

GaN基绿光激光二极管发展现状及趋势

杜小娟¹, 刘晶², 董海亮³, 贾志刚³, 张爱琴⁴, 梁建¹, 许并社^{3,5}

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

(2. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

(3. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

(4. 太原理工大学轻纺工程学院, 山西 太原 030024)

(5. 陕西科技大学 材料原子·分子科学研究所, 陕西 西安 710021)

摘要: 由于氮化镓(GaN)基半导体材料在外延生长技术、外延结构设计方面取得了显著的成果, GaN基绿光激光二极管已广泛应用在激光显示、光纤通信、生物医疗器件和光数据存储等领域。综述了绿光激光二极管的发展历程及研究现状; 重点详述了导致GaN基绿光激光二极管输出功率低、光束质量差及可靠性差等问题的关键因素及解决方法; 探讨了绿光波段量子阱的高In组分导致GaN基激光二极管光电性能骤降方面的问题; 总结了制备高性能GaN基绿光激光二极管所面临的挑战仍是外延材料质量差、载流子泄漏严重和强极化效应引起的激射效率低等难题。同时, 展望了GaN基绿光激光二极管向智能化和模块化方向发展的趋势以及研究重点。

关键词: GaN基绿光激光二极管; 输出功率; 光束质量; 可靠性; 外延结构

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)07-0597-08

引用格式: 杜小娟, 刘晶, 董海亮, 等. GaN基绿光激光二极管发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2023, 42(7): 597-604.

DU X J, LIU J, DONG H L, *et al.* Development Status and Trend of GaN-Based Green Laser Diode[J]. Materials China, 2023, 42(7): 597-604.

Development Status and Trend of GaN-Based Green Laser Diode

DU Xiaojuan¹, LIU Jing², DONG Hailiang³, JIA Zhigang³,
ZHANG Aiqin⁴, LIANG Jian¹, XU Bingshe^{3,5}

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Aerospace Science and Technology Defense Technology Research and Experimental Center, Beijing 100854, China)

(3. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials Ministry of Education,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(4. College of Textile Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(5. Institute of Atomic and Molecular Science, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Since the obvious progress of GaN-based semiconductor materials in epitaxial growth and epitaxial structure design, GaN-based green laser diode has been widely used in

laser displays, optical fiber communication, biomedical instruments, optical data storage and other fields. The development and research progress of green laser diode were reviewed in this work. The key factors affecting the low output power, poor beam quality and poor reliability of GaN based green laser diodes and their solutions were described in detail. The photoelectric performance droop for GaN-based green laser diode with high In composition in quantum well were discussed. The challenges of achieving high performance green laser diode are poor quality of epitaxied materials, serious carrier leakage and low radiation recombination caused by strong polarization effect were summarized. The

收稿日期: 2021-08-08 **修回日期:** 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61904120, 21972103); 国家重点研发计划项目(2016YFB0401803); 山西省基础研究项目(201901D1111111)

第一作者: 杜小娟, 女, 1997年生, 硕士

通讯作者: 董海亮, 男, 1984年生, 高级实验师, 硕士生导师,
Email: dhltyut@163.com

梁建, 男, 1964年生, 副教授, 硕士生导师,
Email: liangj1220@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202108006

research emphasis and the future trend of smarter and more modular of GaN-based green laser diode were prospected.

Key words: GaN-based green laser diodes; output power; beam quality; reliability; epitaxial structure

1 前言

从 1995 年第一支半导体激光二极管 (laser diode, LD) 诞生至今, 半导体 LD 在医疗、通讯、激光显示等方面得到广泛应用, 且逐渐向高功率、智能化和模块化方向发展, 在国民经济建设、国防安全和科研领域发挥着关键作用^[1, 2]。其中 GaN 基绿光 LD 发展较晚, 相对于 GaN 基蓝光 LD, 技术发展仍不成熟, 性能较低。1997 年, 日本 Nichia 公司制备出第一个连续激射的 420 nm GaN 基蓝光 LD, 就此拉开了 GaN 基 LD 的序幕^[3, 4]; 1996~2008 年, GaN 基绿光 LD 波长低于 500 nm; 直到 2009 年, Nichia 公司才制备出波长为 510 nm 的 LD, GaN 基绿光 LD 的应用也因此得到突破; 2009~2010 年间, Nichia、Osram、Sumitomo、Corning、Soraa、UM、Sinano、SS、Rohm 和 UCSB 几个研究团队突破了波长 500 nm 的限制, 使 GaN 基绿光 LD 波长最高可达到 523 nm。表 1 是 2009~2016 年间国外科研团队报道的绿光 LD 研究进展^[5~25]。国内科研团队对绿光 LD 的研究也趋于成熟, 2017 年, 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 Tang 等^[15]通过优化绿光量子阱界面消除界面缺陷, 制备出了阈值电流为 1.85 kA/cm²、输出功率 58 mW 的绿光 LD; 2017 年, 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究 Liu 等^[15, 26, 27]在提高绿光 LD 有源区发光均匀性和发光效率方面取得了较多成果, 在 InGa_{0.32}N/GaN 量子阱中生长 1.8 nm 的盖层, 然后对其界面进行热退火处理, 抑制了界面缺陷, 减少了非辐射复合中心, 提高了发光均匀性, 提高了量子阱的内量子效率; 通过增加衬底切割角, 使绿光 LD 量子阱进行阶梯生长, 增加了原子扩散距离, 从而提高了量子阱的内量子效率。针对 p-AlGa_{0.32}N 限制层生长温度高导致的量子阱晶体质量差的问题, Liu 等^[28, 29]提出通过调控 p-AlGa_{0.32}N 限制层掺杂和生长温度可降低热效应对量子阱晶体质量的影响, 除此之外, 还指出制备氧化铟锡 (indium tin oxide, ITO) 限制层可以抑制绿光 LD InGa_{0.32}N 有源区的恶化^[30]。

