

Characteristics and Degradation mechanisms of GaN-based
laser diodes

By
Ying Huang

A Thesis Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Science in Engineering

Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese
Academy of Sciences
May, 2017

关于学位论文使用权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经著作权人授权，不得将本论文转借他人并复印、抄录、拍照、或以任何方式传播。否则，引起有碍著作权人著作权益之问题，将可能承担法律责任。

.....

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所有关保存、使用学位论文的规定，即：中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所有权保留学位论文的副本，允许该论文被查阅；中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。（涉密的学位论文在解密后应遵守此规定）

签名：黄莹

导师签名：刘建平

日期：2017.5.26

.....

关于学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签名：黄莹

导师签名：刘建平

日期：2017.5.26

.....

致 谢

在硕士三年期间，经历了学生阶段最后的洗礼，如今即将踏入社会。通过这三年专业性的学习，我收获了科研上导师的谆谆教诲、生活上朋友的热心帮助。因为研究生涯的沉淀，对于以后即将面对的工作和生活我有了更多的感触，所谓科学上没有平坦的大道，唯有不畏艰险的探索与攀登，方可领略顶峰的美景。本论文在诸多老师和师兄师姐的指导下已然完成，在此谨向各位表达衷心的感谢。

感谢我的导师杨辉研究员，杨老师虽然工作繁重，但百忙之中仍抽出时间在学生指导会上、组会上给予我不少实验方案和实验方法上的建议，杨老师平易近人、睿智豁达，具有丰富的科研实践经验和高度的科学敬业态度，杨老师的悉心指导让学生如沐春风。在此，向杨老师致以深深的敬意与感谢。

感谢亲自指导我实验的刘建平研究员，刘老师对待科研极其严谨、细致入微，以及他热忱的工作作风让我心生敬意。从论文选题、实验细节、实验测试以及论文撰写修改等方面刘老师都尽心尽力，在此真诚的感谢刘老师给予我的鼓励和关怀。

感谢李德尧研究员对我科研和生活上的帮助，李老师和蔼热心、一丝不苟、身体力行，在激光器可靠性研究方面给了我全面的指导，从测试方案的设计到测试结果的分析与处理，李老师时刻关注着我的研究动向，并且给予我很多的认可，从他那里我学到了不仅仅是理论方面的知识，更多的是实践操作与逻辑分析的一种能力。在此，致以最真挚的感谢。

感谢张书明研究员、孙钱研究员、池田昌夫研究员和张立群研究员，他们活跃的学术思维、资深的科研经历让我为之钦佩，从他们身上我学到了科研人员该有的精神与态度，并且在实验结果分析方面他们给了我很多启发和建议。

感谢中科院苏州纳米所测试平台和加工平台给我提供全面的实验条件，加工平台系统的工艺设备满足了我们器件的加工处理。测试平台电学、光学等测试系统给我器件测试方面提供了便利。

感谢温鹏雁师姐给我实验模拟、实验测试及实验分析方面的帮助，在文章撰写及实验方案上她给了我不少指导性的建议，让我有了很多启发。另外，她敏锐的科研能力、扎实的理论基础及缜密细心的思维也深深影响着我。

感谢实验室的师兄师姐师弟们：田爱琴、张峰、程洋、胡威威、高雪、范晓望、冯美鑫、周宇、李水明、戴淑君、孙逸、严威、陈晓雪、江灵荣、周韧林、胡俊杰、钟耀宗、周瑞等，他们给予我实验上和生活上的帮助和支持。

感谢黄思溢、任霄玉、周伟等课题组的工作人员，他们在工作上给我提供了有利的帮助。

感谢苏州纳睿光电有限公司及其工作人员给我提供实验测试方面以及相关软件方面的帮助和指导。

感谢研究生同级的朋友：何俊蕾、尹利娟、武鹏、吴绍静等，他们给我研究生生活带来了诸多帮助，让我的学生生活多了很多乐趣与回忆。

感谢研究生部的王安秋、王进军等老师在科研学习和课余生活上的热心帮助。

感谢大学以及其他朋友同学的关心和支持，他们在我硕士期间给予我鼓励，给了我生活和学习上的不少帮助。

感谢面朝黄土的父母用他们辛苦的双手养育了我，并且默默的支持我求学，他们的理解和关心是我积极向上奋进的动力。

黄莹

2017年5月

中文摘要

氮化镓 (GaN) 基光电器件由于具有优良的物理性质, 被广泛应用于激光显示、生物医疗、数据存储等科研领域。本课题主要以提高 GaN 基蓝绿光激光器的可靠性为主要内容, 分析其光电特性以及退化现象。本论文研究取得的主要成果如下:

1、分析了恒电流条件下蓝光激光器的老化现象。随老化时间延长, 光功率开始呈快速下降, 随后缓慢降低。老化后脊形边缘出现孔洞, 确定了老化初期功率下降速率与激光器脊形边缘孔洞密度成正比例关系。对其横截面结构分析, 孔洞处 Au 和 Ti 层发生反应形成了合金。

2、分析了恒电流条件下绿光激光器的老化现象。绿光激光器老化后阈值电流增加。通过变温光荧光测试评估其内量子效率没有下降, 而微区荧光显微镜(μ -PL)分析发现老化后的样品脊形上呈现不均匀的变暗, 认为可能是金属与半导体之间发生了扩散作用。

3、研究了不同腔长 (400 μ m、600 μ m 和 800 μ m) 激光器光输出光功率-电流 (P-I) 曲线。发现短腔长 (400 μ m 和 600 μ m) 激光器都出现非线性, 即所谓的“kink”, 而 800 μ m 腔长的激光器没有 kink。通过分析不同电流下的远场图、不同脉宽的 P-I 曲线, 并采用 ANSYS 模拟了激光器腔面和沿腔长方向的温度分布。结果表明, 温度分布不均匀引起模式的不稳定最终导致 kink 的产生。

关键词: GaN 激光器, 可靠性, Kink, 孔洞

Abstract

As GaN-based photoelectric device have excellent physical characteristics, they were applied for the research fields on laser display, biomedical, data storage. This thesis mainly aims to improve the reliability of GaN-based blue and green laser diodes (LDs), the characteristics and degradation mechanisms of GaN-based blue and green LDs are studied. The main achievements are as follows:

1. The degradation mechanisms of blue LDs aged at a constant current density ($5\text{kA}/\text{cm}^2$) at room temperature were studied. With aging time increasing, the optical power decreases rapidly at initial time. Voids observed at the side of the ridge, and the decreasing rate of power is proportional to the density of voids. Observed from the cross section, alloy has been formed by reaction of Au and Ti.

2. The degradation mechanisms of green LDs aged at a constant current density at room temperature were studied. After aging, the threshold current increases. The IQE of aged samples show no decreasing by temperature dependent of PL, while the aged samples show nonuniform dark observed from the micro PL. so we deduce that the degradation maybe caused by the diffusion between metal and semiconductor.

3. The characteristics of optical output power verses current (P-I) on LDs with different cavity lengths ($400\mu\text{m}$, $600\mu\text{m}$ and $800\mu\text{m}$) were studied. The nonlinearity of LDs with short cavity length is observed, which is so called kink, while LDs with cavity length of $800\mu\text{m}$ is free of kink. By analyzing the far field pattern with varies currents, P-I curve under different pulse width, and the temperature distribution along the cavity width and cavity length for LDs are simulated by ANSYS. The results show that the nonuniformity of temperature distribution in short cavity length leads to the unstability of mode, thereby causing the kink of the P-I characteristic.

Keywords: GaN laser diode, Reliability, Kink, Voids

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 GaN 基激光器的应用及发展前景	1
1.1.1 激光显示.....	1
1.1.2 激光照明.....	2
1.1.3 激光通信.....	3
1.2 GaN 基激光器的基本结构	4
1.3 GaN 基激光器的可靠性研究进展	5
1.3.1 激光器的可靠性评估.....	8
1.3.2 激光器的特征及退化特征.....	8
1.3.3 激光器的失效模式.....	9
1.4 本论文的研究意义及工作安排.....	13
第二章 GaN 基激光器可靠性及常用的退化机制表征方法	15
2.1 GaN 基激光器的生长	15
2.2 GaN 基激光器的封装	15
2.3 GaN 基激光器的老化	16
2.4 常用的退化机制表征方法.....	17
2.4.1 微观结构表征方法.....	17
2.4.2 发光光谱表征方法.....	19
2.4.3 电学特征表征方法.....	21
2.4.4 热学特征表征方法.....	23
2.5 本章小结.....	23
第三章 GaN 基蓝光激光器的退化机制分析	25
3.1 GaN 基蓝光激光器的退化现象	25
3.2 GaN 基蓝光激光器的电学特性	26
3.3 GaN 基蓝光激光器的形貌特性	29
3.4 激光器孔洞的分析.....	30
3.4.1 孔洞形成的微观结构.....	30

3.4.2	孔洞形成的动力源.....	34
3.4.3	孔洞对激光器光电性能的影响.....	34
3.5	本章小结.....	38
第四章	GaN 基绿光激光器的退化机制分析.....	39
4.1	GaN 基绿光激光器的退化现象.....	39
4.2	GaN 基绿光激光器的电学特性.....	40
4.3	GaN 基绿光激光器的光学特性.....	42
4.3.1	微区 PL 特性分析.....	42
4.3.2	阴极荧光特性分析.....	43
4.3.3	变温 PL 特性分析.....	44
4.4	本章小结.....	48
第五章	GaN 基激光器的 P-I 非线性机制研究.....	49
5.1	不同腔长激光器的 P-I 曲线.....	49
5.2	不同电流下激光器的远场图.....	52
5.3	不同脉宽的 P-I 曲线分析.....	55
5.4	ANSYS 模拟温度分布分析.....	56
5.5	本章小结.....	58
第六章	全文总结与展望.....	59
6.1	全文总结.....	59
6.2	工作展望.....	59
参考文献	61
科研成果及学术活动	73
作者简介	75

第一章 绪论

1.1 GaN 基激光器的应用及发展前景

以 GaN 为主的第三代宽禁带半导体材料，尤其是 III 族氮化物半导体 GaN、AlN、InN 及其三元四元合金化合物具有临界击穿电压高、介电常数小、抗辐射能力强、电子迁移率高和化学稳定性好等优良的物理和化学性质，因此在半导体发光二极管 (LED)、激光二极管 (LD)、紫外探测器 (UVD) 等方面有着广泛的应用。随着 GaN 外延晶体质量和 P 型掺杂技术两大难题的突破，研究开发 III-V 族氮化物发光器件、电子器件得到了飞跃性进展。目前研究人员对于 AlInGaN 体系投入了较多关注，通过改变合金中的 In 组分和 Al 组分，其禁带宽度从 $0.7\text{eV}^{[1-3]}$ (InN) 到 $3.4\text{eV}^{[4]}$ (GaN) 再到 $6.2\text{eV}^{[3,5]}$ (AlN) 连续可调，可实现深紫外、近紫外、可见光乃至近红外等整个太阳光谱的发光，并且以 InGaN/GaN 多量子阱为有源区的蓝光和绿光 LD 器件逐渐得到完善^[6-11]，尤其在激光显示领域有着巨大的应用市场。

GaN 基激光器作为半导体界众人瞩目的光电器件，可应用于激光存储、激光打印、激光投影、汽车头灯照明、激光通信、激光医疗等领域，除此之外，未来半导体激光器的发展也主要向着传递信息和提高光功率两大趋势突破。

1.1.1 激光显示

激光电视、激光微投目前逐渐成为公众生活中不可或缺的消费产品，具有高亮度、稳定性好、节能环保和超长寿命等优点，带给了人类前所未有的视觉盛宴。历经了黑白显示、彩色显示、数字显示的变更换代，激光显示技术将成为未来显示领域竞争的焦点，堪称第四代显示技术，在高分辨率、大色域和三维立体的视觉显示上，给观众提供了强大的震撼效果。以红、绿、蓝光半导体激光器为光源的激光显示也逐渐取代全固态激光器光源走向消费市场。

国内许多投影企业和家电企业包括海信、迪威视讯、长虹及 TCL 等大屏显示翘楚陆续发布激光显示新品，国际上如日本索尼、松下、NEC，韩国三星，美国德州仪器、科视，德国欧司朗，瑞士巴可等巨头也都在该领域布局落子，并不断取得突破，随着研究技术方面的突破和人们对显示特效的市场需求，激光显示

在大面积显示领域如电影放映、展览展示、舞台表演、视频会议、安防监控等具有广阔的应用空间，如图 1-1 所示。激光电视之所以成为显示市场的焦点，主要是采用了激光光源，并利用反射式超短焦投影技术，在抗光幕布上呈现出绚丽多彩的画面，因此并不像普通投影机，可以随便在白墙或者软幕上成像显示。

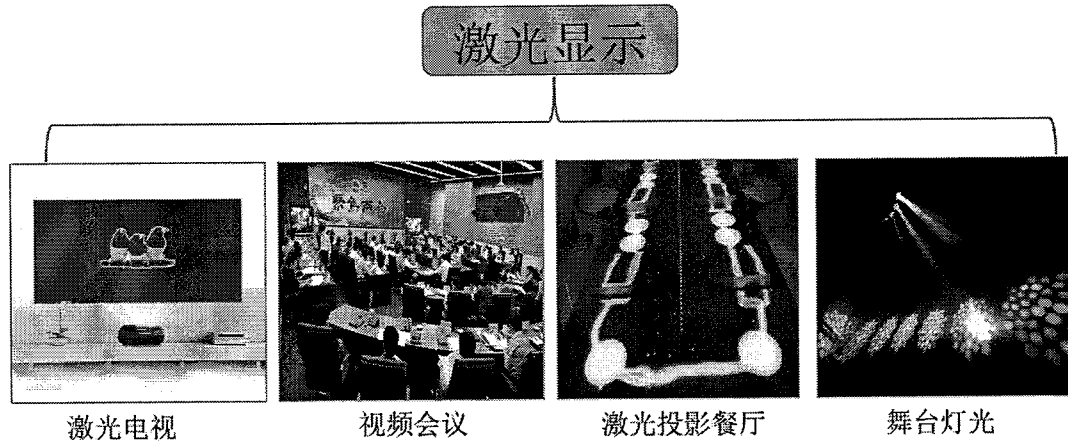


图 1-1 激光显示

1.1.2 激光照明

2016 年 11 月在北京举办的第十三届中国国际半导体照明论坛上诺贝尔物理奖得主中村修二先生提及三项重点 LED 产业新趋势，其中一项包括激光照明。激光器已被广泛应用于激光微投、激光电视、激光头灯等，特别在激光头灯领域，甚为优越。LED 头灯照射距离仅为 300 米，激光头灯可以提供驾驶很远的视距，可达到 600 米，可以让行车更安全，由于光的集中性，对向车与使用激光大灯的车会车也不会刺眼。从该研究领域来看，激光照明除了透射距离长、安全性高，同时相对于固态激光器体积更小、结构更紧凑，其效率大概是 LED 的上千倍，虽说在短期内激光不会是照明的主角，但是它在汽车照明上已表现出很出色的市场价值。

2011 年宝马概念车就推出了激光大灯，尽管宝马宣布研发的激光大灯比奥迪早，但奥迪的灯光技术同样是行业的领先者，奥迪车灯的发展，向我们展示了汽车照明领域的不断创新。2016 年奥迪在洛杉矶车展亮相了一款限量版 R8 V10 Plus，该车型是奥迪在美国首款配备激光大灯的限量版量产车型，如图 1-2 所示。奥迪的独到之处在于采用了激光远光灯组件，每一组件可以集成一束波长为

450nm 的蓝色激光，经过磷光转换为亮度极高的白光。当行驶速度超过每小时 40 英里以上，会在道路上呈现出动感十足的激光波束图形，配有激光大灯的奥迪看起来功能丰富，十分有威慑力。

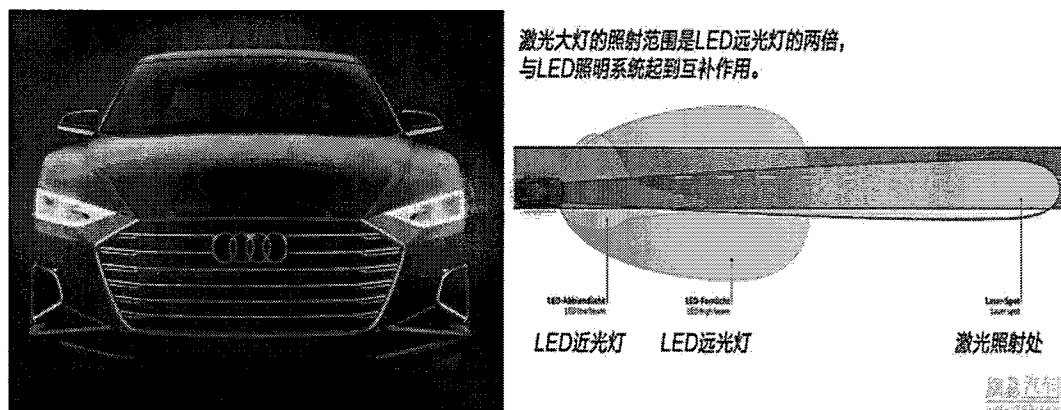


图 1-2 奥迪限量版 R8 激光远灯

1.1.3 激光通信

未来激光的发展除了照明领域，也将在可见光通信领域大展宏图，并逐渐取代 LED 成为主流光源。2017 年 2 月 8 日中村修二在台湾发表演讲时表示，基于激光照明的无线光通讯技术 LiFi (Light Fidelity) 是未来的发展趋势，通过在 LED 或激光灯中植入芯片，让 LED 灯变为一个无线热点，利用快速的光脉冲，无线传输，二进制编码而达到通信的目的。相对于 WiFi，LiFi 技术有很多优势，建设便利，只需在照明设备里植入芯片就可以接受信号；高宽带、高速率，使用 LED 的 LiFi，传输资料比 WiFi 快上 10 倍，激光的 LiFi 更快上百倍；绿色低能耗，光对于人来说是一种无辐射的绿色物质，对于人类健康而言，光适合作为通信媒介；安全可靠，利用电磁波传输的 WiFi 可以穿过物体，而可见光不能穿透墙体，这样有利于信息的安全性；除此之外 LiFi 还可以精确定位。实际上，早在 2011 年，来自英国爱丁堡大学的哈斯研究团队在当年的全球科技娱乐设计大会就提出了这一概念，于 2012 年 10 月实现了光传输数据的技术^[12]。目前他们正在试验用激光器照明实现 LiFi，通过混合不同波长的激光产生白色光，实现双向传输，可以大大提高光传输数据的速率。用激光传输 LiFi 速率高达 100Gb/s，阿联酋拜已经实现了这种 LiFi 技术^[13]。不久的将来，灯具可以作为基地台，应用于家庭、教育、医疗等领域，如图 1-3 所示。

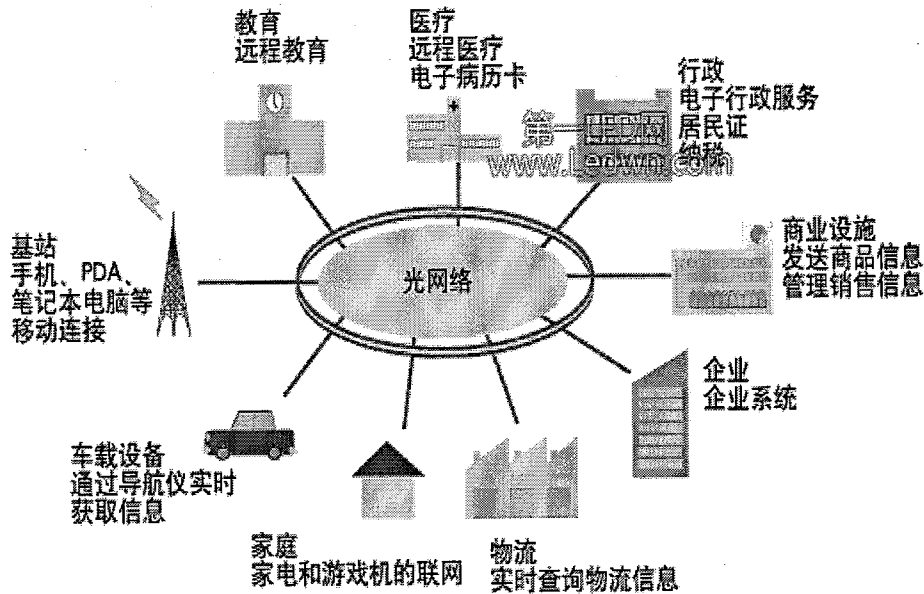


图 1-3 激光通讯

1.2 GaN 基激光器的基本结构

GaN 基半导体激光器一般有增益介质和谐振腔组成，按照结构和出光面不同可以分为边发射型激光器和垂直腔面发射激光器。最常见的边发射 GaN 基激光器是由多层平行生长的半导体材料外延结构组成，谐振腔由半导体材料的两个解理面构成。为减小激光器的阈值电流，通常采用脊形波导结构，脊形两侧刻蚀可以形成横向的电流限制和光场限制。平行的半导体材料外延结构主要包括 GaN 自支撑衬底或蓝宝石衬底，上下限制层，上下波导层，量子阱有源层构成，有源区两侧的限制层和波导层是为了防止光的泄露。外延结构经过蒸镀金属形成欧姆接触，脊形两侧通过沉积绝缘膜防止电流从脊形两侧注入。通过外加偏压向 p-n 结中 p 区一侧注入空穴和 n 区一侧注入电子进而在有源区复合，当有源区的增益大于激光器损耗时，激光最终从解理端面发射出来，如图 1-4 所示的为 GaN 自支撑衬底上生长的激光器结构示意图。通过对激光器基本结构、发光原理的了解，便于更深入的分析激光器特性和可靠性。

