advantages such as large-scale two-dimensional integration, circular far-field spot, single longitudinal mode output, low power consumption, on-wafer testing, low threshold, small divergence angle, high modulation rate and so on. Hence, VCSEL has attracted the attention of many researchers.

VCSEL has a history for more than 40 years. It was proposed firstly by Kenichi Iga of the University of Tokyo in 1977. After more than 40 years of research by scientists, applications and development of GaN-based VCSELs have been in the fast lane, including lighting, communication, projection display, optical storage, medical treatment, micro atomic clock and sensor.

Nitride is an ideal material for manufacturing optoelectronic devices in ultraviolet to near infrared. Wherein, Aluminum Gallium Nitride (AlGaIn) is one of the important materials for nitride semiconductors. Its bandgap is continuously adjustable from 3.4 (GaN) to 6.2 eV (AlN), corresponding 365 to 200 nm. It is an ideal material for fabricating ultraviolet VCSEL from near ultraviolet to deep ultraviolet. After nearly 20 years of rapid development, AlGaIn-based VCSELs have become the research hotspots of semiconductor lasers.

Recently, violet to yellow green VCSELs have been demonstrated with electrical pumping, while there are only a few reports about ultraviolet (UV) VCSELs with optically pumping. Comparing with the visible nitride VCSELs, the development of UV VCSELs faces many challenges, especially in deep ultraviolet (DUV) range (< 280 nm), including obtaining high crystalline quality AlGaIn epilayer, DBR fabrication, sapphire substrate removal, reducing surface roughness, current spreading structure, high carrier injection efficiency, high doping level of p-AlGaIn, and ohmic contact with p-AlGaIn layer. Firstly, AlGaIn epilayer with higher Al component is desired. However, with the increase of Al composition, the growth of AlGaIn epilayer become more difficult, because of high growth temperature, and low surface migration speed of Al element. Secondly, it is difficult to prepare high-quality nitride DBR with high reflectivity in UV range, which is results from the lattice mismatch, thermal expansion coefficient mismatch, uneven in-plane components and small refractive index difference. Thirdly, dielectric DBR is easy to fabricate, however, it requires substrate removal, which is hard to realize. It also absorbs light in

DUV. For electrically pumped AlGaIn-based VCSELs, the fabrication is more complex and difficult than that of optically pumped, and more challenges need to be overcome. Firstly, high p doping level AlGaIn is difficult to obtain, because Mg element is hard to dissolve in AlGaIn material, and the activation energy increases with Al component (~ 200 meV in GaN, ~ 630 meV in AlN). As a consequence, the conductivity of p-AlGaIn is low. Secondly, the current spreading structure is required to provide sufficient and stable carriers into the active region, so as to achieve population inversion, and form a continuous output laser. The current spreading layer in VCSEL should be of high conductivity and low optical absorption, which is obstructed by the p doping problem. Thirdly, carrier injection efficiency is often reduced by electron overflowing from active region and low hole injection into active region. For short wavelength VCSELs, especially in DUV, electron leakage is more serious, and hole concentration in p-AlGaIn is much lower. Therefore, reasonable design of Electron Barrier Layer (EBL) should be considered, and increasing p doping level is desired.

Although there are many technical difficulties, the prospect of AlGaIn-based UV VCSEL is still full of opportunities. As the ultraviolet devices, especially in DUV, have great demand in many applications, such as medical diagnosis, biochemical medicine and prevention, atomic capture, spectroscopy, laser lithography, laser high density storage and other important fields, it will be a key component essential to supporting the information society in the future.

In this paper, the history of GaN-based VCSELs was reviewed, and its main applications were briefly introduced. Then, the research progress of blue, green and ultraviolet VCSELs was also introduced. Finally, the challenges and difficulties in the development of optically pumped and electrically pumped ultraviolet VCSELs were analyzed, and the improvement and optimization methods were briefly introduced.

Key words: Semiconductor devices and technology; Vertical-cavity surface emitting laser; Nitride; Ultraviolet; Optoelectronic Device; Laser; AlGaIn

OCIS Codes: 140.7260; 140.3610; 140.5960; 160.6000; 160.2100