波长接近绿光波长区域时, GaN 基绿光 LD 比蓝光 LD 的实现更具挑战性, 内量子效率也明显降低^[31, 32]。目前, 520~530 nm 被认为是 GaN 基绿光 LD 的最佳波段。随着 GaN 基绿光 LD 在各个方面的广泛应用, 对 GaN 基绿光 LD 的性能提出了更高的要求^[33], 如何获得高功率、高可靠性和高光束质量的 GaN 基绿光 LD 成为研究重点^[34]。2020 年, 李方直等^[35]指出 GaN 基蓝绿 LD 面临高质量 InGa_{0.32}N/GaN 多量子阱制备难、内部光学损耗

严重、空穴注入效率低和量子限制斯塔克效应 4 个方面的问题及解决方法。本文主要综述导致 GaN 基绿光 LD 功率低、光束质量差、可靠性差的关键问题以及对应的研究进展。首先, 阐述通过降低阈值电流、减少电子泄漏和光子损耗的方式提高 GaN 基绿光 LD 的功率的研究; 其次, 总结通过优化 LD 外延结构设计、芯片类型等方法提高光束质量方面的进展; 最后, 针对 GaN 基绿光 LD 可靠性差的问题, 总结器件性能退化的主要原因及解决方法。

2 实现高性 GaN 基绿光激光二极管的途径

2.1 提高 GaN 基绿光激光二极管功率的方法

功率是衡量 GaN 基绿光 LD 性能的关键性能参数之一。阈值电流、光子损耗和电子泄漏是影响输出功率的重要参数, 因此, 从阈值电流、电子泄漏以及光子损耗 3 个方面总结了 GaN 基绿光 LD 性能提升的主要方法。

2.1.1 阈值电流

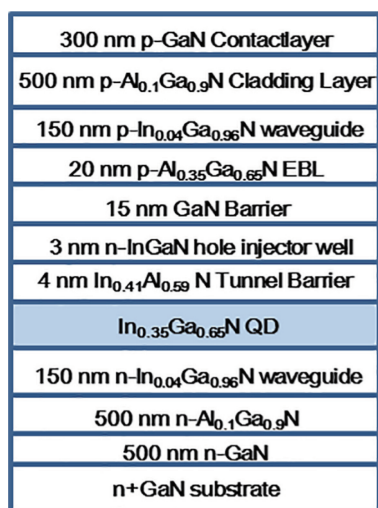
阈值电流是影响 GaN 基绿光 LD 性能的重要技术参数之一。高内损耗和非辐射复合效率, 易导致阈值电流增加, 从而降低 LD 输出功率和转换效率。因此, 通过分析导致高阈值电流的关键原因, 可知优化设计外延结构是解决高阈值电流的主要方法。1962 年, 美国科学家 Hall 等^[36]研制出第一代阈值电流密度为 $5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ A/cm² 的 LD; 1968~1970 年期间, 单异质结和双异质结的 LD 问世, 相比于同质结的 LD, 其阈值电流降低了一个数量级^[33]; 20 世纪 80 年代, 量子阱结构成功应用在 GaAs 基 LD 中, 该 LD 阈值电流明显降低^[37]; 2013 年, Banerjee 等^[38]在绿光量子点 LD 中借助声子辅助隧道使冷冻空穴从激发态直接变成基态进入量子点中, 使空穴均匀地进入每一个量子点, 在量子点中发生辐射复合, 从而提高了内量子效率, 降低了损耗, 最终使 LD 阈值电流密度下降至 945 A/cm², 图 1 是 In_{0.32}Ga_{0.68}N/GaN 量子点 LD 异质结构隧道注入示意图, 隧道注入方案包括 InGa_{0.32}N 量子点层、InAlN 隧道势垒和 InGa_{0.32}N/GaN 量子阱。因此, 随着外延结构的不断优化, LD 阈值电流随之降低, 性能得到不断提高。

此外, 针对 GaN 基绿光 LD 阈值电流高的问题, 有研究人员通过优化设计量子阱结构来达到降低阈值电流的目的。2017 年, Liang 等^[39]提出在电子阻挡层和最靠近 p 侧势垒之间插入掺杂的 InGa_{0.32}N 层, 可减少电子泄漏, 从而降低阈值电流。同时, Liang 等^[40]还提出将 n-In_{0.08}Ga_{0.92}N 和未掺杂 In_{0.02}Ga_{0.98}N 分别作为 GaN 基绿光

表 1 2009~2016 年国外科研团队报道的绿光激光二极管发展历程

Table 1 Research progress of green laser diode reported by foreign research teams from 2009 to 2016