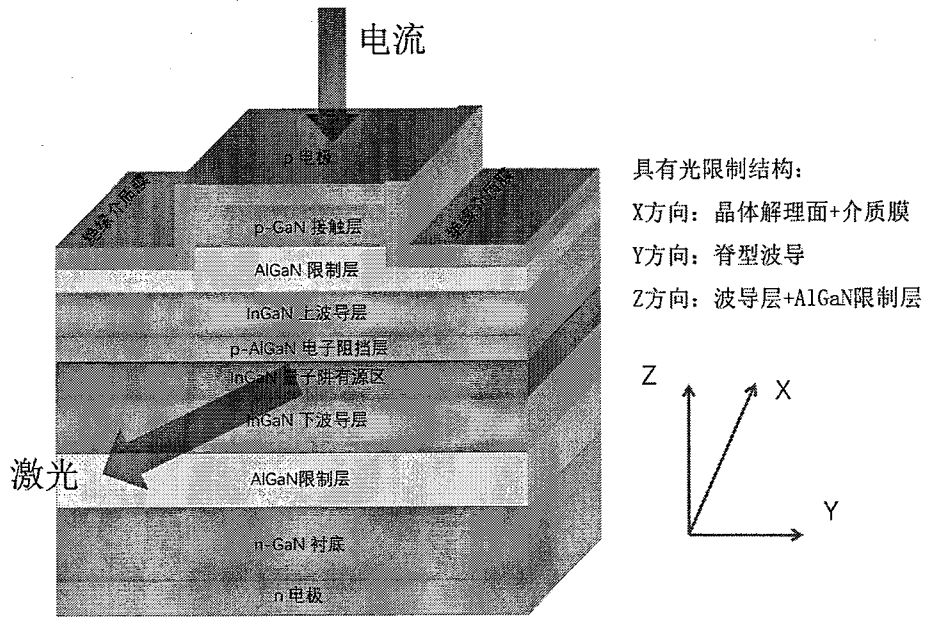


图 1-4 GaN 自支撑衬底上生长的激光器结构示意图

1.3 GaN 基激光器的可靠性研究进展

人们对 GaN 基半导体材料的认识和研究就像一场马拉松式的赛跑，经历了瓶颈期和稳定发展的阶段。自 1928 年 GaN 材料被首次合成却因单晶制备的困难其研究受到了阻拦。而后直到 1969 年，单晶 GaN 薄膜的成功制备给半导体研究工作者带来了新的希望。1971 年，Pankove 等人成功制备了第一支 GaN 基发光二极管^[14]，为 GaN 基光电器件发展奠定了基础。伴随着 MOCVD 技术的广泛研究，高质量晶体生长的实现推动了 GaN 基材料的研究和应用。1989 年，Akasaki 和 Amono 利用 MOCVD 生长技术第一次报道了 Mg 掺杂的 P 型导电单晶 GaN 基发光二极管^[15]，1993 年 Nichia 公司的 Nakamura 等利用 MOCVD 技术制备出了第一支双异质结 GaN 基蓝光发光二极管^[16]；同年，通过改变生长条件和衬底温度参数，利用双气流(Two Flow)MOCVD 技术成功研制了高功率 InGaIn/AlGaIn 双异质结发光二极管和 InGaIn 量子阱结构紫外发光二极管^[17]；在 1995 年 InGaIn 量子阱蓝光激光器被研制成功并迅速走向市场化^[18]，这一具有划时代意义的蓝光激光器在国际上掀起了氮化物研究的新高潮。虽然，目前 GaN 基激光器在市场上已经十分成熟稳定，然而激光器比发光二极管的电流密度大两个数量级，而且光功率密度高，随着工作强度的加剧和工作时间的延长，半导体激光器的可靠性会发生变化，如斜率效率降低、阈值电压升高、阈值电流增加、光电转换效率降

低等等，这些表征光电特性的参数变化涉及到衬底材料体系选择、外延结构生长质量、器件结构合理设计、封装散热工艺等因素。保证半导体激光器高功率输出以及高可靠性已成为半导体科研界和工业界大力关注的焦点。因此，研究激光器的退化机制仍然势在必行。

最开始研究激光器退化是基于晶格匹配的 AlGaAs/GaAs 激光器退化现象的分析^[19]。首先，在传统的 III-V 族 GaAs 基半导体激光器中，位错的滑移和增殖导致了暗线缺陷的形成^[20]，这是初期半导体激光器退化的主要原因。在 GaN 基激光器中，由于 GaN 具有很大的结合能（原子键能高达 8.92eV）且内部原子键较短，不容易发生位错的滑移和增殖；其次，早期关于 LED 退化的研究主要是与封装问题相关，随着封装问题的解决，LED 的电流密度可以达到 20A/cm²，寿命高达 100000 小时，满足了大多数的生产商，而对于 GaN 基激光器的可靠性研究似乎更复杂。最早的激光器是生长在蓝宝石衬底上的，但是蓝宝石衬底与 GaN 薄膜存在一定的晶格失配（16%）和热失配（25%），导致器件的位错密度高达 10⁹-10¹⁰/cm²，在 GaN 基激光器中，这些高密度的位错会给漏电流提供传输通道，从而降低激光器的可靠性，并且它还会作为非辐射复合中心进行非辐射复合，从而降低激光器的发光效率。第一只由 Nakamura 研制的在室温直流下连续工作的紫光激光器寿命才 1s^[21]，因此提高寿命的有效方法就是降低位错密度。1997 年，Nichia 采用侧向外延的生长（ELOG）技术^[22]将激光器有源区的位错密度从 10¹⁰/cm²降低到 10⁷/cm²，同时采用 p-AlGaIn/GaN 应变超晶格结构，有效地降低了 p 型超晶格层的电阻率，降低了激光器的阈值电压，在室温下激光器连续工作的寿命已超过 10000 小时。2003 年，Takeya 等人针对激光器结构中存在穿透位错的数量对其寿命的影响做了系统的研究^[23]，2004 年 Tomiya 也针对侧向外延衬底上生长的激光器寿命和穿透位错密度的关系作了统计分析^[24]，两个研究团队均发现穿透位错的增加会降低激光器的寿命。当激光器的位错密度从 10⁷/cm²降低至 10⁶/cm²量级时，激光器工作寿命可达 15000 小时^[25]。研究表明侧向外延技术（ELOG）可以有效改善有源区的位错密度，延长激光器的寿命。同时发展起来的自支撑 GaN 衬底摆脱了晶格不匹配的缺点，因此将 ELOG 技术运用到自支撑 GaN 衬底上，激光器的寿命提高到 10000 小时。2015 年 Nichia 研发的蓝光激光器的寿命可达 25000 小时，其阈值电流密度为 0.68kA/cm²，波长为 525nm 绿光

激光器的寿命也和蓝光激光器接近。随着 GaN 衬底技术的不断成熟，相关行业也加快了对 GaN 基激光器的研究，市场上激光器的波长已经扩展到紫外、紫光、蓝光及绿光范围。

随着激光器应用范围的扩展，在实际生产研发中需要通过质量反馈以提高激光器的可靠性水平，国内外很多研究团队在 GaN 基激光器退化方面做了不少工作。国外一些处于领先水平的科研机构和对激光器的寿命测试和退化分析作了比较深入的研究。意大利 Matteo Meneghini 研究团队在蓝光激光器的工作条件（电流、光场、温度）与可靠性的关系进行了详细的研究^[26-30]，认为电流是导致激光器失效的主要动力，而温度只是加速了退化，光场则对激光器的退化没有显著的影响。2016 年，Meneghini 通过对绿光激光器退化前后光学特性的研究^[31]，如图 1-5 所示的老化前后激光器腔面 CL 图像和光谱，并结合扩散模型，提出绿光激光器的退化主要是扩散过程。2004 年 O.H.Nam 等人通过 SIMS 测试 Mg 元素分布结果发现 P 型层中掺杂元素 Mg 向有源区扩散，有源区非辐射复合中心增加导致了激光器阈值电流的增加^[32]。2006 年波兰 L.Marona 研究团队也提出了非辐射复合中心导致了激光器的退化。2011 年 L.Marona 研究团队通过 SIMS 测试了 Mg、H、Si 元素的分布，发现退化后的激光器中这些元素分布并没有发生变化^[33]。还有日本的 Sony、美国的 Corning，德国的 Osram 公司等也有相关的研究。

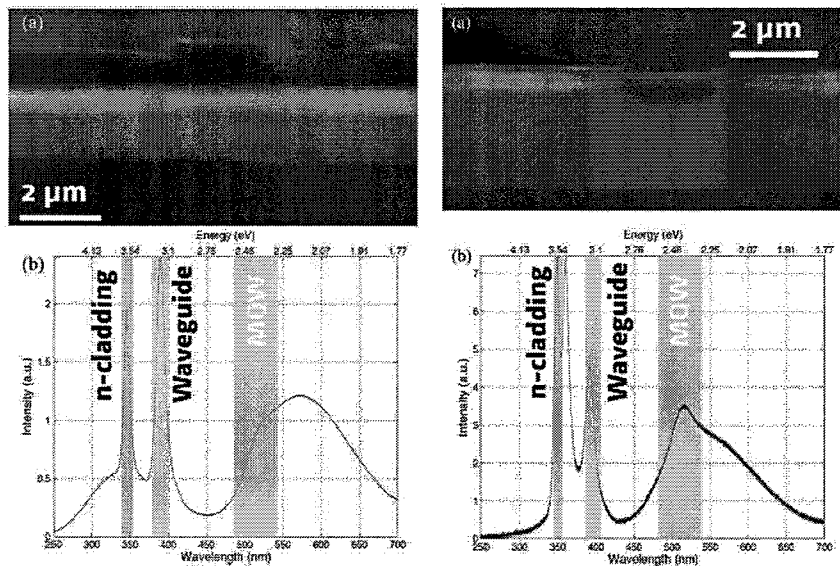


图 1-5 老化前后激光器腔面 CL 图像和光谱^[31]

国内的科研院所如北京大学、厦门大学及中科院在材料质量和器件指标方面取得进展的同时，对激光器的寿命和失效机理也作了相关的研究报告。中科院苏州纳米所对蓝绿光激光器的研究也有了突破性进展，2016年，室温下连续工作的蓝光激光器寿命可达到5000小时，绿光激光器的波长已达508nm，寿命可达1000小时。杨辉团队在蓝光激光器的光学、电学及热学退化方面作了不少的工作^[34-36]，提出了激光器的缓慢退化主要是退化过程中产生了新的非辐射复合中心，该缺陷的激活能为10.2meV^[37]。针对退化激光器表面鼓包的产生确定了鼓包附近管状缺陷导致激光器的快速退化^[38]。

对GaN基激光器的可靠性研究不仅可以从根源上对激光器的失效机理进行分析，进而从生长、工艺以及使用方面进行改进和优化，无论对于激光器科研还是激光器产业都有着极其重要的学术价值和实用价值。

1.3.1 激光器的可靠性评估

可靠性作为衡量激光器产品的重要指标越来越为人们所重视，通过对半导体激光器的可靠性研究：（1）可以准确的判断半导体激光器的失效机制；（2）测试半导体激光器的实际工作寿命；（3）为半导体激光器的老化性质研究提供依据；（4）改进器件设计和工艺技术提高性能。

可靠性的评估根据不同的需求有不同的评估参数，如可靠度、失效概率、有效寿命等等，结合这些数据可以对激光器作出失效分析，并对某批次产品的可靠性水平作出评价。根据长期对激光器及其他元器件的大量测试数据统计分析，发现激光器的失效率与时间的关系呈现业界通常所说的“浴盆曲线”，曲线呈现两边高中间低的分布，分别为早期失效期、偶然失效期和最终失效期。早期失效的产品缺陷较多，寿命较短，通过对老化实验的合理设计，可以排除在浴盆曲线中处于早期失效期的样品，选取性能优良的样品进行长期的寿命测试。长期寿命测试的样品性能的失效主要表现在光电性能的退化，尤其是输出光功率的退化，因此常以输出光功率的变化来预估激光器的寿命。

1.3.2 激光器的特征及退化特征

激光器的特性主要分为静态特性和瞬态特性两种，考虑到应用于实际生产，科研工作者对于激光器的静态特性关注地更多，其中包括光输出特性、阈值特性、

光谱特性、斜率效率、光电转换效率等等。

激光器的退化特征一般表现在电学、光学、热学及形貌特征上，发生退化的区域一般为半导体材料内部、金属互连部位、材料封装部位。如图 1-6 所示为边发射型半导体激光器的主要退化机制，实线代表直接相关，虚线代表间接相关。

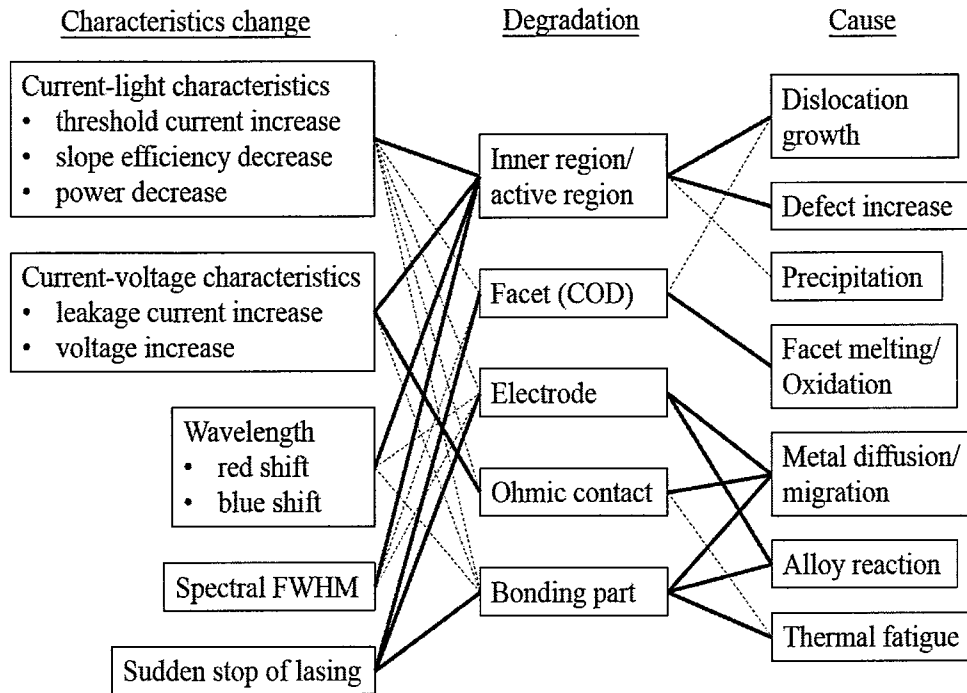


图 1-6 半导体激光器主要的退化机制^[39]

1.3.3 激光器的失效模式

当激光器工作时间延长，它的发光效率和电光转换效率通常会下降。通过 Power-time 曲线或者 Current-time 曲线，退化可能出现三种不同的模式：快速退化、缓慢退化和突然退化。按照退化机制来分，有表面退化机制和体退化机制。体退化机制例如有 Mg-H 复合体的形成^[32,40,41]、Mg 点缺陷的扩散^[32]或穿透位错^[42]，而表面退化机制如腔面退化^[43]、电极表面孔洞或山丘等。如图 1-7 所示，这是目前我们课题组对 GaN 基蓝光激光器进行寿命试验统计得到的几种失效模式。

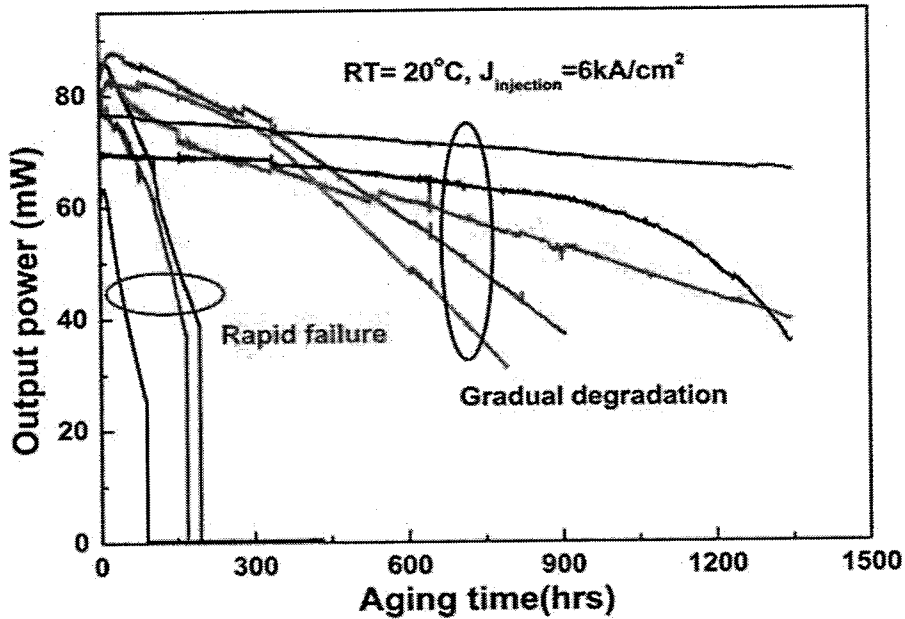


图 1-7 激光器输出功率随老化时间的变化曲线

1.3.3.1 突然退化

突然退化是一种表面退化机制，是瞬间发生的，不像快速退化和缓慢退化有明显的退化趋势，常见的突然退化有激光器腔面退化和电极损伤。

腔面退化通常发生在激光器的前腔面，自激光器被研制出来，第一种被报道的失效模式就是是灾变性腔面损伤^[44]，如图 1-8 (a) 所示是激光器发生腔面损伤的 SEM 图。由于激光器在解理时腔面可能产生缺陷以及腔面存在的表面态，输出光密度较高时会增加表面态的复合和光吸收，释放热能，进而引起局部温度升高，带隙变窄能量降低，进一步增加了腔面的光吸收，继续产生额外的自由载流子，发生非辐射复合过程。不断循环，最终造成腔面的局部熔化，发生灾变性损伤。另一种是腔面的碳沉积^[45]，如图 1-8 (b) 所示的腔面碳沉积。碳源主要来源于工艺过程中残留的有机物，在无氧气氛下，光促进了碳氢化合物热激活发生解吸裂解 C-H 键，导致碳沉积物的形成，加速了退化。一些研究团队也观察到相同的现象，Schoedl 发现在 N_2 气氛下工作的激光器有一层厚的沉积物的形成，通过加 O_2 ，这些沉积物得到了消除，认为水蒸气的出现加速了腔面的氧化。Kim 研究团队也发现了碳沉积物的形成。通过改善封装条件，在 Ar 气氛或者 N_2 气氛下，另外加有 O_2 气氛和没有 O_2 气氛对比发现，在干燥的 N_2 气氛下退化速度最

快；而 O_2 的加入减慢了退化过程；腔面碳沉积不仅出现在激光器脊形区域也出现在 p-n 结处，碳沉积物的形成降低了器件寿命。

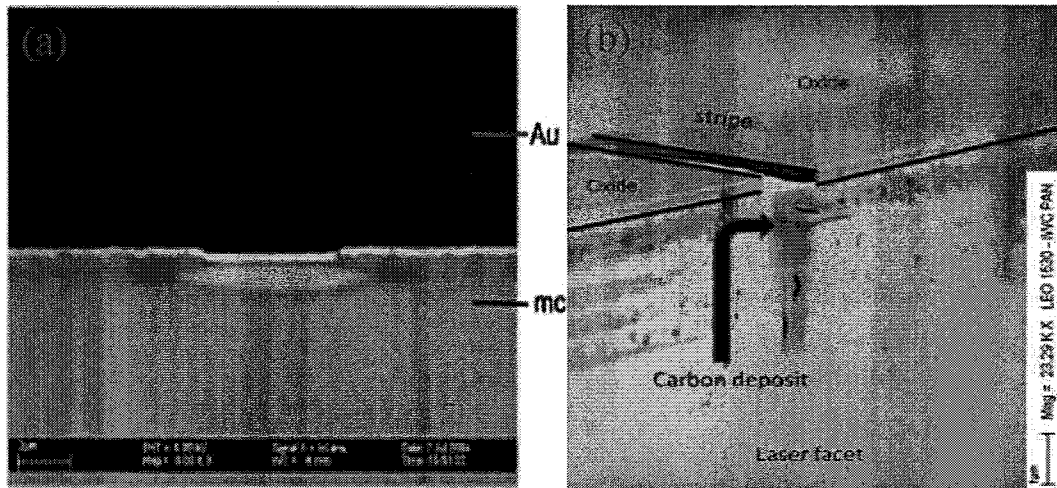
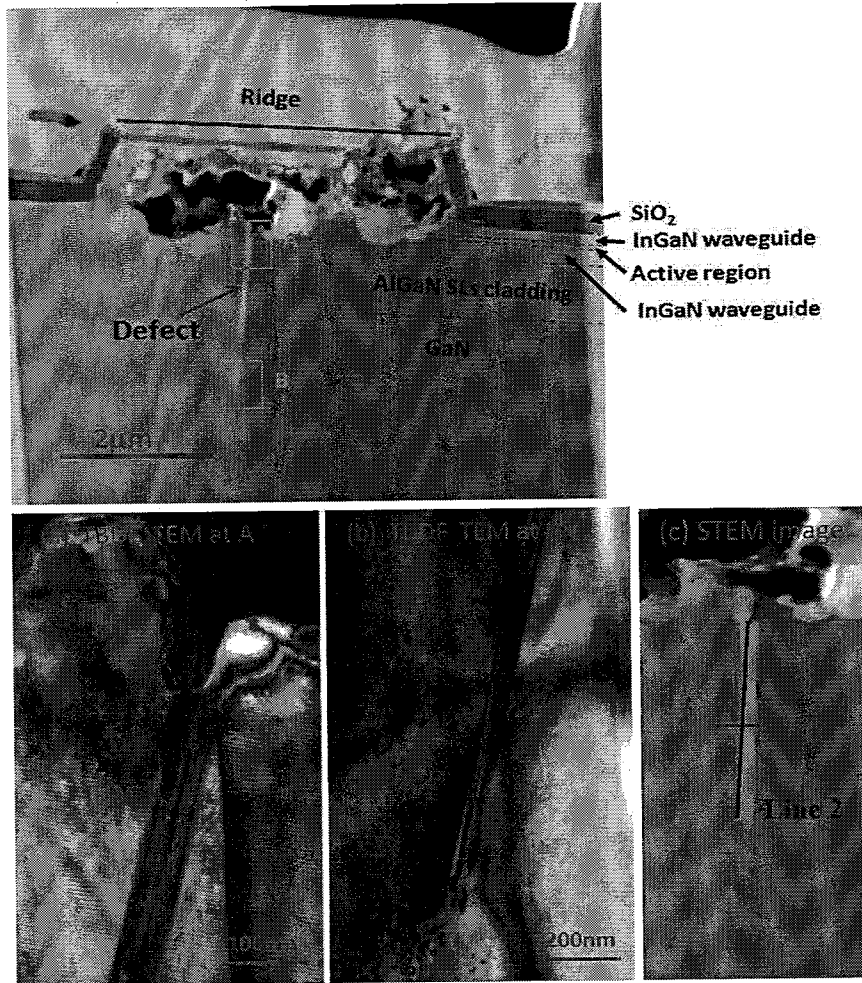


图 1-8 (a) GaN 基激光器的灾难性腔面损伤 (b) 腔面碳沉积

电极退化通常是金属与半导体材料之间的扩散、合金反应，从而在电极表面产生孔洞、山丘及裂纹等缺陷，导致激光器的开路或短路。另外，如果封装过程中使用低熔点的焊料，当器件工作时，焊料与电极的焊接部分会发生合金反应从而形成孔洞，影响激光器电流的注入。

1.3.3.2 快速退化

快速退化通常发生在老化前几百个小时，退化特征表现为光输出功率的快速降低或工作电流的快速增加，如图 1-7 红色椭圆标记的。我们知道在外延层生长过程中会引入堆垛层错、V 型缺陷、位错团簇、微孪晶及失配位错等，这些缺陷都极有可能导致激光器的快速退化。其中，位错的运动和增殖是引起 GaAs 和 InP 基激光器快速退化的主要原因，但是针对 GaN 激光器，如 1.2 节所述的由于 GaN 具有较大的结合能，内部原子键较短且结合强，不会发生位错的增殖。2016 年温鹏雁报道的关于 GaN 基蓝光激光器快速退化机制，解释了老化后的激光器由于内部存在管状缺陷，如图 1-9 所示的 STEM 图像，缺陷作为非辐射复合中心引起局部温升，造成材料熔融并产生空洞导致激光器失效^[38]。因此 GaN 基激光器发生快速退化主要是由于缺陷的存在引起的。

图 1-9 激光器样品的 STEM 图像^[38]

1.3.3.3 缓慢退化

缓慢退化是一种很常见的失效模式，一般出现在几千甚至上万小时的激光器中，如图 1-7 黑色椭圆标记的。对于半导体激光器缓慢退化的研究早于 1970s，其退化一般发生在芯片上，主要原因是：深能级缺陷、点缺陷、杂质原子的扩散等。不同于 GaAs 基半导体激光器，目前引起 GaN 基激光器退化的缺陷主要有两种：线缺陷（主要为穿透位错）和点缺陷。

穿透位错主要起源于衬底内部，并在激光器工作过程中向有源区延伸。在蓝宝石衬底上生长的 GaN 基激光器穿透位错密度通常都很高，激光器工作过程中穿透位错增加会导致泄露电流的增加。德国 M.Furitsch 通过对不同位错密度的 GaN 基激光器的寿命进行研究，发现穿透位错密度对激光器寿命有一定的影响，高穿透位错密度的激光器具有较短的寿命；2003 年 Sony 公司 Tomiya 通过比较

老化前后激光器的 TEM 结果发现，位错的形态未发生明显的变化，该激光器退化的主要是由于有源区缺陷沿着穿透位错扩散，该机制为一种缺陷扩散机制^[42]。

点缺陷的存在对激光器长期缓慢退化将产生不利影响，而且有源区中的点缺陷往往对激光器的寿命起着决定性作用。通常缓慢退化发生的过程是由于材料中本身存在的点缺陷发生非辐射复合，或者在激光器工作过程中产生了新的非辐射复合中心。2010 年，Meneghini 对退化的 InGaN 激光器进行了电学和光学特性的分析，并对比了具有相同外延结构的 LED 样品，结果发现了该退化现象无关器件结构和脊形对电流的限制作用，可能是有源区中点缺陷的产生引起的相同的退化机制^[46]。2015 年 Meneghini 研究了绿光激光器在不同老化条件下退化机制，发现老化激光器表面 518nm 单色 CL 图像中脊形区域发光强度明显变暗，如图 1-10，认为点缺陷浓度的增加导致了绿光激光器的退化^[47]。

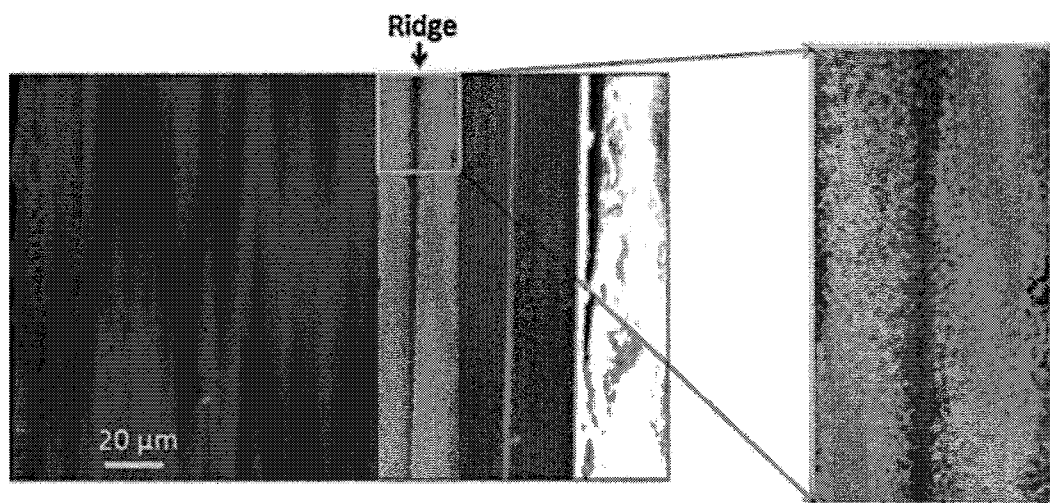


图 1-10 老化激光器表面 518nm 单色 CL 图和 SEM 图的叠加^[47]

1.4 本论文的研究意义及工作安排

本论文主要以提高激光器可靠性、增加激光器的输出功率为目标，利用电学、光学特性的变化来研究激光器的退化机制，对于完善器件结构、制作工艺和封装条件、提高其性能有着重大的意义。主要的研究工作安排如下：

第一章详细介绍了 GaN 基激光器的应用和发展前景，目前国内外研究团队关于 GaN 基激光器可靠性研究进展的总结，以及激光器失效模式的分析。最后是对本论文研究意义和研究工作安排的简要介绍。

第二章介绍了 GaN 基激光器的生长系统和老化系统，老化实验中常用的退化机制的表征测试方法原理的介绍：SEM、TEM 等微观结构形貌的分析；CL、PL 等发光特性的分析；EBIC、ORIRCH 等定位漏电的电学性质的分析。

第三章分析了 GaN 基蓝光激光器在恒电流条件下老化的退化现象。激光器工作 400 多小时后，观察老化初期光功率快速下降，老化后芯片脊形边缘出现孔洞，建立了孔洞密度与初始光功率下降速率的关系，发现孔洞密度与光功率下降速率成正比例关系。通过对孔洞处形貌和元素能谱分析发现，孔洞处 Au 和 Ti 发生了反应。

第四章分析了 GaN 基绿光激光器在恒定电流条件下老化的退化现象。老化后的激光器通过荧光显微镜测试未显示有源区发生退化，通过低温 PL 评估老化后激光器的内量子效率没有下降，而激光器脊形区域微区 PL 发光强度变暗，推测可能是金属与半导体之间发生了扩散。

第五章研究了 GaN 基激光器 P-I 特性曲线的非线性机制。通过测试远场图、不同脉宽的 P-I 曲线以及有限元分析方法对温度的模拟等测试方法，分析发现短腔长激光器沿腔长方向的温度分布不均匀导致了光场分布的差异，使得波导的稳定性不好，模式发生跳变，产生 kink。

第六章对全文工作进行了总结和展望。

第二章 GaN 基激光器可靠性及常用的退化机制表征方法

激光器的可靠性研究涉及到材料生长到工艺流片再到封装量产等一系列的过程，通过不断地找出造成低性能、低寿命的各种原因并逐步优化改善，才能提高激光器产品的可靠性。

2.1 GaN 基激光器的生长

GaN 基半导体材料外延生长中用到的比较普遍的方法主要有氢化物气相外延 (HVPE)、分子束外延 (MBE)、金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 等等，这些外延生长技术方法各有优缺点。本论文中 GaN 基激光器外延基本结构主要采用的是 MOCVD 技术生长。同其他外延生长技术相比，MOCVD 已经成为当今半导体光电子产业主流的外延生长技术，MOCVD 具备的优点有：生长成本较低；薄膜生长速率高，厚度可精确调控；薄膜均匀性好，适宜量产等。我们的设备为德国 Aixtron 公司的 Thomas Swan 机台，采用的是紧耦合喷淋式反应室设计。使用的 III 族有机源为三甲基镓、三乙基镓、三甲基铝以及三甲基铟，V 族氮源为氨气，采用硅烷和二茂基镁分别作为 n 型和 p 型掺杂源，载气为 H_2 和 N_2 。通过控制 MOCVD 系统的温度、压力、流量、V/III 比等生长条件，并调节各层厚度、组分等参数，最终生长出 GaN 自支撑衬底的蓝光和绿光激光器外延结构。

2.2 GaN 基激光器的封装

要实现激光器的商业化，在完成外延生长和器件工艺后，需要对 GaN 基激光器进行散热封装，以提高其可靠性。GaN 基激光器一般采用 TO 封装形式，该技术由于成本低、工艺简单已经发展的相当成熟，TO56 和 TO9 是 GaN 基激光器常用的封装形式，所用底座直径分别是 5.6mm 和 9mm，激光器通过 AuSn 焊料焊接在 AlN 过渡热沉上，过渡热沉通过焊料焊接在管座上，激光器的正极通过金线与管脚相连，激光器的负极连接另一个管脚，整个结构通过内充惰性气体的管帽密闭封装。工作过程中，激光器芯片产生的热量通过高热导率过渡热沉导向基座，有效地增强了激光器的散热能力，大幅度地降低了有源区的结温，减小了激光器热阻，从而可以延长激光器寿命。

2.3 GaN 基激光器的老化

激光器的应用已经扩展到更广的领域，为了满足更高的性能，激光器需要维持更长的寿命，因此激光器退化机制的研究对于提高激光器的可靠性具有很重要的意义。

我们的激光器老化系统是一个稳恒控制系统，恒电流恒温老化和恒功率恒温老化。老化系统包括三部分：电源设备、探测设备及数据收集设备，如图 2-1 所示。通过夹具固定 8 支待测的激光器，测试过程中系统主要采用风扇制冷和恒温水槽，可为激光器提供良好的散热机制和恒定的温度控制。并通过软件设置对单个或一组激光器提供恒定电流驱动，各电流驱动相互独立互不影响，检测每支激光器的输出光功率随老化时间的变化。在恒定电流条件下老化，激光器的寿命认定为光功率下降到初始值一半时所对应的时间。恒定功率条件下老化时，激光器的寿命认定为注入电流上升为初始值二分之三时所对应的时间。

恒温系统：激光器可靠性和寿命不仅受到电流和光场的影响，还受温度影响。当激光器在恒定电流条件下老化时，工作过程中激光器会存在热损耗，另外环境温度也会发生变化，电流对温度的敏感变化从而导致激光器的输出功率改变，恒定电流工作时为了控制激光器在老化过程中结温的恒定，排除温度因素对激光器退化的影响需要对激光器进行恒温处理，我们采用的是恒温水槽。

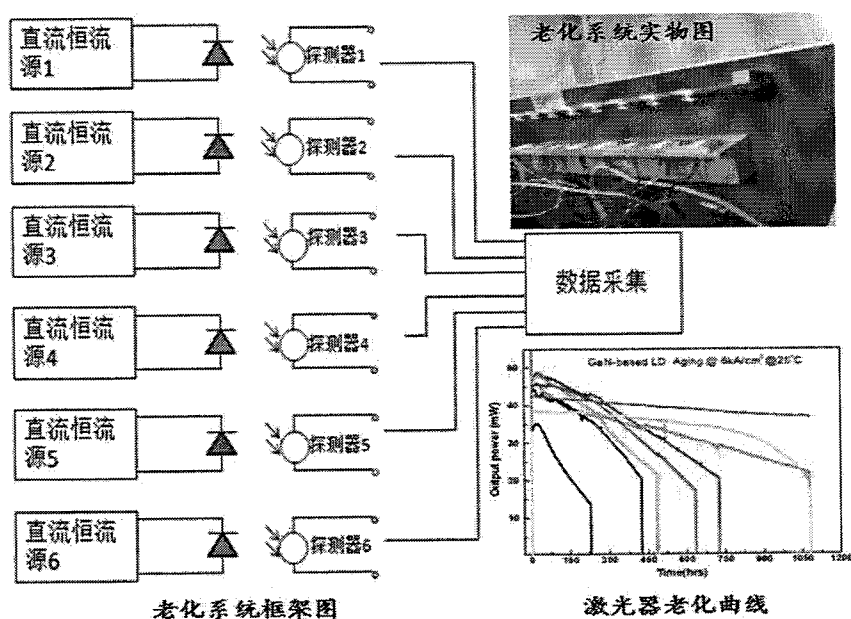


图 2-1 激光器老化测试系统

老化试验大致步骤是：首先在激光器老化前对激光器的各项电学（I-V，P-I 等等），热学性能（热阻、结温）进行测试，初选出质量优异的一批激光器进行老化测试。为确定激光器的寿命，将激光器分为多组；然后分别采用不同驱动电流（电流低于阈值、电流为阈值 2 倍，电流为阈值 3 倍等等）对每组激光器进行老化；老化过程中，定时记录下激光器输出光功率的变化并进行相应电学性能的测试；最后累计到达老化时间或者输出光功率发生快速变化的趋势即停止实验。

通过老化系统和老化测试的建立，完成了 GaN 基蓝、绿光激光器的老化寿命测试。老化后激光器退化现象的分析需要辅以相应的表征方法，下节将介绍常用的表征方法。

2.4 常用的退化机制表征方法

2.4.1 微观结构表征方法

2.4.1.1 扫描电子显微镜（SEM）

原理：扫描电子显微镜简称扫描电镜，主要是通过二次电子信号所成的像来观察样品的表面形貌。当一束能量很高的聚焦入射电子轰击样品表面时，电子束与样品之间相互作用会产生各种效应，被电子束照射的区域将产生二次电子、背散射电子、俄歇电子、透射电子、特征 X 射线等，经过探测器和信号处理系统后送到显示图像系统记录成像，如图 2-2 所示为 SEM 原理示意图。

应用：在观察分析样品微观形貌、化学成分和晶体缺陷等方面有着广泛的应用。扫描电镜根据以上不同信号产生的机理，采用不同的信号检测器，实现选择检测：对二次电子的采集，可分析有关物质微观形貌的信息；对背散射电子的采集，不仅可分析形貌特征，还可根据原子序数衬度定性进行成分分析；对 X 射线的采集，可获得样品化学成分的信息；如果装配上 X 射线能谱仪（EDX），可对显微形貌和微区成分同时进行分析。

优点：扫描电镜制样简单，可观测直径 10-30mm 的大块试样，对于导电的块状样品可直接粘在样品台上，不导电的样品进行喷金处理；另外比较大的优势就是放大倍数可以从十倍到十万倍连续可调；图像景深远远超过光学显微镜。

装置：本文使用的 SEM 设备型号是美国 FEI 公司的 Quanta 400 FEG。设备配有附件 EDX 及 CL 测试系统。

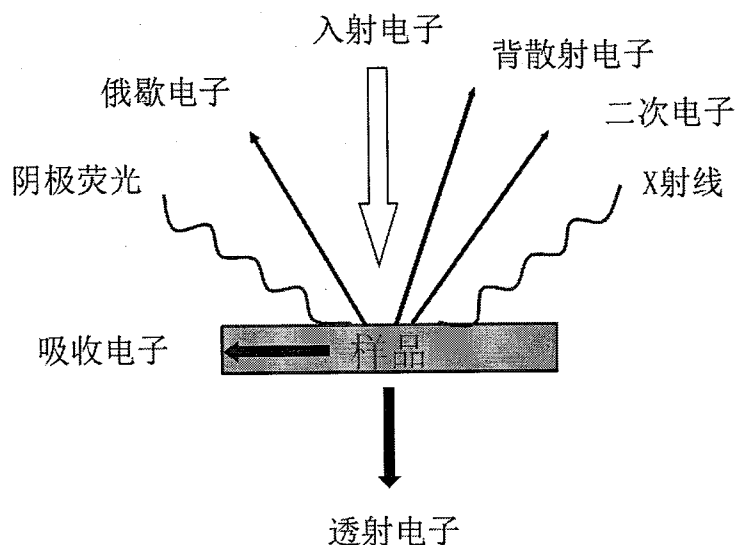


图 2-2 SEM 原理示意图

2.4.1.2 透射电子显微镜 (TEM)

原理：透射电子显微镜是用波长极短的聚焦电子束作为照明源，由电磁透镜将电子束聚焦透射到具有周期结构的超薄样品上，电子发生衍射后形成衍射谱，经过干涉后在像平面聚焦成像。在含有位错的晶体中，由于位错周围存在晶格畸变，畸变场引起了原子位移，于是在亮场像中会出现由位错应力场引起的增强衍射，使透射束强度降低，在位错线上观察到暗线。后来发展的电子显微镜弱束技术是一项简便的能够获得晶体缺陷高分辨衍衬像的技术，弱束技术的实质是使晶体的畸变区域满足 Bragg 衍射条件，而完整区域偏离 Bragg 衍射条件。在中心暗场像模式下，利用弱衍射电子束干涉成像，具有比一般的亮场或暗场像更高的分辨率。