Organization	Plane	Mode	λ/nm	P_{out}/mW	$J_{\text{out}}/(\text{kA}/\text{cm}^2)$	V_{th}/V	Lifetime/h	Year	Ref.
Nichia	(0001)	CW	515	5	4.4	5.2	>5000	2009	[5]
Nichia	(0001)	CW	518	5	3.8	5.5	>5000	2010	[6]
Nichia	(0001)	CW	525	1010	1.68	4.8	15 000	2013	[7]
Osram	(0001)	Pulse	500	70	8.2	6	—	2009	[8]
Osram	(0001)	Pulse	520	50	—	—	—	2010	[9]
Osram	(0001)	CW	529	40	—	—	—	2010	[10]
Osram	(0001)	CW	519	>100	—	—	>10 000	2012	[11]
Osram	(0001)	CW	520	200	—	—	—	2013	[12]
UM	(0001)	Pulse	550	—	0.94	—	—	2012	[13]
UM	(0001)	CW	630	—	2.5	—	—	2013	[14]
Sinano	(0001)	CW	508	58	1.8	4.4	>500	2016	[15]
SS	(2021)	CW	520	—	7.9	9.4	—	2009	[16]
SS	(2021)	CW	525.5	36.4	4.3	6.4	—	2010	[17]
SS	(2021)	CW	525	50	4.5	—	>5000	2012	[18]
SS	(2021)	CW	530	100	~5	—	>5000	2014	[6]
UCSB	(2021)	Pulse	506.4	—	19	—	—	2009	[19]
UCSB	(2021)	Pulse	516	—	30	—	—	2010	[20]
UCSB	(2021)	Pulse	523.4	—	12	—	—	2013	[21]
Soraa	Non-c	CW	521	>60	—	7.3	—	2010	[22]
Soraa	Non-c	CW	520	>65	—	6.7	—	2011	[23]
Corning	(1122)	Opt	530	—	—	—	—	2011	[24]
Rohm	(1100)	CW	499.8	15	3.1	—	—	2009	[25]

图 1 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{N}/\text{GaN}$ 量子点激光异质结构隧道注入方案示意图, 包括 InGa_N 量子点层、InAlN 隧道势垒和 InGa_N/Ga_N 量子阱^[38]Fig. 1 Schematic diagram of $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{N}/\text{GaN}$ quantum dot laser heterostructure tunnel implantation, including InGa_N quantum dot, InAlN tunnel barrier and InGa_N/Ga_N quantum well^[38]

LD 的下波导层和势垒层, 增强了光场限制, 减少了 GaN 绿光 LD 光场向衬底泄漏; 此外, 进一步将较浅量子阱夹层引入 InGa_N/Ga_N 绿光多量子阱中, 提高了光限制能力, 降低了阈值电流, 从而提高了 LD 输出功率, 图 2 是用于模拟计算的较浅量子阱 LD 的结构示意图^[41]。诸多研究人员将四元化合物 AlInGa_N 应用于 GaN 基绿光 LD 中, 以减少外延材料极化效应, 达到降低 LD 阈值电流的目的。早在 2009 年, 陈伟华等^[42]在 (0001) 蓝宝石衬底上外延生长了晶体质量较高的 InGa_N/AlInGa_N 多量子阱材料。然而, 由于 AlN、GaN 和 InN 之间互溶性差, 导致高质量四元 AlInGa_N 外延材料难以生长。2018 年, Cheng 等^[43]提出采用 GaN/InGa_N/GaN 三角形量子势垒代替 Ga_N 或 InGa_N 势垒能够明显降低 LD 阈值电流, 这是由于此结构能降低极化效应, 增加载流子限制, 减少损耗, 从而降低了 LD 阈值电流; Hu 等^[30]提出通过增加 ITO 限制层的方法解决 p 限制层生长温度高导致晶体质量差的问题, 从而降低了光学损耗, 提高了输出功率, 该方法制备的 GaN 基绿光 LD 的阈值电流密度是普通绿光 LD 的 1/3。首先, 这主要是由于 ITO 在可见光谱内具

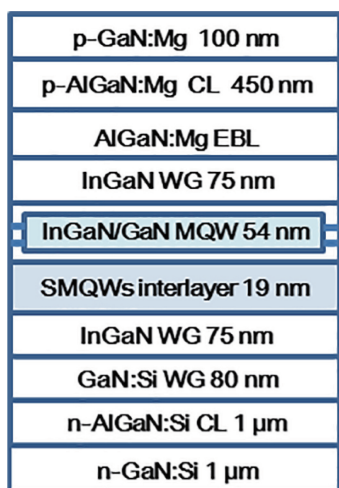


图 2 用于模拟计算的较浅量子阱激光二极管的结构示意图^[41]

Fig. 2 Schematic structure of a shallower-quantum well laser diode for simulation calculation^[41]

有导电性和透明性，其吸收系数比其他金属低 2 个数量级，折射率比传统 p-AlGaIn 限制层低，因此 ITO 能够为激光腔提供足够的光学限制；其次，ITO 生长温度在 300 °C 以下，能够减少 p-AlGaIn 限制层的高温生长时间，从而有效缓解限制层生长温度高导致的量子阱晶体质量差的问题^[35]。基于以上 ITO 相对于传统限制层的优点，2020 年，Liu 等^[30]将 ITO 取代 Pd/Pt/Au 作为电极材料，结果表明，将 ITO 作为电极材料的 LD 的阈值电流和内损耗降低，斜率效率和输出功率提高，这是由于 ITO LD 量子阱受高温生长温度的影响减少，减少了晶体缺陷，从而减少了非辐射复合中心，同时还提高了空穴注入效率，增加了量子阱中的空穴浓度。2020 年，Telegin 等^[44]还设计了掺杂宽波导结构的 GaN 基绿光 LD，该方法减少了 LD 电子泄漏，从而降低了阈值电流。2020 年，Zhou 等^[45]通过调控量子阱厚度实现了降低 LD 电流阈值的目的。