应用：透射电镜具有几百万倍的放大倍数和纳米级的分辨率，可用于材料的微区组织形貌观察、晶体结构测定和晶体缺陷分析。利用原子序数衬度像，可以获得样品化学成分的信息；利用高分辨电子显微技术，可以获得原子尺度范围的缺陷密度、类型和晶体结构信息；利用附加的能谱仪和 TEM 相结合，可以对样品的微区化学成分和内部组织形态同时进行分析。

装置：本论文中使用的 TEM 设备为美国 FEI 公司的 Quanta FEG 250，测试中主要采用高分辨透射显微镜与原子序数衬度像测量方式。

2.4.2 发光光谱表征方法

2.4.2.1 阴极荧光 (CL)

原理：阴极荧光光谱 (Cathodoluminescence) 是利用入射高能电子束对半导体样品进行激发，将价带电子激发到导带并在价带留下空穴，由于导带能量高不稳定，被激发电子又重新跃迁回价带，并释放出能量 $E \leq E_g$ 的特征荧光光谱。CL 谱是一种非破坏性分析方法，和扫描电镜相结合可获得与形貌特征相关的高空间分辨率光谱结果，适合于纳米结构和体材料的分析。

应用：利用阴极荧光光谱，不仅可以进行表面形貌分析，还可研究半导体材料的发光特性，获得样品中非辐射复合发光中心的空间分布情况，尤其适合于各种半导体量子阱、量子线、量子点等纳米结构的发光性能研究。

优点：（1）可以在样品表面同一个微区同时测量该微区的二次电子显微图像和阴极荧光光谱，并进行对照分析，对微区同时进行光学性质和结构缺陷的分析；（2）通过测量样品的单色和全色阴极荧光显微图像，可获得扫描区域的二维分布图像，可对缺陷进行无损的检测；（3）当对样品进行高空间分辨率的阴极荧光微区扫描测量时，有可能直接观测样品表面的穿透位错所导致的发光强度减小所引起的暗点^[48]，从而对位错密度直接进行计数。

设备：本论文使用的是 MonoCL3+阴极荧光谱仪，为配备在扫描电镜上的附件。

2.4.2.2 光致发光 (PL)

原理：光致发光 (Photoluminescence) 是采用光子作为激发源，在光照条件下激发材料发光的一种物理过程，可以对半导体材料发光性能进行精确地检测。当入射光子能量大于半导体材料禁带宽度时，激发光被半导体强烈吸收，产生电子空穴对，形成非平衡载流子，导带的电子和价带的空穴直接跃迁过禁带发生辐射复合，或通过禁带中的局域态发生辐射复合，能量以光子的形式释放，形成光致发光。

根据样品发光峰位和光子能量的关系 $E = hc = E_g$ 可以得到材料禁带宽度和发光波长之间的关系：

$$E_g = hc/\lambda = 1240/\lambda \quad (2.1)$$

应用：对样品的 PL 光谱强度的分析，可以反映辐射复合与非辐射复合之间的相互竞争，并评估材料或器件的质量；对 PL 光谱半高宽（FWHM）的分析还能够获得有源区材料均匀性的信息。通过微区 PL 成像，可以用于分析激光器老化前后的微区发光分析。通过低温系统控制测量得到的变温 PL 光谱可以反映材料的内量子效率，测出与杂质能级^[49]相关发光峰的能量位置，算出杂质的电离能，并对杂质的种类加以识别，还可以研究缺陷相关的非辐射复合过程^[50,51]、局域态^[52-54]和载流子运输机制^[55]。图 2-3 所示为载流子运输、释放和复合的局域态模型^[56,57]。

装置：本论文中使用的微区 PL（micro-PL）测试设备型号是日本 Nikon A1 激光共聚焦荧光显微镜，原理示意图如图 2-4 所示。整个装置包括光源、光路和分光系统、样品台、数据采集系统。

本论文中使用的低温 PL 装置是日本 HORIBA Jobin Yvon 公司的激光共聚焦荧光显微镜，型号为 LABRAM HR 800，样品装在封闭的真空装置样品台上，并采用低温冷却系统进行温度控制，激光源波长有 325nm、405nm 两种，整个光路系统处于稳定的状态，聚焦在样品表面的光斑直径尺寸约为 $2\mu\text{m}$ 。

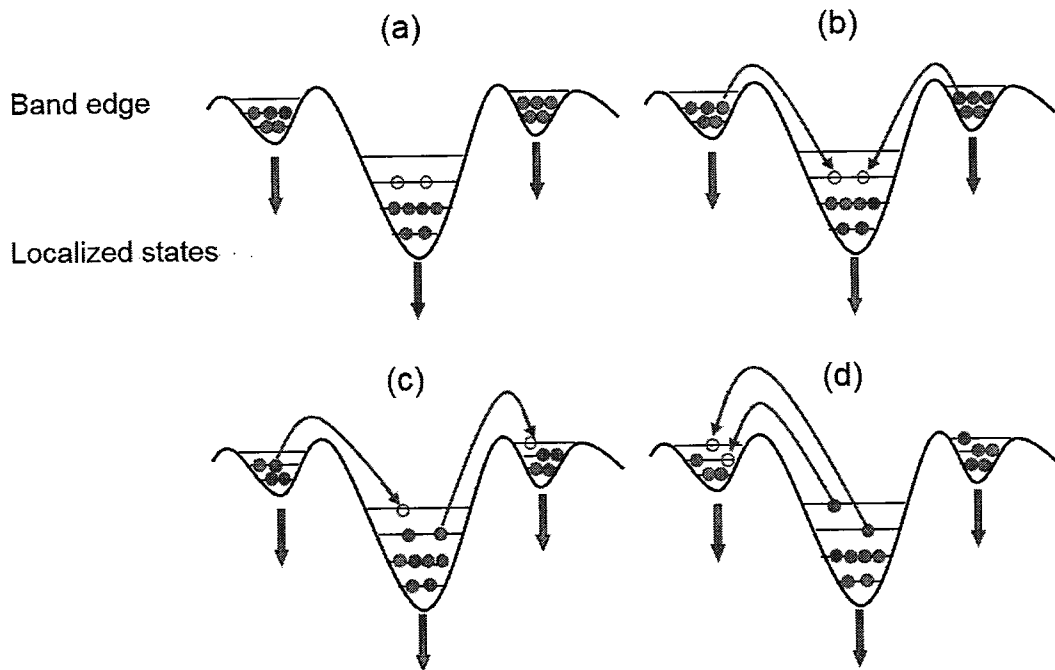
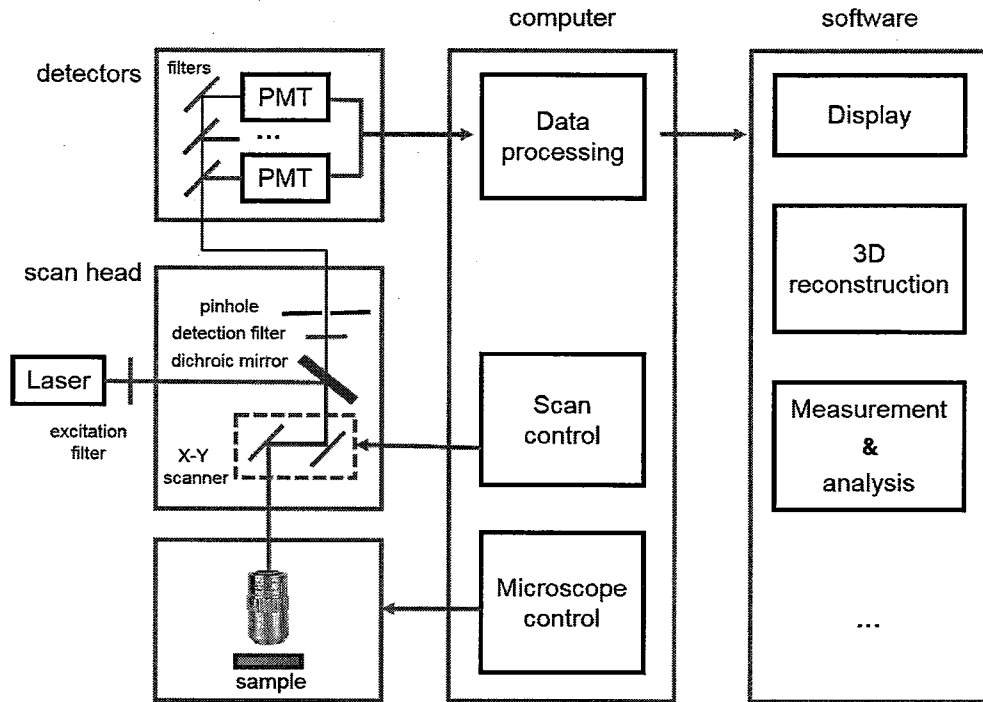


图 2-3 载流子运输、释放和复合的局域态模型

图 2-4 激光共聚焦显微镜原理示意图^[58]

2.4.3 电学特征表征方法

2.4.3.1 电子束诱导感生电流 (EBIC)

原理：电子束诱导感生电流 (Electron Beam Induced Current) 是具有能量的电子束照到有势垒的半导体器件上，在半导体内部产生电子空穴对，电子空穴对在势垒区内建电场的作用下定向运动，电子被拉向 n 区，空穴被拉向 p 区。若离势垒区的距离大于载流子的扩散长度时则自行复合，不会对输出信号有贡献，只有离势垒区一个扩散长度内的电子和空穴扩散到势垒区被内建电场分开做定向运动，如果外电路是闭合的，就会在外电路中输出一个诱导电流，该电流为感生电流。如图 2-5 所示的原理示意图。

应用：该方法可以用来分析半导体材料的扩散长度和少子寿命^[59,60]，进行集成电路中 p-n 结的定位和损伤研究^[61]。

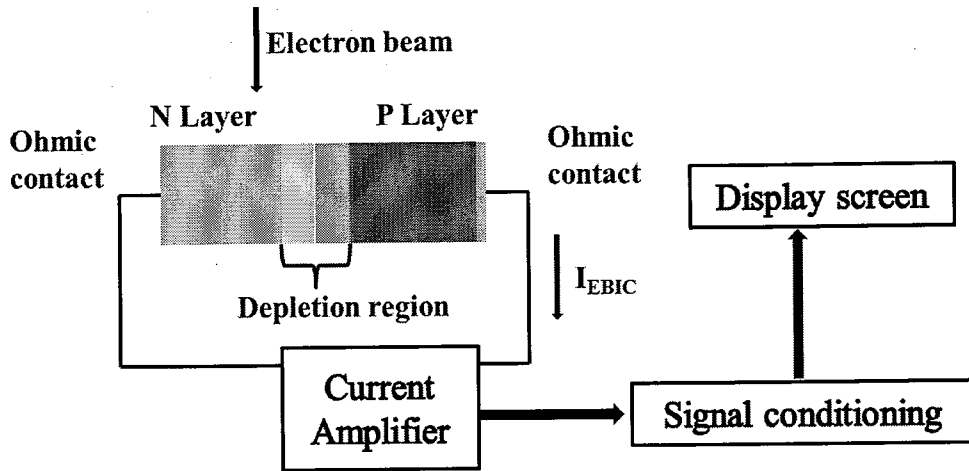


图 2-5 EBIC 原理示意图

2.4.3.2 光诱导电阻变化 (OBIRCH)

原理：光诱导电阻变化（optical beam induced resistance change）是将恒定的电压和电流作用于器件，利用激光在样品表面扫描，激光部分能量转换为热能，当施加的恒定电压 V ，由热量引起的电流的变化可用以下关系式表示：

$$\Delta I = -(\Delta R/V)I^2 \quad (2.2)$$

ΔR 是热引起的电阻的改变， I 是电流的流动。由于电阻正比于温升 ΔT 和材料的温度系数。而当施加恒定电流时，表达式如下：

$$\Delta V = I\Delta R \quad (2.3)$$

当激光扫描时，产生的热能够在无缺陷的位置自由传导开，如果金属互连线遇到缺陷时，缺陷处的温度将无法传导开，从而引起 ΔT 的变化并导致 ΔR 的变化及电流的变化，通过阴极射线管以亮度变化的形式表现出来，激光器测试原理如图 2-6 所示。

应用：亮度变化的区域与激光扫描的位置是对应的，可以定位电流泄漏路径和缺陷位置。该方法是一种无损检测方法，具有 nA 量级的测试精度，可以用于探测孔洞，硅球瘤，通孔底部的高阻区，半导体元件中的短路、布线等缺陷^[62]。

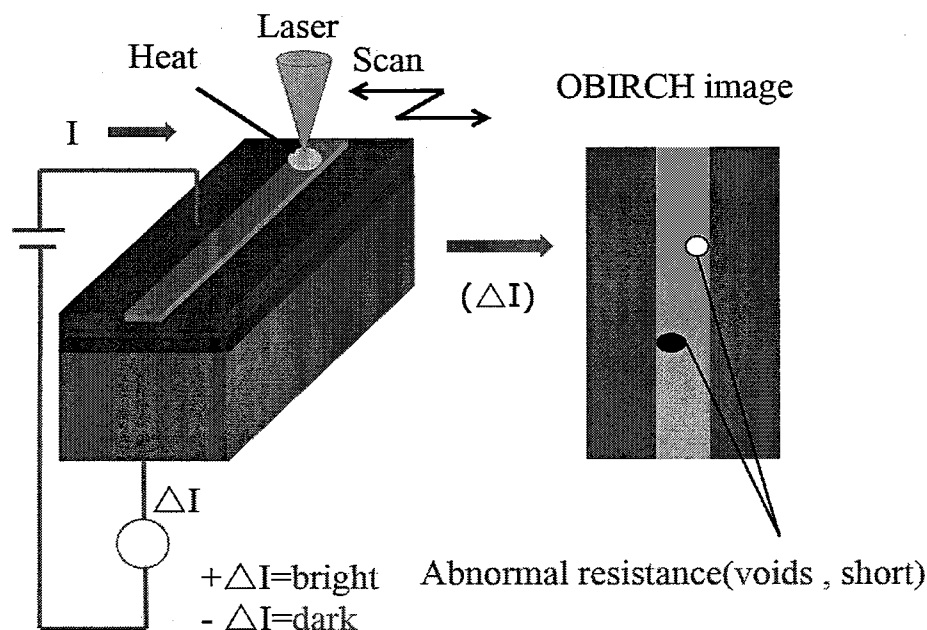


图 2-6 OBIRCH 测试激光器原理图

2.4.4 热学特征表征方法

2.2.4.1 有限元分析方法

激光器工作时热功耗会引起有源区的温升，减小激光器转换效率，降低输出功率，导致激射波长红移。因此，分析采用有限元热学模拟方法计算了温度的分布。物体的热传导方程为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q_v + K \nabla^2 T \quad (2.4)$$

式中 ρ 为材料的密度， c 为材料的比热容， T 为温度， t 为时间， q_v 为单位体积产生的热量， K 为材料的热导率。进行稳态传热计算时， $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为 0，方程的解与材料的密度与比热容无关。

激光器在工作时，将器件放在散热装置上，通常与散热装置相连接的管座底面的温度设定为 300K，求解方程 (2.4) 可以得到激光器的温度分布。

2.5 本章小结

1. 本章主要介绍了激光器外延生长设备、封装方式，并建立了老化系统对激光器寿命进行测试。

2. 介绍了激光器退化过程中一些常用的形貌特征、光学特征、电学特征、热学特征等几种主要的表征方法。

第三章 GaN 基蓝光激光器的退化机制分析

自 2011 年本课题组实现蓝光激光器的连续激射以来,对于 GaN 基蓝光激光器的可靠性分析已经有了一定的基础。2015 年本课题组温鹏雁基于热学特性分析建立了瞬态降温曲线实现了激光器退化位置的无损准确定位,为不同寿命激光器的退化机制研究作了良好的铺垫。2016 年通过对激光器微区发光特性的研究,对激光器有源区的退化有了初步的认识。本章主要将继续采用电学、光学的测试方法表征激光器的退化现象,对其表面形貌及微观结构做详细分析。

3.1 GaN 基蓝光激光器的退化现象

本章老化的激光器是同一外延片上生长的波长为 440nm 的蓝光激光器,脊形宽为 10 μm ,腔长 600 μm ,宽 200 μm 。老化条件是在室温下,采用恒定电流密度 5kA/cm²,一次性老化八支激光器。老化过程中,在固定的时间点记录输出功率随老化时间的变化规律。图 3-1 所示的为激光器老化 450 小时后输出功率-时间的曲线图。从图中可以看出,随着老化时间的增加,LD1-LD8 八个样品的光功率率都在降低,个别时间点出现波动,是由于测试引起的误差。老化曲线基本可以分为两个阶段:第一阶段,在老化初期 300 小时左右,光功率随着老化时间的增加呈现快速下降趋势,而且光功率下降的速率不尽相同,LD1、LD4、LD6 下降幅度比较平缓,LD7 下降幅度最快,与不少文献中报道的老化现象类似^[63,64];第二阶段,光功率随时间增加缓慢降低,几乎维持一个稳定的值。针对这一退化现象,猜测认为存在两种可能的机制。第一种解释为:老化初始阶段,缺陷作为非辐射复合中心被大量激活,光功率快速下降,被激活的非辐射复合中心随着老化时间的增加趋于饱和,光功率缓慢下降;第二种解释为:电流扩展造成不均匀的载流子分布。Osram 公司对不同脊形宽度的激光器在恒电流条件下的老化结果分析,并对比老化前后激光器在阈值以下的波长移动、量子效率及载流子寿命,发现激光器脊形边缘存在 3 μm 的扩展,因此认为电流扩展是造成输出功率快速下降和载流子密度下降的原因^[65,66]。按照文献中分析方法研究了我们的激光器老化前后的波长移动和半峰宽的变化情况,尚无法断定激光器是否存在电流扩展。

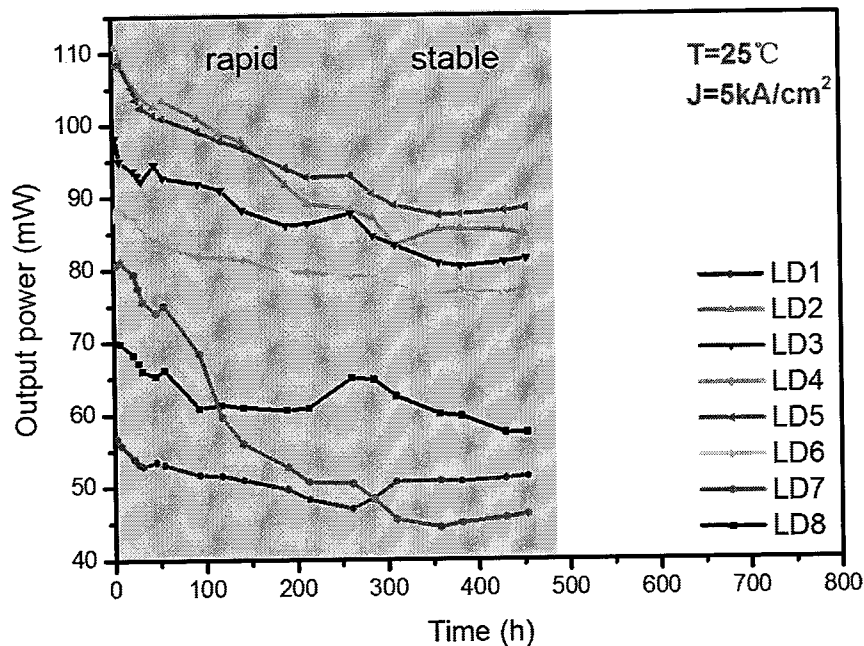


图 3-1 激光器老化过程中输出光功率-时间的曲线图

3.2 GaN 基蓝光激光器的电学特性

对于激光器的老化分析，需对其不同老化阶段的 P-I-V 特性进行了测试。

I-V 特性：主要是端电压 V 与注入电流 I 的特性曲线，纵坐标一般用对数坐标表示，反向电流是激光器加载反向电压时的电流值，目的是为了更好的反映激光器反向特性的变化。I-V 曲线测试条件：电压变化范围从 -5V 到 7V，步幅为 0.1V，最大限制电流为 300mA。图 3-2 为 8 支激光器老化前后的 I-V 曲线，我们可以发现老化后的激光器在反向 -5V 时泄露电流增加约一个数量级，正向小电压下电流明显降低。反向漏电增加的原因有非辐射复合中心的产生、V 型坑等等，V 型坑主要起源于穿透位错，V 型坑及其连接的穿透位错为反向漏电提供了优先路径，从而导致高的漏电流。激光器漏电流的增加可以用缺陷的加速产生过程解释：（1）由于缺陷的产生，在反向偏压下产生了额外的隧穿或者复合电流的增加；（2）在低的正向偏压下，缺陷作为产生中心加速了载流子的隧穿。通过 I-V 特性的分析可以反映出 p-n 结的好坏，电压、漏电、串联电阻的变化。