为了将 InGaIn 绿光 LD 的波长提高至绿光波段，量子阱中 In 组分含量高达 30%，诸多研究者针对 In 含量增加对 GaN 基绿光 LD 性能的影响进行了研究。研究结果表明，In 含量增加导致量子阱中易产生 In 偏析现象，量子阱有源区中增加了大量缺陷，并形成了非辐射复合中心，从而导致 LD 阈值电流升高，降低了斜率效率和功率。通过分别调控 In 组分和上波导层本底浓度及厚度可以有效解决量子阱中缺陷密度高和波导层光吸收严重导致的光子损耗问题，从而降低 LD 阈值电流^[46]；Tian 等^[15]通过退火处理有效解决了在量子阱中 In 偏析的问题，提高了辐射复合效率，降低了阈值电流。

2.1.2 电子泄漏

电子泄漏是影响 GaN 基绿光 LD 性能的关键因素之

一。外延结构设计对电子泄漏起着至关重要的作用。目前普遍采用调控电子阻挡层、势垒层和量子阱的方法来实现抑制电子泄漏的目的。

设计阻挡层是抑制电子泄漏的重要方法之一。诸多研究者对阻挡层结构进行了优化设计，以抑制 GaN 基绿光 LD 的电子泄漏。GaN 基蓝光与绿光 LD 外延结构的关键区别是 In 组分的量子阱材料的不同，InGaIn 材料具有极强的极化效应，能带倾斜严重，降低了束缚电子的能力。电子阻挡层能有效抑制 GaN 基绿光 LD 的电子泄漏，1996 年，Nakamura 等^[47]提出在量子势垒与 p 波导之间加入 p 型 AlGaIn 电子阻挡层能有效抑制电子泄漏。设计外延结构时不仅要考虑抑制电子泄漏，还要考虑空穴的注入，通过提高有源区辐射复合效率，从而提高 LD 的输出功率和电光转换效率。通过优化电子阻挡层不仅可以抑制电子从有源区泄漏进入 p 侧，而且还能促进 p 侧空穴进入有源区，这主要是由于调控电子阻挡层能够减少能带弯曲，提高电子进入 p 侧势垒，降低空穴进入有源区势垒，从而提高有源区的载流子浓度。采用 Al 组分渐变 AlGaIn 电子阻挡层可使带隙变宽，增加电子泄露势垒高度，降低空穴注入势垒高度，从而有效提高空穴注入效率并降低电子泄露^[48-50]。然而，相比于优化 AlGaIn 电子阻挡层，通过调控四元 AlInGaIn 的 Al/In 的比率，不仅可使带隙宽度在很大的范围内变化，而且可使四元 AlInGaIn 晶格常数与 p 侧第一个量子阱很好地匹配，从而内建电场减小，极化效应降低，空穴注入效率提高^[51-53]。

优化势垒层也是减少电子泄漏的重要方法之一。2006~2013 年，多个研究团队都提出采用 AlGaIn/GaN 多量子势垒代替 AlGaIn 阻挡层，从而达到减少电子泄漏的目的^[54-56]，通常采用的方法是调控势垒厚度和势垒高度。2018 年，Liang 等^[57]提出非对称多量子阱中最后添加一个薄势垒的结构可以降低压电极化效应，从而减小电子泄漏。多个课题组^[48-50]采用渐变铝成分的 AlGaIn 阻挡层减小了电子泄漏，提高了空穴向有源区的注入。Kuo 等^[51]采用极性匹配四元 AlInGaIn 电子阻挡层，降低了极化效应，达到了抑制电子泄漏和提高空穴注入的目的。单一电子阻挡层抑制电子泄漏的效果不理想，可采用复合结构的电子阻挡层有效降低电子泄漏，2014 年，Le 等^[58]在电子阻挡层前加入未掺杂 InGaIn 薄层，有效抑制了电子泄漏，降低了阈值电流，图 3 是传统和插入未掺杂 InGaIn/GaN 的新结构 LD 示意图，新结构 LD 将 5 nm $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 和 5 nm GaN 作为靠近 p 侧的量子垒，代替了传统的 10 nm GaN 势垒。

优化量子阱也是有效抑制电子泄漏的方法之一。2020 年，Usman 等^[50]提出一种 In 组分渐变 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 单

量子阱结构, 该结构有效抑制了电子泄漏, 提高了辐射复合效率, 提高了 LD 输出功率。2020 年, Zhou 等^[45]采用优化量子阱厚度的方法解决了量子阱太薄导致电子产生泄漏的问题, 提高了 LD 内量子效率。

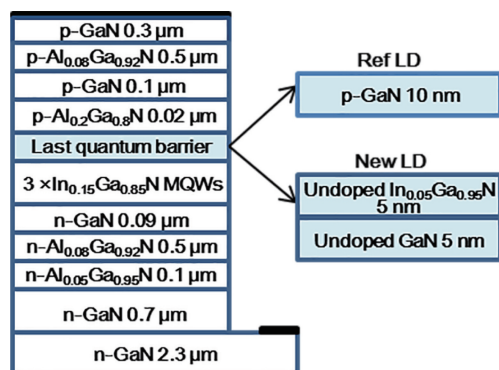


图3 传统和新激光半导体结构示意图^[58]

Fig. 3 Schematic diagram of reference and new laser diode structure^[58]