P-I 特性：描述的是输出光功率 P 随注入电流 I 的变化规律。曲线可以分为

两部分,小电流下的自发辐射和阈值以上的受激辐射。当注入电流大于阈值电流,激光器增益大于谐振腔损耗,输出光功率急剧增加,产生激光振荡,通过线性拟合受激辐射部分,拟合曲线与 X 轴相交点为阈值电流,阈值电流的变化反映了激光器的退化过程,有

$$I_{th} = \frac{qV}{\eta_{inj}} \cdot \frac{N_{th}}{\tau_n} \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{\tau_n} = BN_{th} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (3.2)$$

曲线的斜率正比于斜率效率,根据公式:

$$SE = \frac{hc}{q\lambda} \cdot \left(\frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \right) \cdot \eta_{inj} \quad (3.3)$$

其中 N_{th} 为阈值电流下的载流子密度, α_m 为腔面输出损耗,一般为常数, α_i 为内部损耗(包括自由载流子的吸收和光学不均匀造成的散射), η_{inj} 为载流子的注入效率。P-I 曲线中,将输出功率和电流以双对数坐标的形式 $\log P - \log I$ 表示,曲线可以通过拟合得 Power law: $P \propto I^m$, m 即为双对数坐标形式下曲线的斜率,可以反映有源区非辐射复合中心对整个复合过程的贡献, m 值越大,意味着更多的非辐射复合中心参与复合过程。小电流时,当非辐射复合过程占主导,光输出功率随电流呈超线性变化, m 值接近 2,大电流时,辐射复合过程占主导, m 值接近 1。

P-I 曲线电流测试范围从 10mA 到 300mA,图 3-3 所示的为激光器 LD8 老化前后的 P-I 曲线,可以发现老化前的阈值电流为 170mA,老化后的阈值电流增加到 190mA,同时我们将其他几支激光器老化前后的阈值电流列于表 3-1,通过对比老化前后的 P-I-V 曲线,老化后激光器的阈值电流增加,斜率效率变化不明显。影响阈值电流的因素包括有源区的体积、材料生长的均匀性、腔面镀膜、温度等等因素,本课题组初步研究发现阈值电流增加,主要原因可能是与载流子寿命相应的非辐射复合中心增加引起的。另外斜率效率可能不变或者降低,按照公式 (3.3) 推导,若斜率效率降低,有可能是内部损耗增加、注入效率降低或者两者的共同作用,而注入效率降低一般表现为载流子泄漏、电流扩展、腔面退化等等。若斜率效率不变则认为内部损耗和注入效率是没有发生变化的。

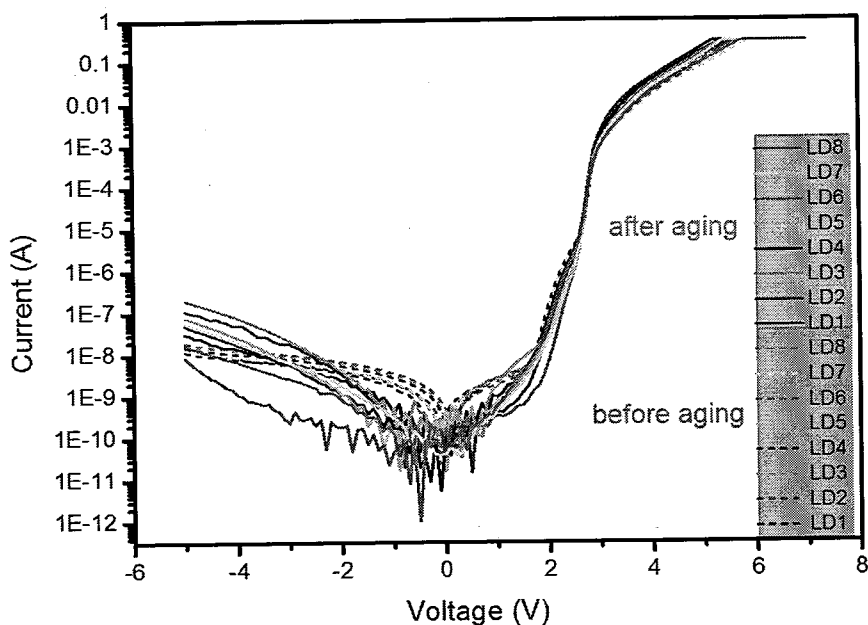


图 3-2 八支激光器老化前后的 I-V 曲线

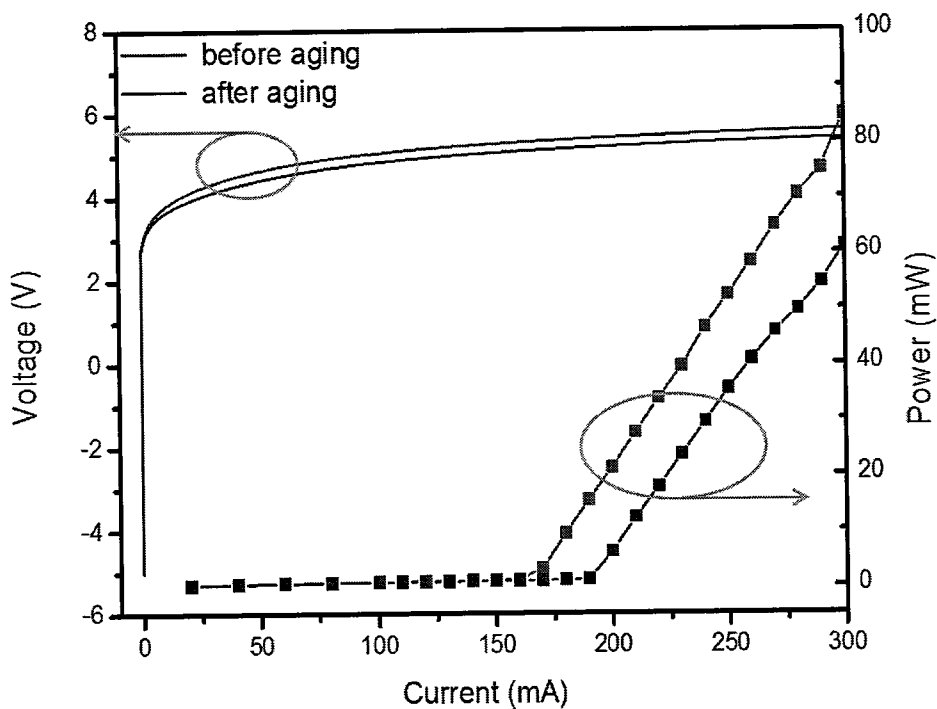


图 3-3 激光器 LD8 老化前后的 P-I 曲线

	LD1	LD2	LD3	LD4	LD5	LD6	LD7	LD8
$I_{th, before} (mA)$	150	140	140	150	140	150	160	165
$I_{th, after} (mA)$	170	180	160	170	150	160	200	190
$\Delta I (mA)$	20	40	20	20	10	10	40	25

表 3-1 激光器老化前后的阈值电流

3.3 GaN 基蓝光激光器的形貌特性

为进一步确认激光器芯片表面形貌特征,我们选取了同一批次未老化和老化的激光器进行了 SEM 分析。图 3-4 所示的为激光器芯片老化前后的 SEM 图,图 3-4 (a) 中激光器老化前芯片表面平整光滑,图 3-4 (b) 中激光器老化后脊形边缘出现孔洞。与之前温鹏雁文章中报道的激光器老化后脊形上出现鼓包,鼓包下出现孔洞的退化现象有类似之处,为探究本章老化的激光器是否具有相同的退化机制,我们分析了在相同电流密度下老化,不同老化时间的激光器的孔洞特征。图 3-5 (a) 所示为老化时间较短的激光器芯片,产生孔洞的直径尺寸约在几百 nm,图 3-5 (b) 为老化时间较长的激光器芯片,孔洞尺寸增加到几个 μm 。结果发现随着老化时间的延长,激光器脊形上并没有经历形成鼓包的过程,而是直接形成孔洞,孔洞逐渐长大,尺寸由 nm 量级变为 μm 量级。

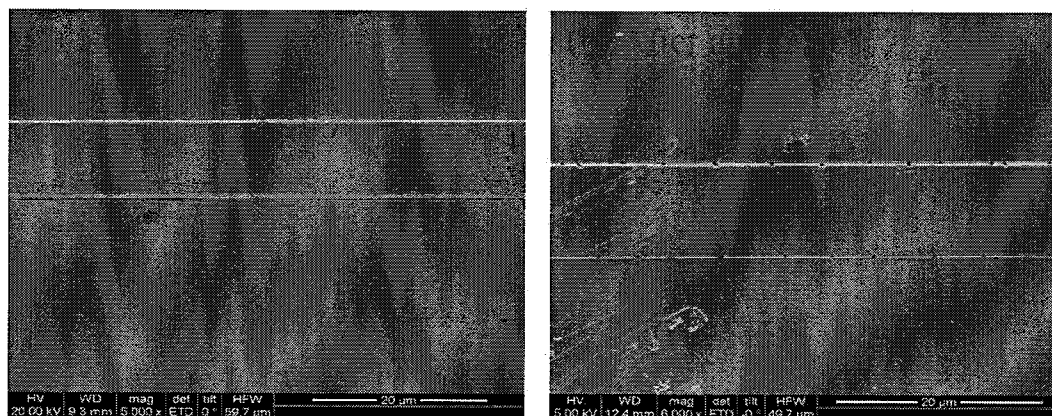


图 3-4 老化前后激光器表面 SEM 图

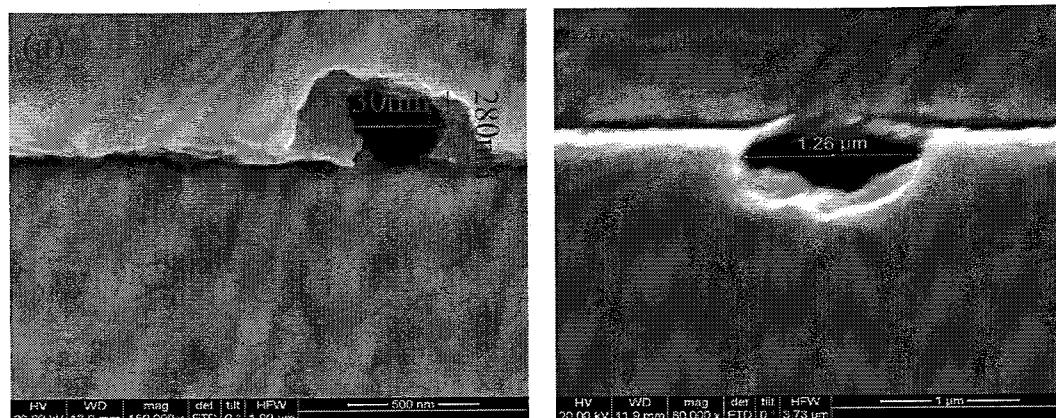


图 3-5 不同老化阶段孔洞的尺寸

3.4 激光器孔洞的分析

孔洞起源于激光器结构的哪一层？孔洞附近是否存在结构缺陷，类似于管状缺陷？或者金属发生了电迁移？……这些疑问需要分析确认。我们采用湿法腐蚀的方法用 KI 溶液加 I₂ 溶液刻蚀芯片表面 Au 层，去除后观察芯片表面形貌特征，如图 3-6 (a) 为老化后完整芯片结构，脊形边缘孔洞很明显，图 3-6 (b) 为去掉金属 Au 后的 SEM 图，依然有孔洞的痕迹，说明孔洞不仅仅出现在 Au 金属层。图 3-6 (c) 为继续去掉金属和绝缘层后的外延结构，可以看到孔洞不复存在。由于芯片表面形貌只能直观的分析孔洞大小和深入程度，芯片内部是否存在缺陷，需要对其横截面进行分析。

3.4.1 孔洞形成的微观结构

利用聚焦离子束 (FIB) 技术分析芯片的横截面形貌特征。FIB 选择的离子源为 Ga 离子源，是因为 Ga 液相离子源具有低熔点、低蒸汽压和抗氧化的能力。我们选择一支有孔洞的激光器，为了保护样品表面，在需要切割的位置表面蒸镀一层 Pt 金属，然后在孔洞位置垂直脊形表面的方向制作了横截面，如图 3-7 所示左侧红色方框的插图，红色标线位置为初始切割位置，为了分析孔洞附近的信息，采用渐进式切割方法，如图 3-7 从未触及孔洞区域到一步步逼近孔洞最后到切过孔洞，整个形貌都得到了观察。Sample1 得到的横截面形貌结构如图 3-8 所示，最上面一层为 Pt 保护层，颜色泛白的一层为 Au 金属层，下面依次为 Ti 金属层，SiO₂ 绝缘层，脊形上 Ti 金属层下还有一层接触电极 Pd/Pt/Au 层。孔洞处

脊形边缘 Au 和 Ti 层破坏，箭头所指的为 Ti 层破坏层，在临近孔洞一定距离的位置存在空隙，而 SiO₂ 绝缘层完好。为了排除特殊性，选择的 Sample2 也对其横截面进行了观察，出现与 Sample1 同样的结果。那么根据该现象，此过程中可能发生以下几种情况：一，金属 Au 和金属 Ti 两种金属发生了反应。由于在激光器工作的过程中会有热产生，器件温度升高，促进了金属间的反应；二，金属 Au 向 GaN 半导体层发生了扩散，导致 Au 层缺失而出现孔洞；三，电流引起的电迁移。金属离子在电流作用下做定向运动，因存在质量的输运，半导体的局部区域产生空洞或小丘，孔洞长大，最终贯穿互联线，形成短路。其中温度和电流密度是引起电迁移的主要因素，当电流密度过大，由热效应引起温度梯度并导致电迁移，加速器件的失效。据文献中报道，发生电迁移需要温度大于 200℃，电流密度达到 MA/cm² 量级，而本论文中激光器工作的电流密度才 kA/cm² 量级，而结温才 120℃左右，因此电迁移的可能性排除。

为了更好的验证金属与半导体之间扩散的可能性，我们对 Sample1 的横截面进行了 EDX 能谱分析。其中图 3-9 中黄线标注的为 EDX 线扫描区域，红色十字标注的为 EDX 点扫描区域，能谱元素分布信息见图 3-9，孔洞处主要元素为 Au、Ti、Ga、Si，黄色虚线标注了 Au 层、Ti 层和绝缘层 SiO₂ 层的分界面。可以看出分界面上波动较大的元素主要为 Ga 和 Au 两种元素，其中 Au 层和 Ti 层分界面上 Au 元素含量急剧减少，说明 Au 并没有向 GaN 层发生扩散，而 Ga 金属的含量在 Au 和 Ti 层都偏高，这是由于 FIB 制作横截面时 Ga 离子源轰击粘附的影响。由此可见金属 Au 并没有向 GaN 层发生扩散，孔洞形成的极大可能是金属间发生了反应。根据 Kumar 等^[67]的研究报道，金属 Ti 与 Au 之间会形成 TiAu₄、TiAu₂、TiAu 和 Ti₃Au 等化合物，由于 Ti 层很薄，Au 会向 Ti 层方向扩散并和 Ti 反应形成低功函数的 TiAu 合金，同时 Ti 也会向 Au 层扩散反应，在扩散反应的过程中，Ti 可能还会穿透 Au 层到达表面，并且会形成 Ti 的氧化物。由于脊形边缘刻蚀引起的粗糙度不同，更高表面粗糙度会促进合金相的形成^[68]，脊形边缘金属层更薄以及 SiO₂ 绝缘膜沉积的不均匀等“缺陷”，使得电流密度更大，造成局部温升及热积累，温度升高又会增加电流密度，从而形成一种正反馈，使得反应很容易发生。因此，适当增大 Au 层厚度、减少 Ti 层厚度以抑制两种金属元素的合金反应，同时降低脊形侧壁粗糙度提高 SiO₂ 沉积质量可能会降低反应几率

并减少孔洞的产生。

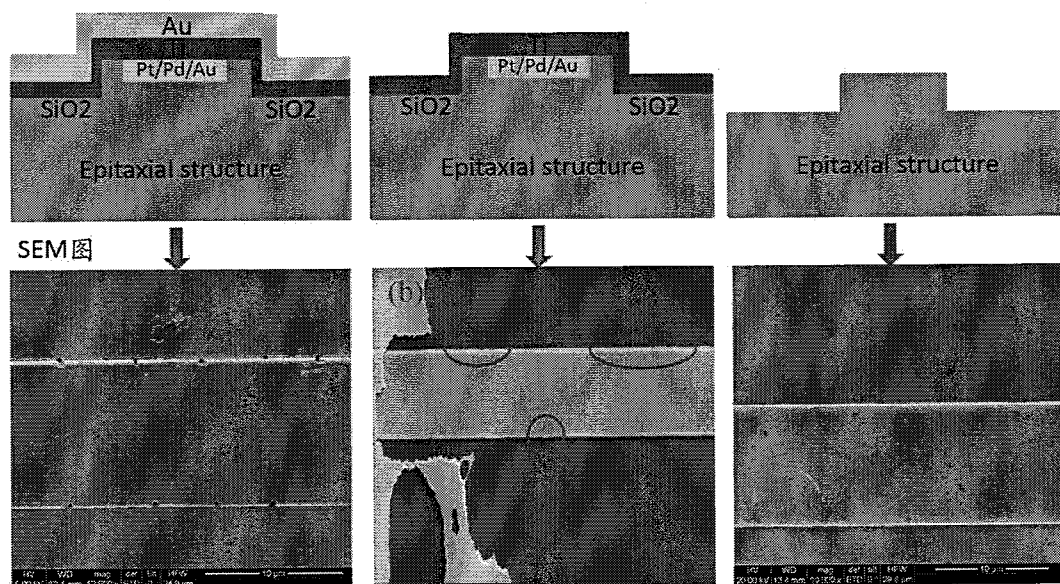


图 3-6 去除 Au 金属层后的芯片表面的光学显微镜和 SEM 图片

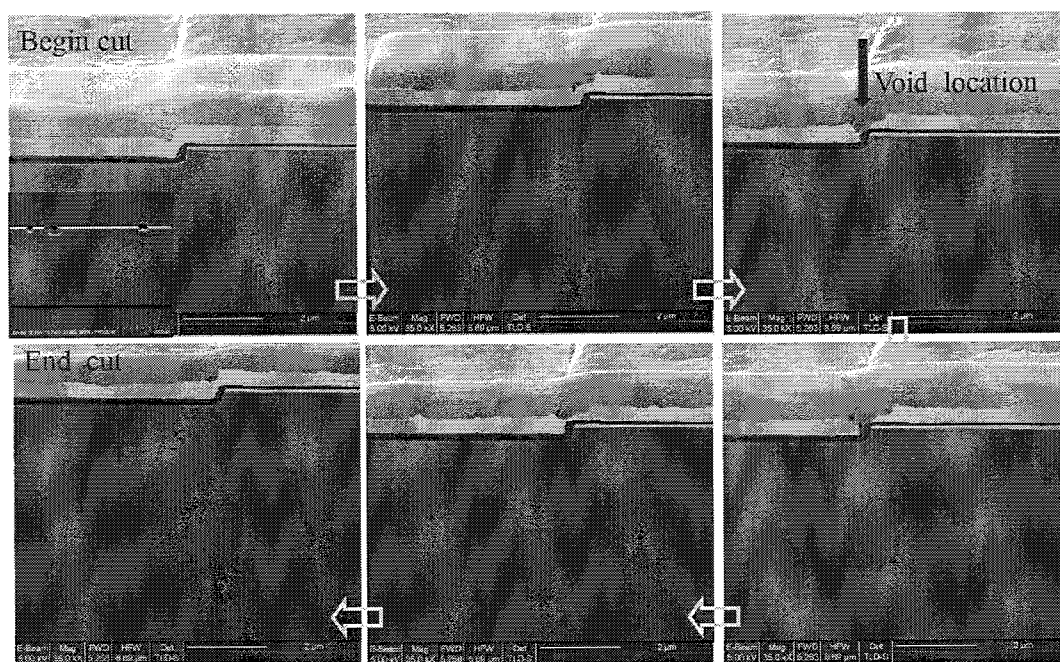


图 3-7 激光器芯片的横截面形貌图

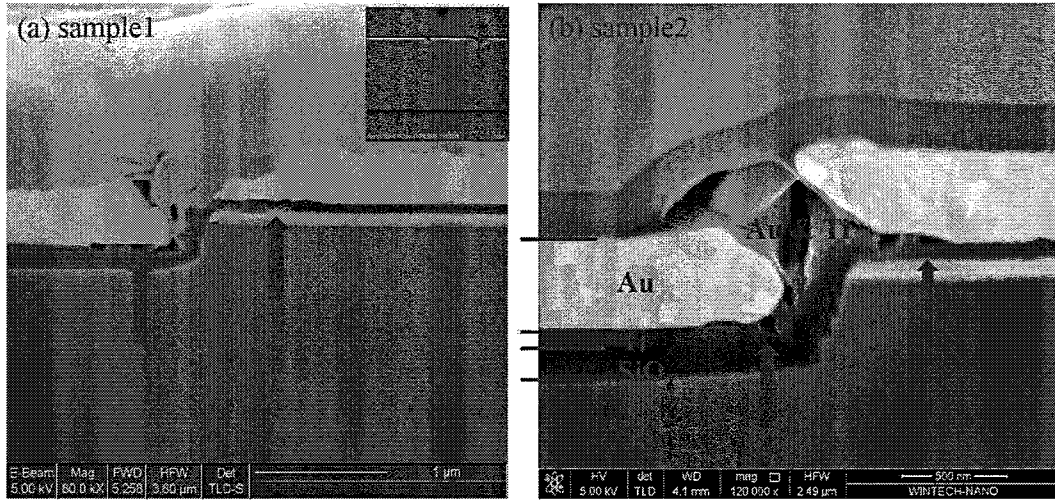


图 3-8 激光器芯片的横截面形貌图

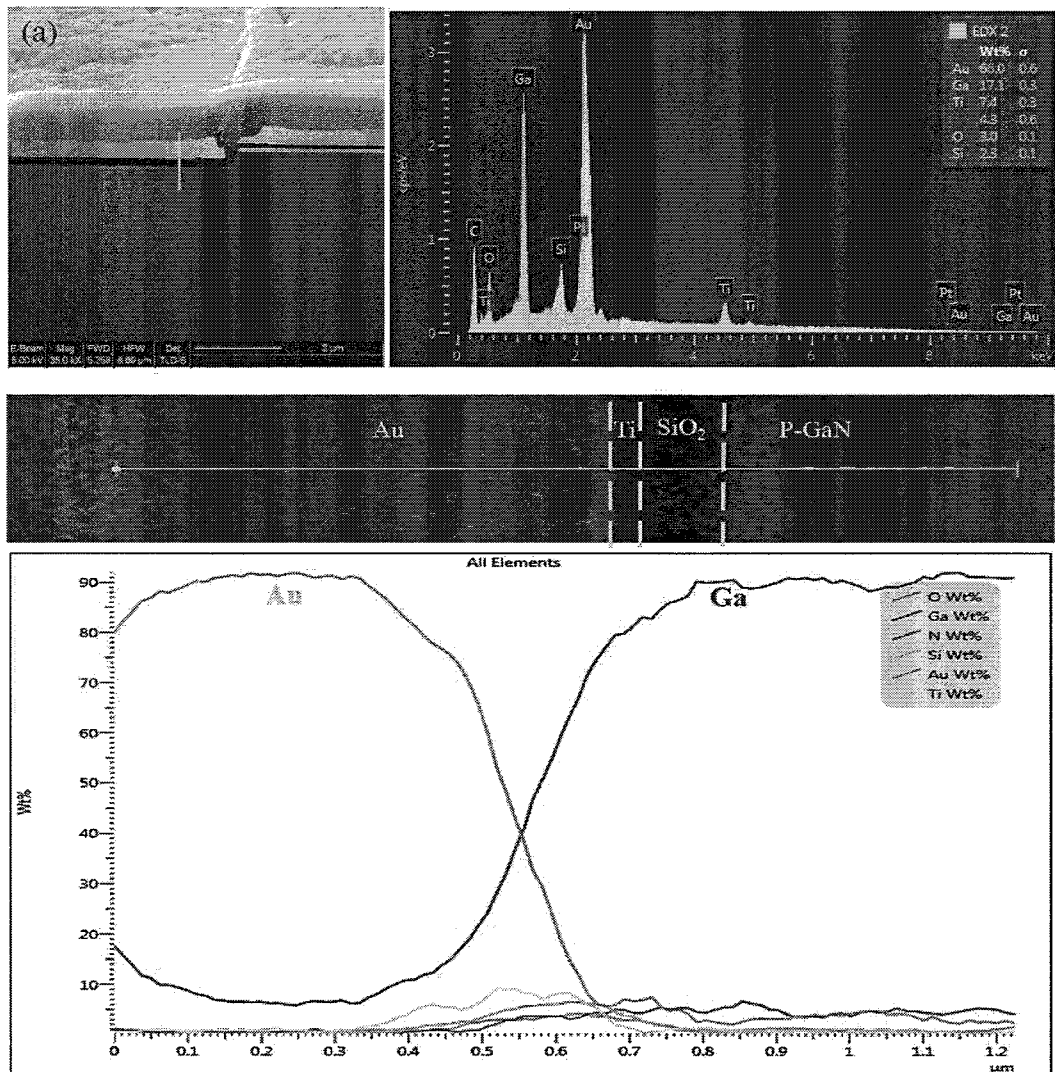


图 3-9 芯片横截面的 EDX 能谱图

3.4.2 孔洞形成的动力源

老化过程中,激光器是在恒定电流条件下工作的,考虑电流是直接影响因素,工作过程中激光器会有热量产生,必然受到温度影响,因此孔洞形成的动力源有两个因素:温度和电流。为了验证单纯的温度因子对孔洞形成的影响,我们将同一批次未老化的激光器置于恒温为 120℃ 的烘箱中,不施加电流载荷,该状态下激光器是没有自发产热,激光器的结温近似于环境温度。处理 168h 后,老化前后激光器的 SEM 形貌结果如图 3-10 所示,老化后脊形边缘并没有孔洞的形成,说明单纯的温度并不是诱发孔洞形成的根源,而电流对于孔洞的形成起了决定性作用。

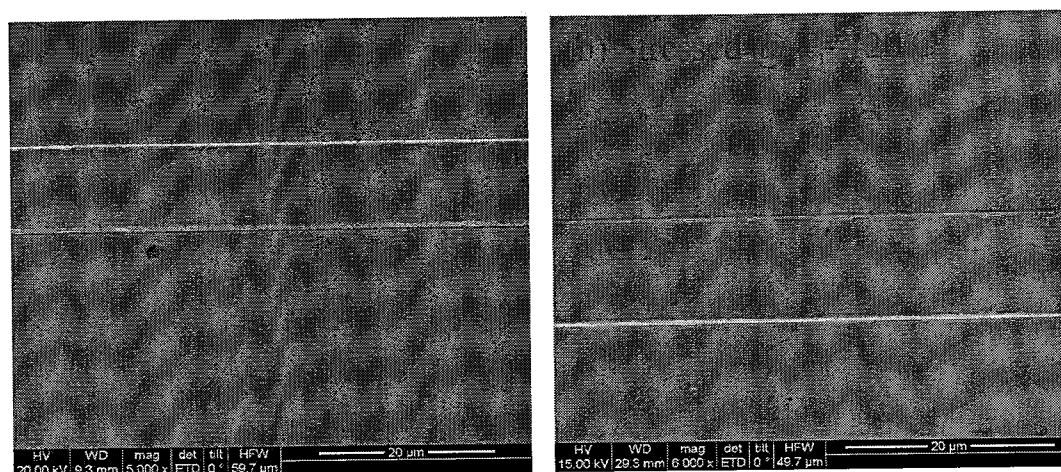


图 3-10 激光器恒温 120℃ 老化后的形貌图

3.4.3 孔洞对激光器光电性能的影响

通过对激光器表面形貌的观察,我们发现八支激光器中每个激光器脊形上孔洞的数量并不是均匀的,少则几个,多则几十个,如图 3-11 所示为老化后激光器脊形边缘孔洞 SEM 图,椭圆圆圈标记的为每只激光器上的孔洞位置。为了确认孔洞与老化初期光功率下降是否存在一定的关系,我们对每支激光器脊形边缘的孔洞进行了统计分析,以单位长度内孔洞的个数来表示孔洞的密度,发现 LD7 孔洞密度最大,LD1、LD4、LD6 孔洞密度最小,与老化曲线中功率下降幅度对应一致,孔洞密度最大的,相应的光功率下降速率越快。于是建立了孔洞密度与光功率下降速率的关系,如图 3-12 所示,曲线采用线性拟合和多项式拟合方式,都展现了光功率的下降速率与孔洞密度成正比例关系。那么孔洞是否也会对其他

的光电性能产生不一样的影响，接下来我们作了相关的探究。

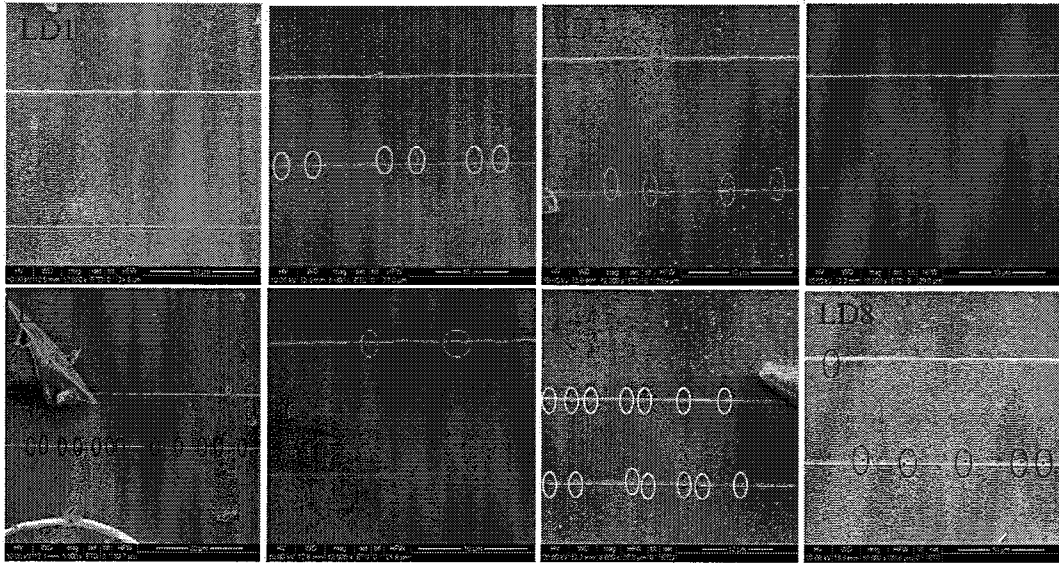


图 3-11 老化后激光器脊形边缘孔洞 SEM 图

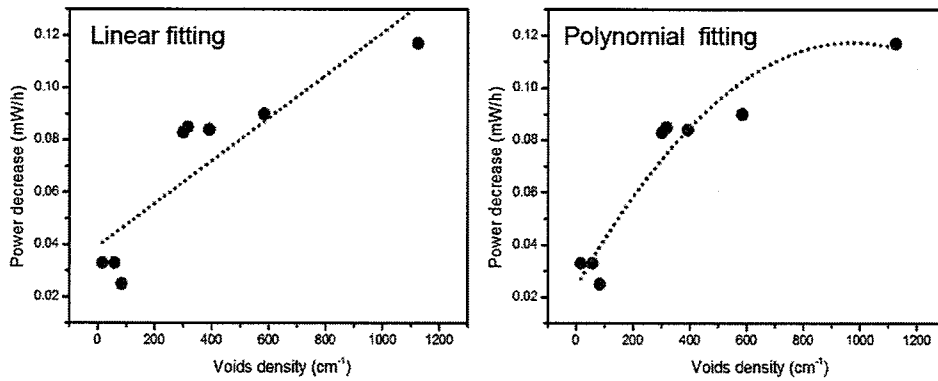


图 3-12 老化后孔洞密度与光功率下降速率的关系

我们采用光诱导电阻变化技术 (OBIRCH) 对有孔洞的激光器进行漏电定位，分析孔洞对激光器漏电流的影响。测试过程中，加载在激光器芯片上的电压为反向 4V。图 3-13 所示的为激光器上表面的漏电定位结果，并结合图 3-6 所示的形貌图对比，根据 OBIRCH 探测漏电原理可知，红色方框探测出的红色亮点代表电流改变值为正值，此处探测出电流的变化是探针损坏之处，并不是孔洞产生处。另外黄色方框探测出的红色与绿色亮点则是样品制备过程损伤所致，其他有孔洞的地方并未探测出亮点，由此结果我们可以确定孔洞对激光器漏电的影响并不

大。漏电流的产生是由于激光器内部缺陷提供了漏电通道，在老化过程增加了漏电流。

另外，我们采用电子束诱导感生电流的方法得到了激光器老化后的 EBIC 图像，如图 3-14 所示的 EBIC Image，图中黄色方框标记的为激光器脊形，脊形区域激光器强度分布均匀。图像上还显示金属和探针都为亮色，这是因为 EBIC 测试过程中会混杂着 EBAC 讯号，即在通路时，由电子束注入所产生的电子流被金属和探针吸收，电子流的大小以电流 mapping 显示出来。故孔洞附近并没有结构上的破坏而造成激光器 p-n 结的不完整。



图 3-13 有孔洞的激光器漏电定位结果

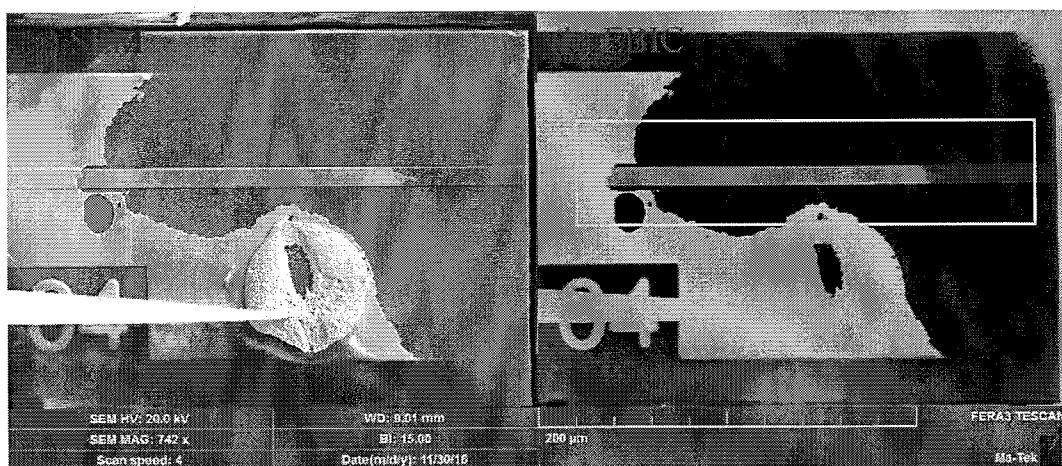


图 3-14 老化后有孔洞的激光器的 SEM 及 EBIC 图像

孔洞对光功率的衰减有一定的影响,为进一步明确激光器的退化机制,我们对其光学特性进行了分析。首先,根据光致发光原理,测试前需将表面的厚层金属电极除去。去除厚层金属采用化学清洗的方法,将老化后的激光器芯片取下,先置于 HF 酸溶液中,再放入王水中,为了形成对比,同时将未老化的激光器芯片的金属电极同时除去。微区 PL 测试使用的激光源波长为 405nm,测试结果如图 3-15 所示,图 3-15 (a) 为未老化激光器芯片的微区 PL 图,图中虚线标注的为 10 μm 的脊形宽度,图 3-15 (b) 为老化后的激光器芯片的微区 PL 图。通过对比发现,老化前脊形乃至整个激光器芯片发光强度均匀,而老化后激光器的全光谱微区 PL 发光强度也几乎均匀,相对于图 3-15 (a) 只是脊形边缘发光强度稍微变弱。为进一步确认测试结果,我们分别测试了 450nm 单波长微区 PL 图,如图 3-15 (c) 为未老化激光器芯片在 450nm 波长的微区 PL 图,同样发光强度均匀,图 3-15 (d) 为老化后的激光器芯片在 450nm 波长的微区 PL 图,明显地可以看见脊形区域发光强度变暗,尤其是脊形边缘出现不均匀的退化。综合以上分析可知,激光器在老化过程中可能产生了非辐射复合中心,导致了老化初期光功率的快速下降,而脊形边缘孔洞的形成影响了光功率下降的速率。

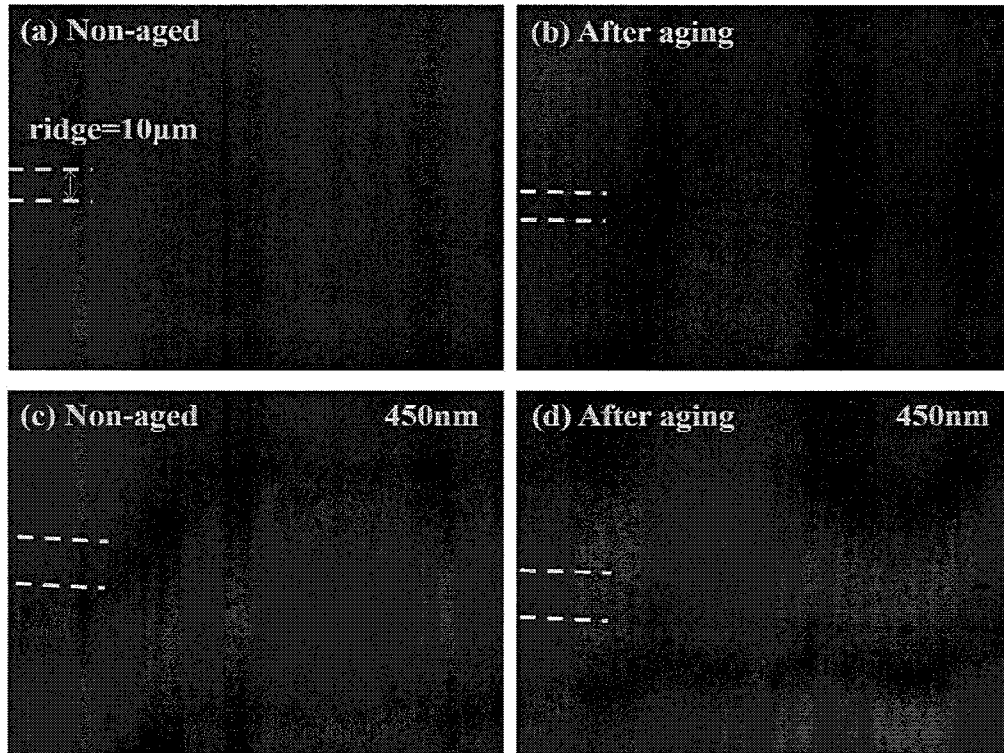


图 3-15 老化前后微区 PL 图

3.5 本章小结

1. 分析了 GaN 基蓝光激光器的快速退化机制，发现老化后芯片脊形边缘出现孔洞，激发孔洞产生的动力源是电流因素，单纯的温度并不会诱发孔洞的形成。
2. 通过 SEM 和 EDX 能谱分析，结果表明孔洞的产生是由于金属 Au 和 Ti 发生了反应，并且光功率下降速率与孔洞密度成正比例关系。
3. 通过激光器老化前后电学和光学性质的分析，推测激光器老化过程中产生了非辐射复合中心，导致了老化初期光功率的快速下降。

第四章 GaN 基绿光激光器的退化机制分析

GaN 基光电器件在许多应用领域已经达到很高的可靠性和发光效率，绿光激光器作为激光显示三基色光源之一，目前发展还不太成熟，其光功率还不能满足市场需求。相比于蓝光激光器，为了获得更长波长的绿光激光器就需要并入更多的 In 组分，更高的 In 组分需要维持低的生长温度和高的压应力，量子阱中 In 组分的增加会导致价带带阶差增加，空穴的输运困难，载流子注入不均匀，增益分布也不均匀；热稳定性能变差，p 型限制层的生长温度需要降低；In 组分涨落加重，峰值增益下降，激光器激射阈值增加。加之沿 c 面极性面生长的 GaN 基激光器受到极化电场的影响，量子限制斯塔克效应会严重影响载流子的复合几率。由于效率的严重下降使得绿光激光器很难达到高效率、低阈值。2008 年，Nichia 公司首次报道了激射波长为 488nm 的绿光激光器，其连续工作的阈值电流密度可达 $3.3\text{kA}/\text{cm}^2$ ^[6]；2009 年，Nichia 将绿光波长提高到 510-515nm，且其寿命可达 5000 小时^[7]；2015 年，Nichia 已实现波长为 525nm 的绿光激光器的寿命高达 25000 小时。2014 年，德国 Osram 公司报道了在室温直流工作条件下的单模绿光激光器输出功率为 200mW^[8]。先前文献中报道的关于 InGaN 激光器的可靠性的研究表明老化过程中有源区缺陷的产生，即非辐射复合中心增加导致了阈值电流的增加。2015 年，意大利 Matteo Meneghini 研究团队认为绿光激光器的退化是扩散过程引起的，建立的扩散模型与实验数据拟合的很好，并通过微区 CL 分析，发现老化后的激光器有源区发光明显变弱，而且波导层和限制层也发生退化，退化的区域呈圆形分布，且关于 p 区到 n 区的轴对称^[69]。2016 年通过研究温度和电流对退化的影响，并计算了扩散系数和结合能 1.98eV，与 Seager 团队报道的 p-n 结中 H 的扩散激活能 1.93eV 接近，认为引起扩散的元素为 H^[70]。目前国内外对于绿光激光器研究还不成熟，其退化机制的分析也不详尽，因此，深入分析限制绿光激光器可靠性、效率和性能的原因是十分重要的研究课题。