2.1.3 光子损耗

光子损耗是导致绿光 LD 输出功率降低的关键因素之一。目前主要通过调控波导层、限制层、p 型掺杂层以及 GaN 衬底取向的途径来降低光子损耗。波导层对 GaN 基绿光 LD 光场分布有着重要影响。众多研究人员研究了波导结构对 GaN 基绿光 LD 光学性能的影响。2010 年, Huang 等^[59]通过调控波导层组分和厚度, 提高了波导层的光限制能力, 从而降低了 LD 光学损耗。2017 年, Liang 等^[39, 40]采用厚的 InGa_xN 波导层达到了抑制光子泄漏的目的。2018 年, Liang 等^[57]在非对称有源区(靠近 p 侧的势垒比其他势垒厚)结构基础上提出一种新的 In_xGa_{1-x}N 下波导层 GaN 基蓝光 LD 结构, 采用 In_xGa_{1-x}N 下波导层替代 GaN 下波导层, 同时, 通过优化 In_xGa_{1-x}N 下波导层 In 组分调节有源区的光场分布, 使靠近 p 侧的光场向 n 侧移动, 从而有效减小光子损耗, 提高了 LD 斜率效率, 如图 4 所示。限制层对抑制 GaN 基绿光 LD 的光子损耗有着重要作用, 2016 年, Wen 等^[46]提出了采用厚 AlGa_xN 限制层来抑制 GaN 基绿光 LD 光子泄漏。2019 年, Liang 等^[60]设计了渐变组分的 n-InGa_xN 波导层, 该结构有利于生长高质量外延材料和减少光子泄漏, 从而减少了光子损耗。镁掺杂也是影响光子损耗的因素之一。镁掺杂层与有源区的距离太远影响空穴注入效率, 太近使光子损耗增加。镁的电离能高, 需要高浓度受体确保低电压下自由空穴的聚集, 高浓度受体会导致内部光子损耗的增加^[61]。

GaN 衬底取向对 GaN 基绿光 LD 光子损耗有着重要影响。许多研究者提出在极性 GaN 衬底顶部生长由氢化物外延和高压溶液相结合的不同电子浓度的 GaN 层堆叠而成的外延材料, 此基底在不产生残余应力的同时可以

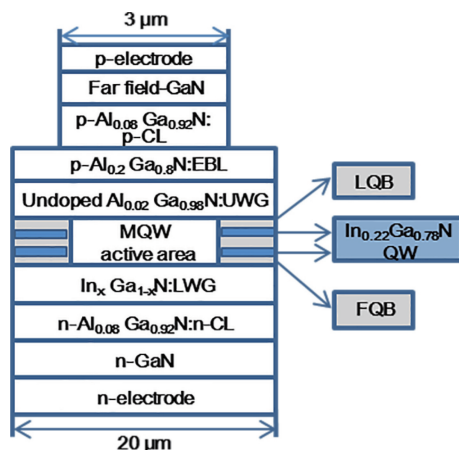


图4 GaN 基蓝色激光二极管的结构示意图^[57]

Fig. 4 Schematic structure of GaN-based blue laser diode^[57]

抑制向基底方向的光学模式泄漏, 从而提高电光转换效率^[62, 63]。然而, GaN 衬底取向不同, 晶格错配度不同, 产生的极化效应造成光子损耗, 因此衬底取向影响 GaN 基绿光 LD 光子损耗, 从而影响器件的光电性能。关于 GaN 基绿光 LD 的大多数研究都集中在极性结构 *c* 面 GaN 衬底上, 然而, 由于极性 GaN 衬底极化效应较强, 许多研究者转向对半极性面和非极性面的研究。图 5 是纤锌矿 GaN 晶面取向示意图^[64]。2008~2009 年, Rohm 公司制备了在 *m* 面衬底上生长的波长为 481 nm 的蓝绿 LD, 该 LD 输出功率为 20 mW, 阈值电流密度为 6.1 kA/cm²^[5, 6]。2010 年, Kyono 等^[65]采用金属有机化学气相外延法制备了新型半极性 {201} GaN 基绿光 LD。2010 年, 国内开始了 *c* 面 GaN 基绿光 LD 的研究, 2014 年, 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所制备了国内第一台室温电注入脉冲发射 GaN 基绿光 LD^[66]。由于生长大块 GaN 衬底存在困难, 半极性面和非极性面 GaN 基绿光 LD 目前仍很难实现大规模产业化生产。

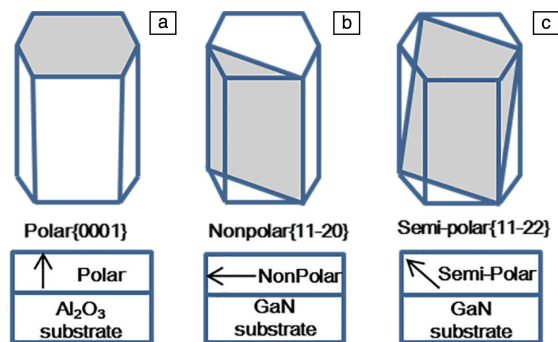


图5 纤锌矿 GaN 晶面取向示意图^[64]: (a) 极性结构, (b) 非极性结构, (c) 半极性结构

Fig. 5 Schematic diagram of wurtzite GaN crystallographic orientation^[64]: (a) polar structures, (b) non-polar structures, (c) semi-polar structures