本章主要分析了 GaN 自支撑衬底上生长的绿光激光器的退化机制，运用电学、光学表征方法分析了激光器老化前后的相应变化。

4.1 GaN 基绿光激光器的退化现象

图 4-1 为 GaN 基绿光激光器的输出功率-时间的曲线图。本章老化的激光器

是激射波长为 508nm 的绿光激光器，脊形宽为 10 μm ，腔长 800 μm ，宽 200 μm ，具体的生长结构包括：5 μm 的 n 型 GaN 层、n 型 AlGaIn 下限制层、n 型 InGaIn 下波导层、InGaIn/GaN 有源区层、p 型 InGaIn 上波导层、p 型 AlGaIn 电子阻挡层、p 型 AlGaIn/GaN 超晶格层和 p 型 GaN 接触层。老化条件是在室温下，采用恒定电流密度 4kA/cm²，老化过程中，定时记录输出功率随老化时间的变化规律。从图中老化曲线看出，在开始的 200 小时，四支激光器的输出光功率快速下降，不同于文献中报道的退化现象^[69]，随着老化时间延长，功率稳定降低，之后部分激光器功率又快速降低，老化结束预估该激光器的寿命可达 1000 小时。

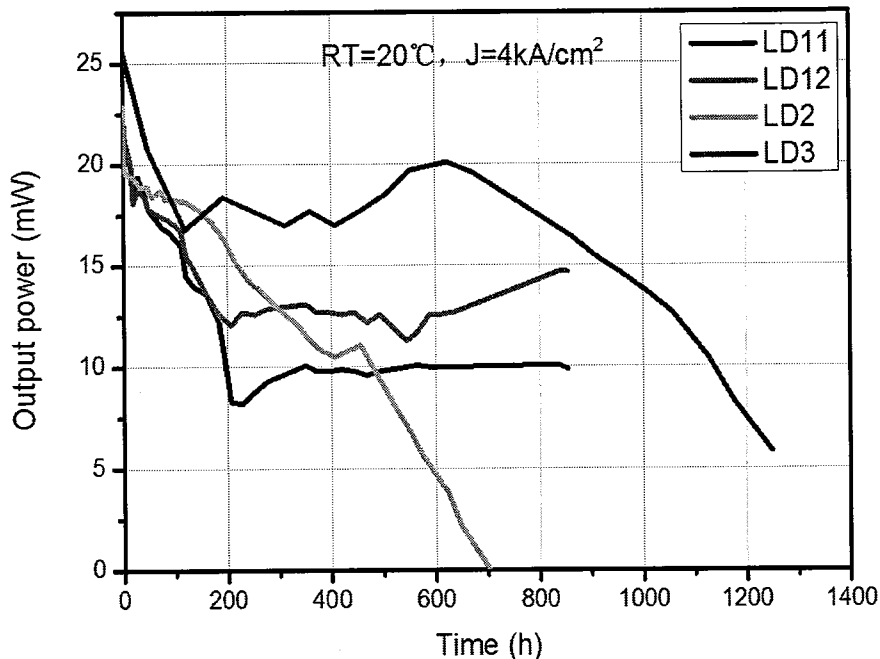


图 4-1 GaN 基绿光激光器的输出功率-时间的曲线图

4.2 GaN 基绿光激光器的电学特性

图 4-2 所示为四支激光器 LD2、LD3、LD11 和 LD12 老化前后的 P-I 曲线。图 4-2 (a) 为 LD2 的 P-I 曲线，老化后激光器阈值电流增加较大，曲线基本为线性。图 4-2 (b)、(c)、(d) 分别为 LD3、LD11、LD12 老化前后的 P-I 曲线，插图为老化前后的 I-V 曲线。从中可以看出黑色数据点为老化前的结果，阈值电流基本和 LD2 相同为 140mA 左右，表明老化前激光器的阈值性能具有良好的一

致性，红色数据点为老化后的结果，阈值电流增加了约 50mA，而且我们对比四支激光器老化前后的斜率效率，发现并没有发生明显的变化，在上一章节中对于斜率效率已做分析。另外我们还发现有三支激光器的 P-I 特性曲线中都出现“扭折”，即文献中经常提到的 kink。以激光器 LD11 为例，老化前激光器 LD11 的电流为 340mA 时，P-I 曲线出现 kink，而老化后 kink 出现在低的电流值 310mA，通过测试不同电流下的远场图如 4-3 所示，在 kink 对应电流值的远场图模式为多模，而线性区域的远场图模式为高斯分布的基模。我们认为 kink 的形成是由于模式跳变，关于 kink 解释将在本论文第五章作详细的分析。

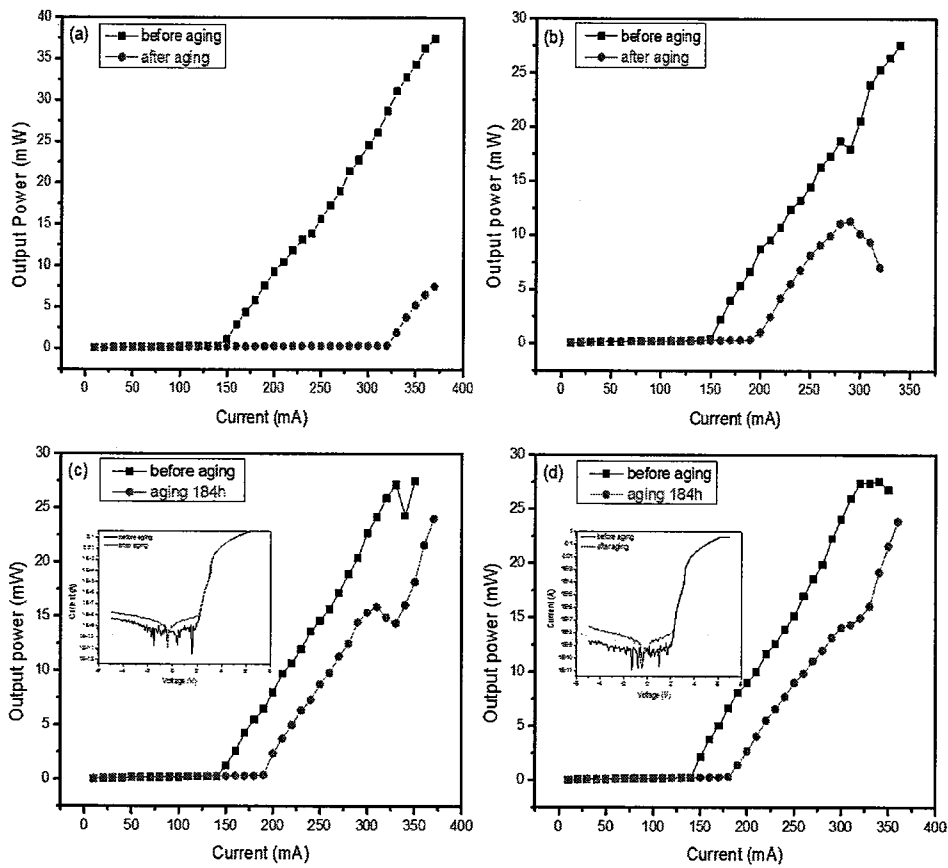


图 4-2 激光器 LD2、LD3、LD11 和 LD12 老化前后的 P-I 曲线

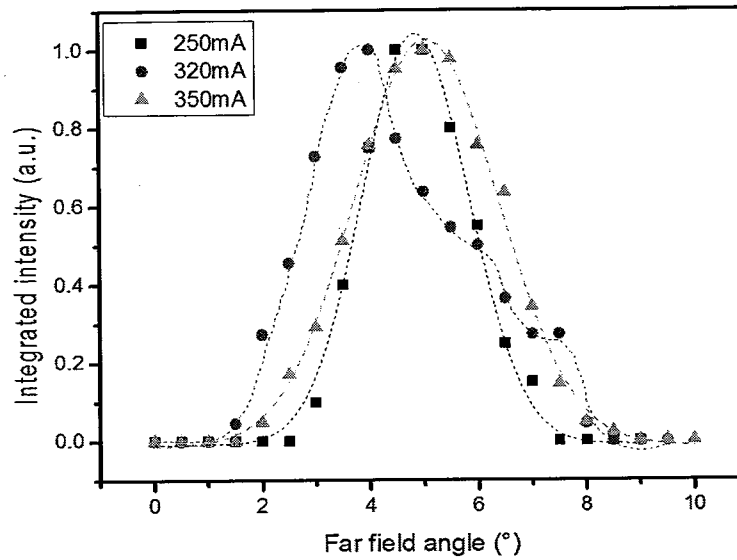


图 4-3 激光器 LD11 老化 184h 后不同电流下的远场图

4.3 GaN 基绿光激光器的光学特性

4.3.1 微区 PL 特性分析

为确认激光器的退化程度,采用激光共聚焦荧光显微镜观察有源区退化的程度。图 4-4 所示的为未老化和老化的激光器的微区 PL 图,激光源波长为 405nm,图 4-4 (a) 为未老化的激光器芯片的微区 PL 图,图中虚线标注的为 10 μ m 的脊形宽度,图 4-4 (b) 为老化后的激光器芯片的微区 PL 图。通过对比发现,未老化的脊形乃至整个激光器芯片发光均匀,老化后脊形区域微区 PL 强度明显变暗。图 4-4 (c)、(d) 为老化激光器芯片两个位置的部分放大图,可以看出 (c) 和 (d) 图脊形区域发光强度均变暗,但是 (c) 图 Position1 变暗程度较严重, (d) 图 Position2 表现为轻微的变暗。结果说明,老化后的激光器脊形出现了不均匀的变暗。

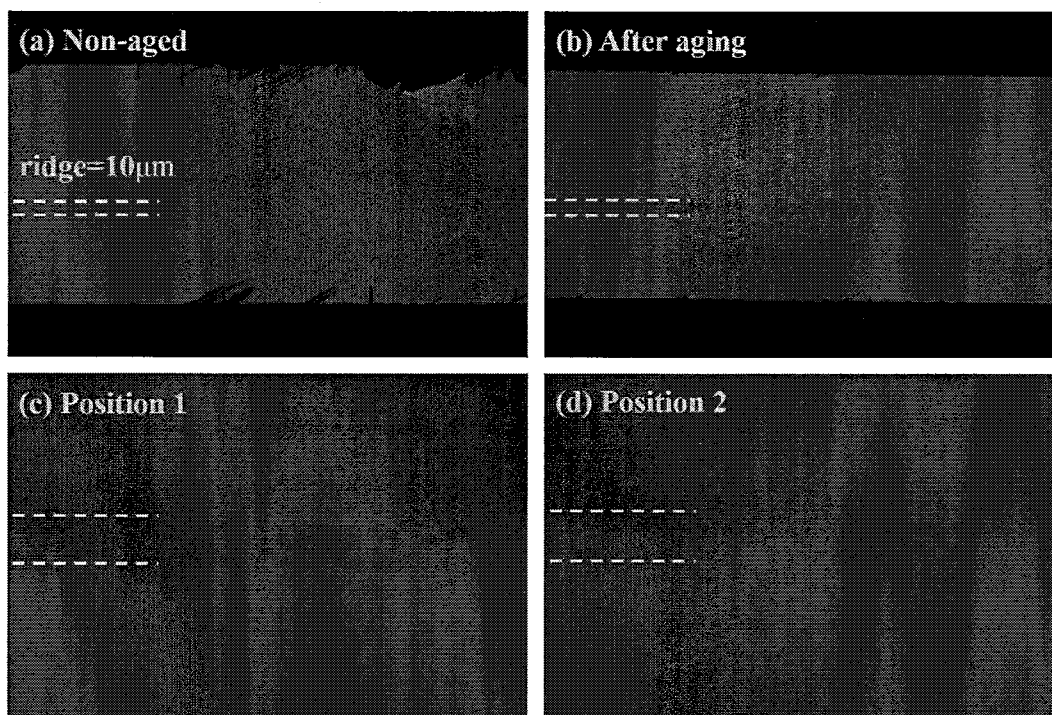


图 4-4 未老化和老化的激光器的微区 PL 图。(a) 为未老化激光器的微区 PL 图，(b) 为老化后激光器的微区 PL 图，(c) 和 (d) 为 (b) 图中脊形区域不同位置的放大微区 PL 图

4.3.2 阴极荧光特性分析

通过采用高空间分辨率的阴极荧光和扫描电镜获得的二次电子显微图像进行对比，直接测量激光器芯片微区各层的结构性质和发光光谱信息。图 4-5 所示为未老化和老化的激光器有源区 CL 图像和 SEM 的叠加图。测试前，为排除腔面镀膜或外界杂质对发光强度的影响，首先要将未老化和老化的激光器解离出平整的横截面腔面，然后采用 5kV 电子束能量在样品的截面区域做 SEM 图像和不同波长的 CL 单色图像。图 4-5 (a) 中绿色亮线代表未老化的激光器有源区的发光强度，脊形内外的发光强度均匀，为一条均匀的亮线。图 4-5 (b) 中红色亮线代表老化的激光器有源区的发光强度。对比两者发现，老化后的激光器有源区并没有像文献中报道的均匀变暗^[47]，仍是一条均匀的亮线，未显示出有源区的退化情况。结合上述的微区 PL 图像结果说明，老化后的激光器出现不均匀的变暗，退化的位置可能为金属与 p 型层发生了轻微的扩散，激发量子阱的荧光收集时被脊形区域金属吸收而导致老化后脊形的微区 PL 强度变暗。

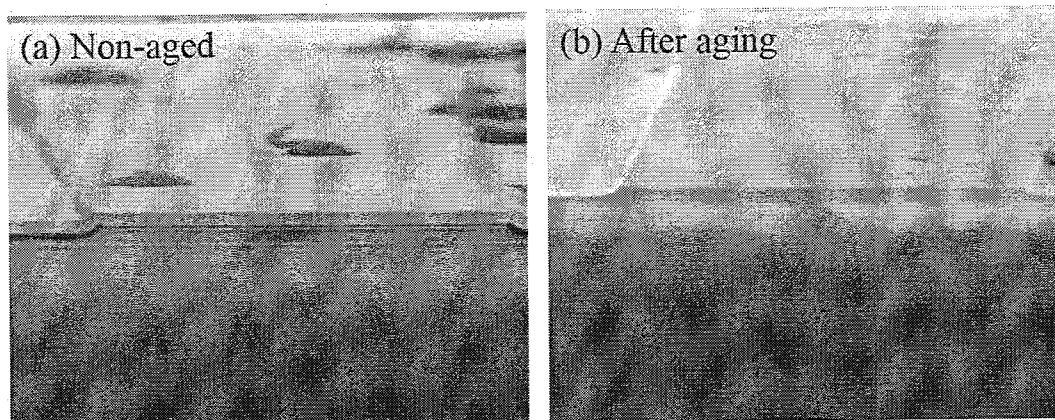


图 4-5 未老化和老化激光器的 CL 图和 SEM 的叠加图

4.3.3 变温 PL 特性分析

我们利用变温 PL 研究了未老化和老化激光器芯片量子阱中载流子的局域效应。图 4-6 为激光器脊形区域变温 PL 光谱，测试过程中温度的范围变化从低温 4K 到 290K。激光源为 405nm 的激光器，光斑聚焦在样品表面的直径大小约为 $2\mu\text{m}$ ，即聚焦在脊形区域上范围较小。图 4-6 (a) 为未老化激光器变温 PL 光谱，图 4-6 (b) 为老化后激光器变温 PL 光谱。PL 光谱的发光峰对应的波长值随温度变化而变化，峰值波长位于 510nm 附近波动，整个测试波长范围内只有一个主发光峰，是量子阱的发光峰。随着温度逐渐升高，PL 发光强度降低。

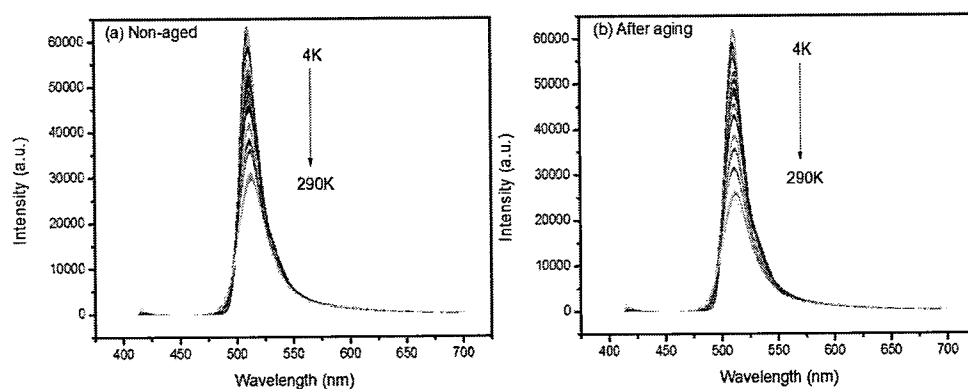


图 4-6 未老化和老化的激光器变温 PL 光谱

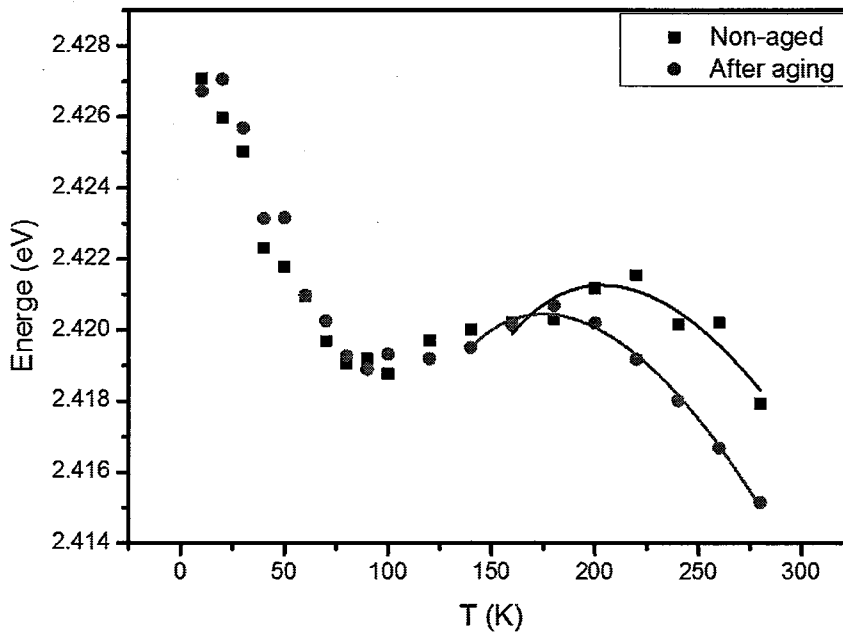


图 4-7 未老化和老化激光器峰位随温度的变化曲线

图 4-7 为激光器经高斯拟合得到的 PL 光谱峰位随温度的变化曲线。图中表现出与文献报道的类似的“S-shape”曲线^[71, 72]。“S-shape”曲线通常认为由于组分涨落, InGaN 中形成具有不同势阱深度的局域中心, 是一种局域效应^[56, 73]与带隙收缩共同作用的结果, 可以用局域态模型解释: (a) 红移, 当温度低于 90K 时, 非辐射复合速率低, 载流子的热动能也低, 辐射复合占主导, 载流子被不均匀的局域态所捕获, 随机分布在不均匀的局域势阱中, 呈现出在不同的局域势阱发光, 此时 PL 光谱较宽, 在温度不断的上升过程中, 载流子热动能增加, 部分载流子逃逸出浅势阱进入深势阱, 此时的非辐射复合几率不高, 深能谷势阱中载流子数目增多, 加上温度升高引起的带隙收缩效应, 导致 PL 峰位红移; (b) 蓝移, 当温度升高至 100K~180K 之间, 深局域势阱中位于低能级的载流子由于受热激发, 有足够的动能跃迁到较高能级甚至在浅的局域态中重新分布, 从而增加了载流子在高能级的复合, 因此光谱峰值波长由红移变为蓝移; (c) 红移, 当温度进一步升高到 200K 左右时, 载流子会挣脱局域势阱的束缚而变为自由载流子, 材料带隙收缩, 峰位红移。所以由于局域态和温度引起的带隙收缩的存在, 热激活的载流子在局域态之间的转移和再分布导致“S-shape”。