2.2 提高 GaN 基绿光激光二极管光束质量的方法

发散角是影响 LD 光束质量的重要参数,减小发散角可以改善光束质量。针对 GaN 基绿光 LD 光束质量差的问题,研究者们讨论了 GaN 基绿光 LD 外延结构对光束质量的影响。目前,主要采用 $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ 代替 AlGaIn 限制层、低 In 组分 InGaIn 波导层代替 GaN 波导层、GaN 作为限制层 3 种方法来提高光束质量。结果表明,第一种方法波导层与限制层折射率差最小,光束质量最高^[67]。同时,针对 GaN 基绿光 LD 发散角大的问题,采用宽波导结构是提高光束质量的有效方法之一。研究者们通过采用大光腔结构^[68-70]和优化 n 型波导层厚度来调控远场发散角^[71],降低阈值电流,从而提高 GaN 基绿光 LD 性能。通过增加大光腔结构中波导层厚度和利用阶梯不对称结构达到降低高功率 GaN 基绿光 LD 垂直发散角的目的。丝状效应是降低 GaN 基绿光 LD 光束质量的重要原因,2019 年,Malag 等^[72]提出宽波导结构可以改善高功率 LD 光束质量,使发散角减小 12° ,限制丝状效应,稳定光场分布。2019 年,Abbasi 等^[73]采用高斯分布折射率的宽波导,使 LD 光束亮度和光输出功率分别提高 56%和 27%。此外,研究者们还通过改善腔面粗糙度来提高光束质量。2009 年,张立群等^[74]提出减小衬底厚度可以降低腔面粗糙度,增加脊高度,降低阈值电流,减小远场横比,从而达到提高光束质量的目的。2018 年,Lan 等^[75]采用传统的两个温度沉积法生长的 LD 可以抑制外延片曲率变化,采用同温度沉积法可以缓和从量子阱到势垒的变形,使曲率波动变小,腔面粗糙度降低,发光均匀性提高,从而提高光束质量。2020 年,田爱琴等^[35]提出通过调控生长温度、生长速率和 GaN 衬底的斜切角获得的台阶流形貌绿光 InGaIn 量子阱,从而抑制了多量子阱表面缺陷形成,提高了光束质量。

2.3 提高 GaN 基绿光激光二极管可靠性的方法

GaN 基绿光 LD 的工作寿命是限制其广泛应用的关键性能指标之一。GaN 基绿光 LD 应用的前提条件是可连续工作超过 10 000 h。发热是器件性能退化和寿命减少的主要原因。如何提高 GaN 基绿光 LD 的工作寿命成为各个研究团队的研究焦点^[76, 77]。

针对器件温度影响 GaN 基绿光 LD 可靠性的问题,许多研究者采用不同方法分析激光器发热的原因及温度与可靠性的关系。GaN 基绿光 LD 的工作温度决定了器件工作寿命长短和功率的衰减度。因此,研究工作温度与器件性能参数之间的关系至关重要。随着 GaN 基绿光 LD 工作温度的升高,阈值电流密度增加,工作寿命减少。2003 年,曹玉莲^[78]提出窄条宽 LD 相对光电性能较好,通过适当减少量子阱数,采用张应变垒层,减小驱

动电压,可以达到降低器件温度和减缓器件性能退化的目的。对于高 In 组分 GaN 基绿光 LD,量子阱有源区质量受温度恶化的影响更严重。例如,p 型限制层生长温度较高,量子阱中由于高 In 组分产生大量缺陷,导致非辐射复合率增加,绿光 LD 性能衰减^[79, 80]。2017 年,Tian 等^[15]提出采用热处理和 H_2 处理的方法可以去富 In 团簇,界面热处理后生长的 GaN 势垒可以消除量子阱中的缺陷,从而减少非辐射复合中心。脊形 GaN 基绿光 LD 快速退化的原因可能是由于脊上的局部缺陷产生的热分布不均匀,进而增加了有源区缺陷,加快了性能退化,使 GaN 基绿光 LD 可靠性变差^[81]。GaN 基绿光 LD 失效问题不仅来自于腔面和有源区,外部环境对其可靠性也有影响。2021 年,孙天宇等^[82]采用光致发光、电致发光和阴极发光等检测失效的技术并结合 LD 失效原理,从腔面、有源区内部、焊接和操作环境 4 个方面提出有效改善 LD 失效问题的建议。

3 结 语

提高 GaN 基绿光二极管的光电性能需要通过以下 3 个方面:首先,需要制备高质量的绿光 InGaIn/GaN 多量子阱外延材料;其次,减少内部光学损耗和提高空穴注入效率;最后,减少量子阱中的极化效应,降低斯塔克效应对量子阱性能的影响。采用氧化铟锡限制层结构、调控量子阱和电子阻挡层结构以及采用外延生长技术等方式减少电子泄漏,从而提高量子阱晶体质量和空穴注入效率;通过优化波导层、限制层和调控衬底取向等方式,调节光场分布,减少光子损耗,从而提高发光效率。近年来,半极性面衬底和氧化铟锡的 p 型限制层的应用促进了绿光二极管的迅速发展。高功率脉冲光纤激光器和连续光纤激光器的光电性能有望得到突破,未来绿光二极管行业将向着应用于精细加工领域的高功率、超快二极管和智能化、模块化的高光束质量二极管的方向发展。

参考文献 References

- [1] NAKAMURA S, SENOH M, NAGAHAMA S I, *et al.* Japanese Journal of Applied Physics[J], 1996, 35 (Part 2, No. 1B): 74-76.
- [2] MANCHEE C P K, MOLLER J, MILLER R J D. Optics Communications[J], 2019, 437: 6-10.
- [3] NAKAMURA S. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics[J], 1997, 3(3): 712-718.
- [4] JIANG L R, LIU J P, TIAN A Q, *et al.* Journal of Semiconductors [J], 2016, 37(11): 11101.
- [5] MIYOSHI T, MASUI S, OKADA T, *et al.* Applied Physics Express [J], 2009, 2(6): 062201.

- [6] MIYOSHI T, MASUI S, OKADA T, *et al.* *Physica Status Solidi*[J], 2010, 207(6): 1389–1392.
- [7] NAGAHAMA S, MIYOSHI T, KASAHARA D, *et al.* Watt-class AlIn-GaN Blue and Green Laser Diodes[R]. Yokohama: The 2nd Laser Display Conference, 2013.
- [8] QUEREN D, AVRAMESCU A, BREIDENASSEL A, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2009, 94(8): 081119.
- [9] LUTGEN S, AVRAMESCU A, LERMER T, *et al.* *Physica Status Solidi(a)*[J], 2010, 207(6): 1318–1322.
- [10] AVRAMESCU A, LERMER T, MULLER J, *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2010, 3(6): 61003.
- [11] VIERHEILIG C, EICHLER C, TAUTZ S, *et al.* Conference on Novel In-Plane Semiconductor Lasers XI[R]. San Francisco: Proceedings of SPIE, 2012, 8277: 13.
- [12] HAGER T, STRAUB U, EICHLER C, *et al.* Conference on Novel In-Plane Semiconductor Lasers XII[R]. San Francisco: Proceedings of SPIE, 2013, 8640: 86400G.
- [13] ZHANG M, BHATTACHARYA P, GUO W. *Applied Physics Letters*[J], 2010, 97: 011103.
- [14] FROST T, BANERJEE A, SUN K, *et al.* *IEEE Journal of Quantum Electronics*[J], 2013, 49: 923–931.
- [15] TIAN A, LIU J, ZHANG L, *et al.* *Optics Express*[J], 2017, 25(1): 415–421.
- [16] YUSUKE Y, MASAHIRO A, YOHEI E, *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2009, 2(9): 092101.
- [17] MASAHIRO A, YUSUKE Y, YOHEI E, *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2010, 3(12): 121001.
- [18] YANASHIMA K, NAKAJIMA H, TASAI K, *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2012, 5(8): 82103.
- [19] ANURRAG T, ROBERT M F, KATHRYN M K, *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2010, 3(1): 011002.
- [20] LIN Y D, YAMAMOTO S, HUANG C Y, *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2010, 3(8): 082001.
- [21] HARDY M T, WU F, HSU P S, *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2013, 114(18): 183101.
- [22] JAMES W R, MATHEW C S, CHRISTIANE P, *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2010, 3(11): 112101.
- [23] SCHMIDT M C, POBLENZ C, CHANG Y C, *et al.* Conference on the Laser Technology for Defense and Security VII[R]. Orlando FL: Proceedings of SPIE, 2011, 8039: 80390D.
- [24] SIZOV D, HEBERLE A P, VISOVSKY N J, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2011, 99(7): 41117.
- [25] OKAMOTO K, KASHIWAGI J, TANAKA T, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2009, 94(7): 71105.
- [26] TIAN A, LIU J, ZHANG L, *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2017, 10: 012701.
- [27] TIAN A, LIU J, ZHANG L, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2017, 111: 112102.
- [28] TIAN A, LIU J, ZHANG L, *et al.* *Physica Status Solidi C*[J], 2016, 13: 245–247.
- [29] TIAN A, LIU J, IKEDA M, *et al.* *Applied Physics Express*[J], 2015, 8: 051001.
- [30] HU L, REN X Y, LIU J P, *et al.* *Photonics Research*[J], 2020, 8(3): 279–285.
- [31] BHATIA V, GREGORSKI S J, PIKULA D, *et al.* *Information Display*[J], 2009, 25(3): 31.
- [32] Lasers & Electro-optics Society[C]. Sydney: Leos the Meeting of the IEEE, 2005.
- [33] HAYASHI I, PANISH M B, FOY P W, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 1970, 17(3): 109–111.
- [34] BACHMANN F, POPRAWA R, LOOSEN P. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering[J], 2007, 3888: 535–536.
- [35] 李方直, 胡磊, 田爱琴, 等. *人工晶体学报*[J], 2020, 65(11): 53–69.
- LI F Z, HU L, TIAN A Q, *et al.* *Journal of Synthetic Crystals*[J], 2020, 65(11): 53–69.
- [36] HALL R N, FENNER G E, KINGSLEY J D, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 1962, 9(9): 366–368.
- [37] IGA K, KINOSHITA S, KOYAMA F. *Electronics Letters*[J], 1987, 23(3): 134–136.
- [38] BANERJEE A, FROST T, JAHANGIR S, *et al.* *Journal of Crystal Growth*[J], 2013, 378: 566–570.
- [39] LIANG F, ZHAO D, JIANG D, *et al.* *Optics and Laser Technology*[J], 2017, 97: 284–289.
- [40] LIANG F, ZHAO D, JIANG D, *et al.* *Superlattices and Microstructures*[J], 2017, 102: 484–489.
- [41] YANG J, ZHAO D G, JIANG D S, *et al.* *IEEE Photonics Journal*[J], 2017, 2(9): 2300108.
- [42] 陈伟华, 廖辉, 胡晓东, 等. *光谱学与光谱分析*[J], 2009, 29(6): 1441–1444.
- CHEN W H, LIAO H, HU X D, *et al.* *Spectroscopy and Spectral Analysis*[J], 2009, 29(26): 1441–1444.
- [43] CHENG L W, CAO C R, MA J, *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2018, 123(22): 223140.
- [44] TELEGIN K Y, LADUGIN M A, ANDREEV A Y, *et al.* *Quantum Electronics*[J], 2020, 50(5): 489–495.
- [45] ZHOU M, LIANG F, ZHAO D G, *et al.* *Journal of Material Science: Material in Electronics*[J], 2020, 31(8): 5814–5819.
- [46] WEN P Y, ZHANG S M, LIU I P, *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2016, 119(21): 213107.
- [47] NAKAMURA S, SENO H, NAGAHAMA S, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 1997, 70(11): 1417–1419.
- [48] ZHANG Y, KAO T T, LIU J, *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2011, 109(8): 312–314.
- [49] YANG W, LI D, LIU N Y, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2012, 100(3): 176–178.
- [50] USMAN M, MUNSIF M, ANWAR A R. *Optical and Quantum Elec-*

- tronics[J], 2020, 52(6): 320.
- [51] KUO Y K, LU Y C, TSAI M C, *et al.* Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering[J], 2009: 7211.
- [52] CHIO S, JI M H, KIM J, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2012, 101(16): 897.
- [53] CHEN J R, LEE C H, KO T S, *et al.* Journal of Lightwave Technology[J], 2008, 26(3): 329-337.
- [54] LEE S N, CHO S Y, RYU H Y, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2006, 88(11): 111101.
- [55] ZHANG D, LIU Z C, HU X D, *et al.* Semiconductor Science and Technology[J], 2009, 24(4): 045003.
- [56] PIPREK J, LI S. Applied Physics Letters [J], 2013, 102(2): 023510.
- [57] LIANG F, ZHAO D G, JIANG D S, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2018, 731: 243-247.
- [58] LE L C, ZHAO D G, JIANG D S, *et al.* Optical Society of America [J], 2014, 22(10): 11392-11398.
- [59] HUANG C Y, LIN Y D, TYAGI A, *et al.* Applied Physics[J], 2010, 107(2): 023101.
- [60] LIANG F, ZHAO D, JIANG D, *et al.* Superlattices and Microstructures[J], 2019, 132: 106153.
- [61] HARDY M T, FEEZELL D F, DENBAAR S P, *et al.* Materials Today [J], 2011, 14(9): 408-415.
- [62] PERLIN P, HOLC K, SARZYNSKI M, *et al.* Applied Physics Letters [J], 2009, 95(26): 261108.
- [63] STANCZYK S, CZYSZANOWSKI T, KAFAR A, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2013, 102(15): 151102.
- [64] DANG S H, LI C X, LU M C, *et al.* Journal for Light and Electronoptic[J], 2018, 157: 1350-1356.
- [65] OKAMOTO K, TANAKA T, KUBOTA M, *et al.* Applied Physics Express[J], 2008, 1: 011102-3.
- [66] 田爱琴. GaN 基绿光激光器的 MOCVD 生长和表征[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- TIAN A Q. MOCVD Growth and Characterization of GaN Based Green Laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [67] LERMER T, SCHILLGALIES M, BREIDENASSEL A, *et al.* Physics Status Solidi A[J], 2010, 207(6): 1328-1331.
- [68] SEBASTIAN J, BEISTER G, BUGGE F, *et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics[J], 2001, 7(2): 334-339.
- [69] LI J J, CUI B F, DENG J, *et al.* Chinese Journal of Lasers[J], 2013, 40(11): 102011.
- [70] 刘梦涵, 崔碧峰, 何新, 等. 中国激光[J], 2016, 43(5): 1-6.
- LIU M H, CUI B F, HE X, *et al.* Chinese Journal of Lasers [J], 2016, 43(5): 1-6.
- [71] QIU B C, KOWALSKI O P, MCDUGALL S, *et al.* IEEE Photonics Journal[J], 2009, 1(3): 172-177.
- [72] MALAG A, SOBAZAK G, DBROWSKA E, *et al.* AIMS Electronics and Electrical Engineering[J], 2019, 3(4): 370-381.
- [73] ABBASI S P, MADDIE M H. Optics and Laser Technology[J], 2019, 116: 155-161.
- [74] 张立群, 张书明, 江德生, 等. 红外与激光工程[J], 2009, 38(1): 42-44.
- ZHANG L Q, ZHANG S M, JIANG D S, *et al.* Infrared and Laser Engineering[J], 2009, 38(1): 42-44.
- [75] LAN T, ZHOU G Z, LI Y, *et al.* Optical and Quantum Electronics [J], 2018, 50(12): 434: 1-11.
- [76] 陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 中国激光[J], 2020, 47(5): 0500001.
- CHEN L H, YANG G W, LIU Y X. Chinese Journal of Lasers [J], 2020, 47(5): 0500001.
- [77] 孟雪, 宁永强, 张建伟, 等. 激光与光电子学进展[J], 2019, 56(18): 180001.
- MENG X, NING Y Q, ZHANG J W, *et al.* Laser & Optoelectronics Progress[J], 2019, 56(18): 180001.
- [78] 曹玉莲. 高功率半导体量子阱激光器的可靠性研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003: 1-52.
- CAO Y L. Reliability Study of High Power Semiconductor Quantum Well Lasers [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003: 1-52.
- [79] TRIVELLIN N, MENEGHINI M, ZANONI E, *et al.* Physics Status Solidi[J], 2010, 207(1): 41-44.
- [80] SANTI C D, MENEGHINI M, MARIOLI M, *et al.* Microelectronics Reliability[J], 2014, 54(9): 2147-2150.
- [81] XIU H X, XU P, WEN P Y, *et al.* Superlattices and Microstructures [J], 2020, 142: 106517.
- [82] 孙天宇, 夏明俊, 乔雷. 激光与光电子学进展[J], 2021, 58(19): 37-49.
- SUN T Y, XIA M J, QIAO L. Laser & Optoelectronics Progress[J], 2021, 58(19): 37-49.

(编辑 费蒙飞)