通过对比未老化和老化激光器的 PL 光谱峰位，发现温度在 4K~180K 时，两者的峰位基本重合，而在温度大于 180K 出现红移的阶段，老化激光器峰位相对未老化激光器红移的更厉害，对应开始红移的温度也略低。

	$E_0(\text{eV})$	$\sigma(\text{meV})$
Non-aged	2.44	14
After aging	2.44	17

表 4-1 未老化与老化激光器光谱峰位随温度变化拟合结果

为了更好的解释温度大于 180K 时 PL 光谱峰位红移的现象，我们采用了以下关系^[74-77]进行了拟合：

$$E(T) = E_0 - \left(\frac{\alpha T^2}{\beta + T} \right) - \left(\frac{\sigma^2}{k_B T} \right) \quad (4.1)$$

公式 4.1 为基于带尾模型的温度相关的发射能级曲线， $E(T)$ 为温度 T 时的能级间距，公式第一项代表局域态能级平均值， E_0 为温度为 0K 时的能级间距。公式第二项代表温度相关的带隙收缩， α 、 β 是 Varshni 拟合参数。公式第三项起源于局域效应，和局域态的分布宽度有关， σ 为局域态能级分布的标准方差，代表局域效应的程度， σ 值越大，局域效应越强。 k_B 为玻尔兹曼常数。

图 4-7 中的红色和黑色曲线是测试实验数据点在公式 4.1 基础上的拟合曲线，黑色曲线为未老化激光器的 Varshni 拟合曲线，红色曲线为老化激光器的 Varshni 拟合曲线。拟合得到的结果如表 4.1 所示。对比可以看出，未老化和老化激光器的 E_0 几乎没有差异，而老化激光器 σ 值略大于未老化的激光器，表明老化后激光器的局域效应增强。

图 4-8 所示的为未老化和老化激光器变温 PL 光谱积分强度随温度变化关系的拟合曲线。激光器中存在的可能有多个不同激活能的非辐射复合中心，可以采用 Arrhenius 方程^[78, 79]对 PL 光谱积分强度进行拟合：

$$I_{\text{PL}}(T) = \frac{1}{1 + C_1 \exp\left(-\frac{E_{a1}}{k_B T}\right) + C_2 \exp\left(-\frac{E_{a2}}{k_B T}\right)} \quad (4.2)$$

$I_{\text{PL}}(T)$ 为 PL 光谱积分强度在温度为 T 和温度为 0K 时的比， E_{a1} 和 E_{a2} 为不同非辐射复合中心相应的激活能， C_1 和 C_2 为非辐射复合中心密度相关的参数， k_B 为玻尔兹曼常数。左图为未老化激光器 PL 光谱积分强度的拟合曲线，右图为老化

激光器 PL 光谱积分强度的拟合曲线。拟合得到的结果如表 4.2 所示。

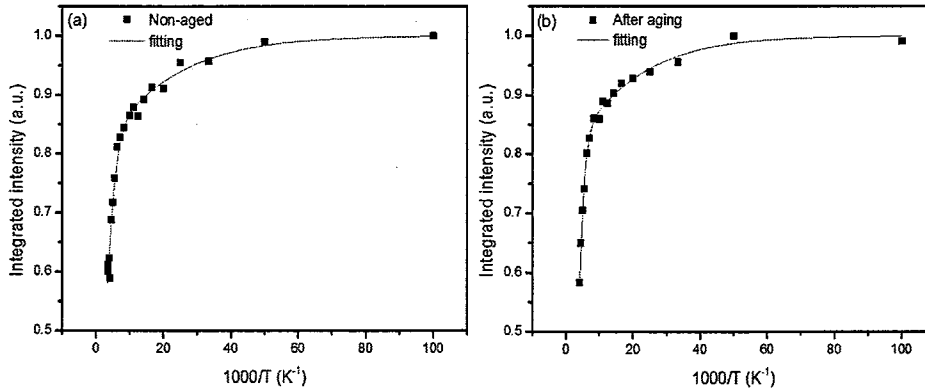


图 4-8 未老化和老化激光器变温 PL 光谱积分强度随温度变化关系

	C_1	$E_{a_1}(\text{meV})$	C_2	$E_{a_2}(\text{meV})$
Non-aged	0.25	4.6	4.2	52.5
After aging	0.22	5.0	6.7	56.5

表 4-2 未老化与老化激光器变温 PL 光谱积分强度随温度变化拟合结果

从表 4-2 中看出，未老化激光器和老化激光器均存在两种非辐射复合中心，与文献中报道的蓝光激光器^[37]结果不同，我们知道 E_{a_1} 和 E_{a_2} 分别为低温和高温下两种不同的激活能，未老化激光器中的两种非辐射复合中心的激活能分别为 $E_{a_1}=4.6\text{meV}$ 和 $E_{a_2}=52.2\text{meV}$ ，对应的能级密度分别为 $C_1=0.25$ 和 $C_2=4.2$ 。而老化激光器一种非辐射复合中心的激活能为 $E_{a_1}=5.0\text{meV}$ ，能级密度为 $C_1=0.22$ ，与未老化激光器的激活能 E_{a_1} 接近，可见激光器本身存在激活能为 E_{a_1} 的缺陷能级，而对比激活能 E_{a_2} 发现，老化激光器的激活能比未老化激光器大 4meV ，缺陷密度大 2.5 ，这个差别可以考虑在测试误差范围内，即未老化和老化激光器芯片的变温 PL 特性基本上没有差别。

另外，通过 PL 光谱积分强度可以得到内量子效率 IQE:

$$\eta_{\text{int}} = \frac{I_{\text{RT}}}{I_{\text{LT}}} \quad (4.3)$$

I_{RT} 为室温下的 PL 发光强度, I_{LT} 为低温下的 PL 发光强度。通过公式计算得到未老化激光器和老化激光器的内量子效率分别为 60%和 58%, 结果发现激光器在恒定电流条件下老化后的内量子效率几乎没有发生变化。

4.4 本章小结

1. 分析了绿光激光器在恒电流条件下的老化现象, 并对比了老化前后激光器的电学特性, 发现阈值电流增加, 斜率效率不变。
2. 分析了未老化和老化激光器的 CL、微区 PL 以及变温 PL 光谱, 发现老化后激光器内量子效率没有下降, 而脊形区域微区 PL 明显变暗, 推断可能是金属与半导体之间发生了扩散。

第五章 GaN 基激光器的 P-I 非线性机制研究

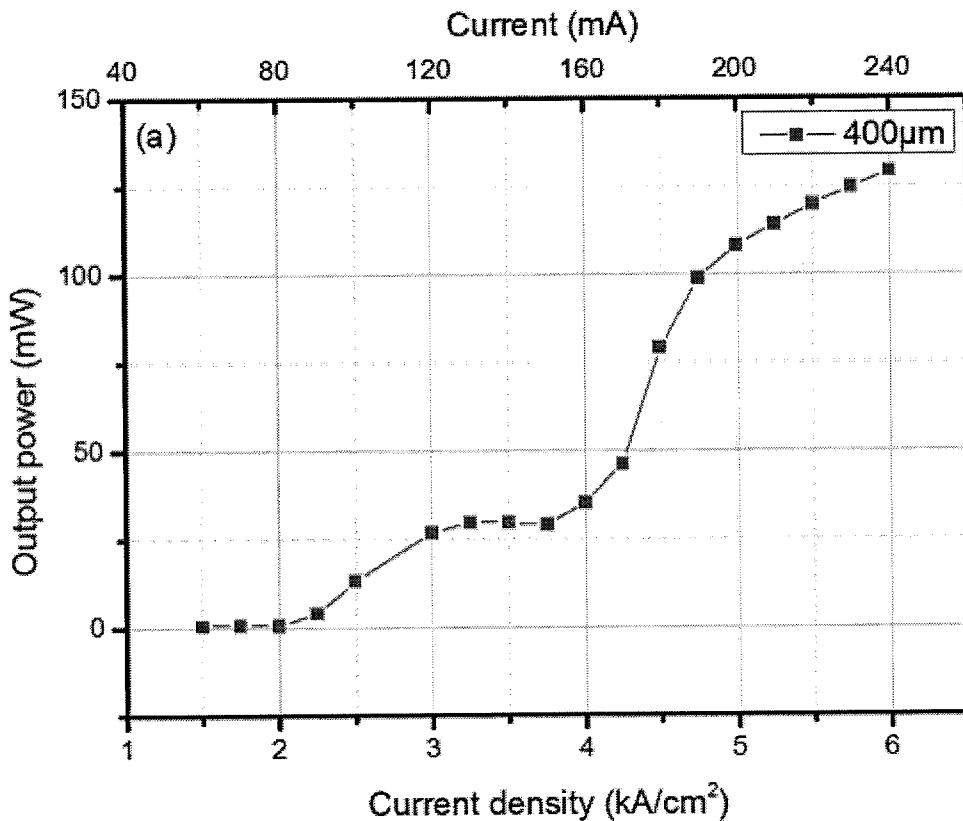
高功率 GaN 基激光器是未来发展的一个重要方向，在光存储、工业照明及激光加工设备等方面将获得重要应用。要实现高功率激光器，材料生长、工艺流片、器件封装等过程至关重要。激光器输出功率一般会受 P-I 特性曲线中非线性效应的影响，非线性，即文献中所谓的 kink。如何增大输出功率，避免 kink 的出现，相关的科研人员对 kink 的机制作了深入的研究。早在 1979 年，Lynch Jr 等研究了 GaAlAs 双异质结激光器的腔长与 P-I 曲线输出功率非线性程度的关系^[80]，当将腔长为 500 μm 具有 kink 现象的激光器解离成两段短腔长的单元时，P-I 特性曲线中 kink 仍然存在，但是对应的光输出功率更高，即表明最大输出功率得到升高；当腔长解离到足够短时，没有发现 kink 产生，最高功率可达 25mW，该文献认为短腔长激光器基模光场分布更稳定，而长腔长激光器侧向模式的不稳定性导致了 kink。根据文献报道，产生 kink 的主要机制有：热效应^[81]、横模激发^[82]、增益变化^[83]等。虽然许多研究团队针对 GaAs 基激光器中 kink 的机制作了深入的研究，却很少有文献详细报道 GaN 基激光器 P-I 曲线中 kink 的机制，2011 年 Osram 公司对 InGaN 激光器的 kink 前后不同功率下的远场图分析，断定模式跳变是引起 kink 的主要原因^[84]，而对于引起模式跳变的具体机制尚未明确。

本章节主要介绍了不同腔长 GaN 基激光器的 P-I 特性曲线非线性机制的研究。论文中研究的激光器样品主要是采用 MOCVD 的方法在自支撑 GaN 衬底上沿 (0001) 面生长的外延片，生长结构包括：n 型 AlGaIn 下限制层、n 型 GaN 下波导层、In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN 有源区层、p 型 AlGaIn 电子阻挡层、p 型 InGaN 上波导层、p 型 AlGaIn 上限制层和 p 型 GaN 接触层。外延结构生长完成后经流片工艺制作成脊形结构，最后得到三种不同腔长的激光器，激光器芯片的脊形宽度为 10 μm ，腔长分别为 400 μm 、600 μm 和 800 μm 。通过测试其不同电流下的远场图，不同脉宽的 P-I 曲线以及 ANSYS 模拟温度分布对激光器 P-I 输出特性展开的研究。

5.1 不同腔长激光器的 P-I 曲线

激光器的 P-I 曲线的测试是在室温下，采用直流测试，测试电流密度范围为 1.5kA/cm² 到 6kA/cm²。图 5-1 所示的分别为 400 μm 、600 μm 和 800 μm 三种腔长

激光器的 P-I 曲线。如图 5-1 (a)、(b) 所示, 当施加在激光器样品上的电流超过阈值电流时, 腔长分别为 $400\mu\text{m}$ 和 $600\mu\text{m}$ 的激光器都出现 kink 现象, 图 5-1 (c) 中腔长为 $800\mu\text{m}$ 的激光器未出现 kink 现象, 输出光功率随注入电流增加呈线性增大。该 kink 现象不同于文献中报道的 GaAlAs 双异质结激光器的结果。根据图示分析, 当激光器腔长为 $400\mu\text{m}$ 时, P-I 特性曲线中 kink 对应的电流密度为 $3.2\text{kA}/\text{cm}^2$, 相应的输出功率为 27mW 左右, 曲线由线性状态变为“台阶”状态, 之后又为线性; 当激光器腔长为 $600\mu\text{m}$ 时, kink 对应的电流密度为 $4.3\text{kA}/\text{cm}^2$, 相对于腔长为 $400\mu\text{m}$ 激光器升高了 $1.1\text{kA}/\text{cm}^2$, 相应的输出功率达到 75mW 左右, 曲线经线性状态之后呈“下坡”状态; 当激光器腔长增加至 $800\mu\text{m}$ 时, 曲线为平滑的线性, 没有 kink 产生。因此, 本论文中 GaN 基激光器的 P-I 曲线随腔长增加, kink 初始点对应的电流密度越大, 输出功率越高, 腔长大于 $800\mu\text{m}$ 的激光器甚至没有 kink。



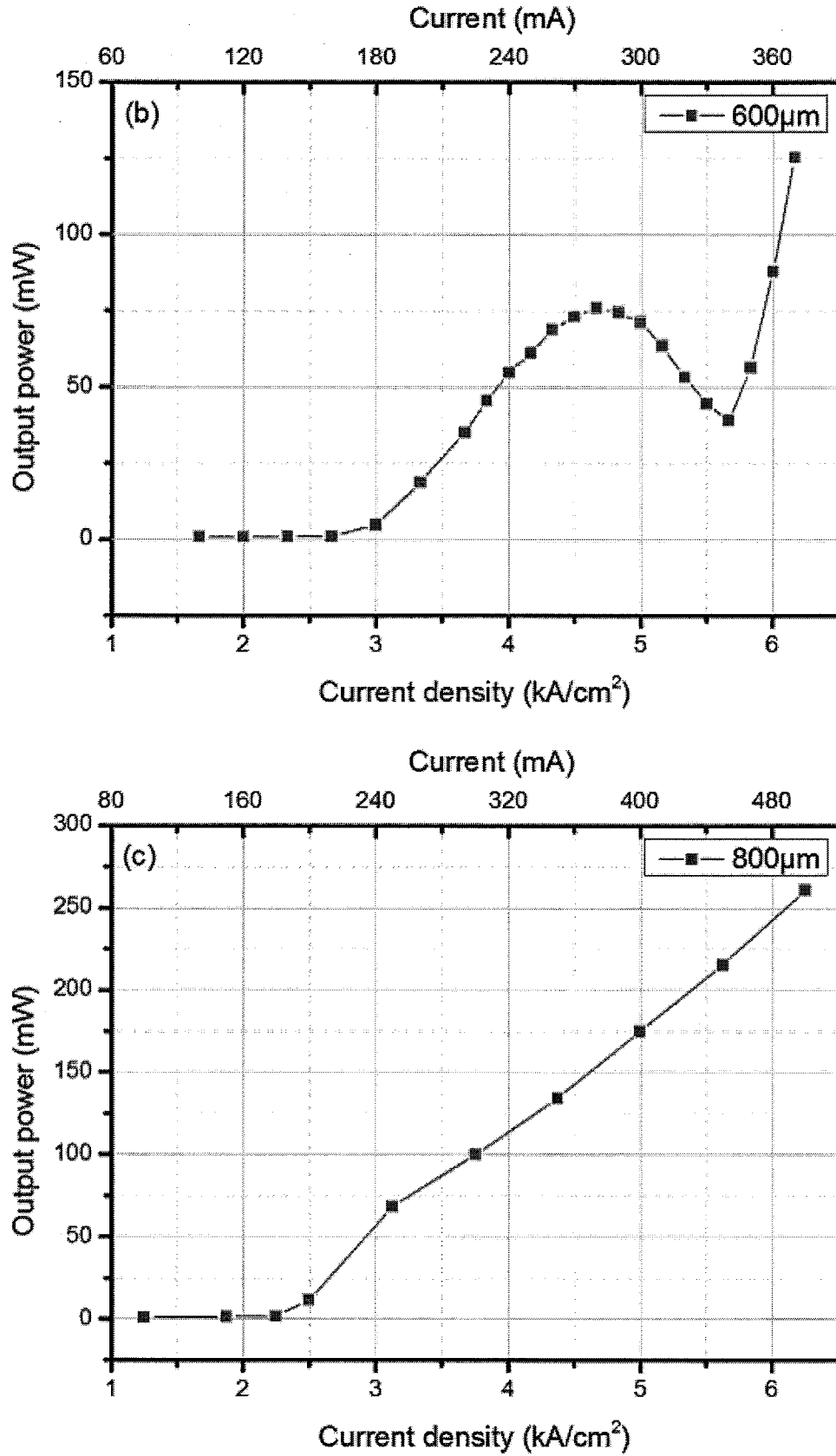


图 5-1 不同腔长激光器的 P-I 曲线

5.2 不同电流下激光器的远场图

半导体激光器是介质波导腔，振荡模式为介质波导模。模式分为纵模和空间模两种，如图 5-2 所示，空间模通常表示的是激光器腔横截面上的场型分布，描述了空间几何位置上光功率的分布，也称远场分布。图 5-3 所示的为 GaN 基激光器平行和垂直于结平面的远场图，垂直于结平面的光束发散角和平行于结平面的并不一样，可以将两个方向的光束看成独立的高斯分布。远场图是从前腔面收集光，角度的分辨率为 1° 。图 5-3 (a) 所示的腔长为 $600\mu\text{m}$ 的激光器在不同电流下垂直于结平面的远场图，当电流从 240mA 到 300mA 时，图形都表现为稳定的基模，另外在基模主峰的右侧出现一个小的肩峰，这是由于在激光器结构靠近 n 侧存在光场的泄漏，所以该肩峰是漏模。图 5-3 (b)、(c) 和 (d) 分别是腔长为 $400\mu\text{m}$ 、 $600\mu\text{m}$ 和 $800\mu\text{m}$ 的激光器在不同电流下平行于结平面的远场图。为了确认 kink 对应的电流值和线性区对应的电流值处模式是否发生变化，对于腔长为 $400\mu\text{m}$ 的激光器分别测试了 110mA 、 140mA 、 180mA 三个电流值的远场图。当测试电流分别为 110mA 、 140mA 时，图形为两个峰且半峰宽逐渐变宽，其中电流值 140mA 对应的两个峰值差更明显，这时刚好对应 kink 位置。当处于线性区，图形在对应于 180mA 电流下表现为很好的高斯拟合。同时，测试了 $600\mu\text{m}$ 腔长的激光器，可以看出不同电流下均表现为两个峰，激光器以多模形式为主，当电流值为 240mA 、 270mA 、 300mA 时发现峰位发生了轻微移动并且测试过程中观察到了激光束的波动，光束跳动直接表明了激光器内部模式的不稳定，从而导致激光器输出功率的扭折。对于腔长为 $800\mu\text{m}$ 的激光器，各电流下远场图表现为稳定的模式形式，当电流增加到 360mA 图像中位于主峰两侧的对称小峰异常明显。虽然激光器是多模工作形式，但对于长腔长激光器，模式的分布及半宽都较为稳定，因此 P-I 曲线表现为线性。

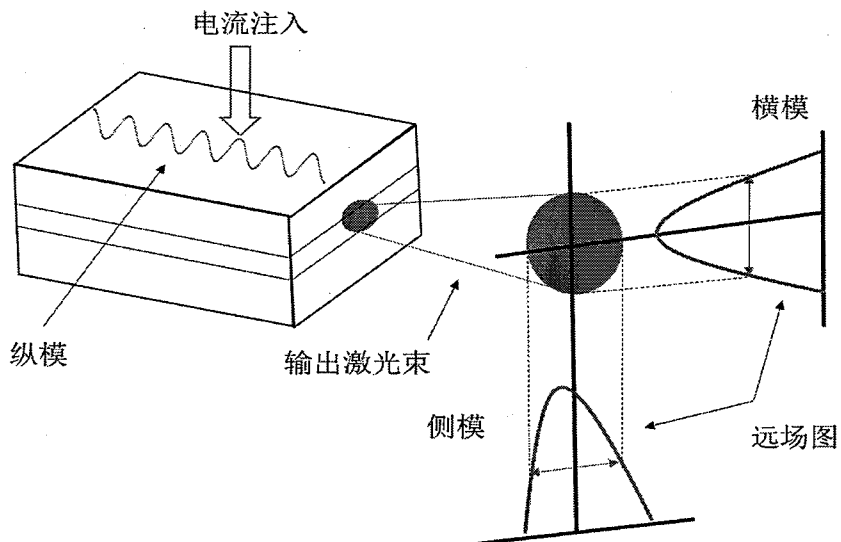


图 5-2 激光器的模式

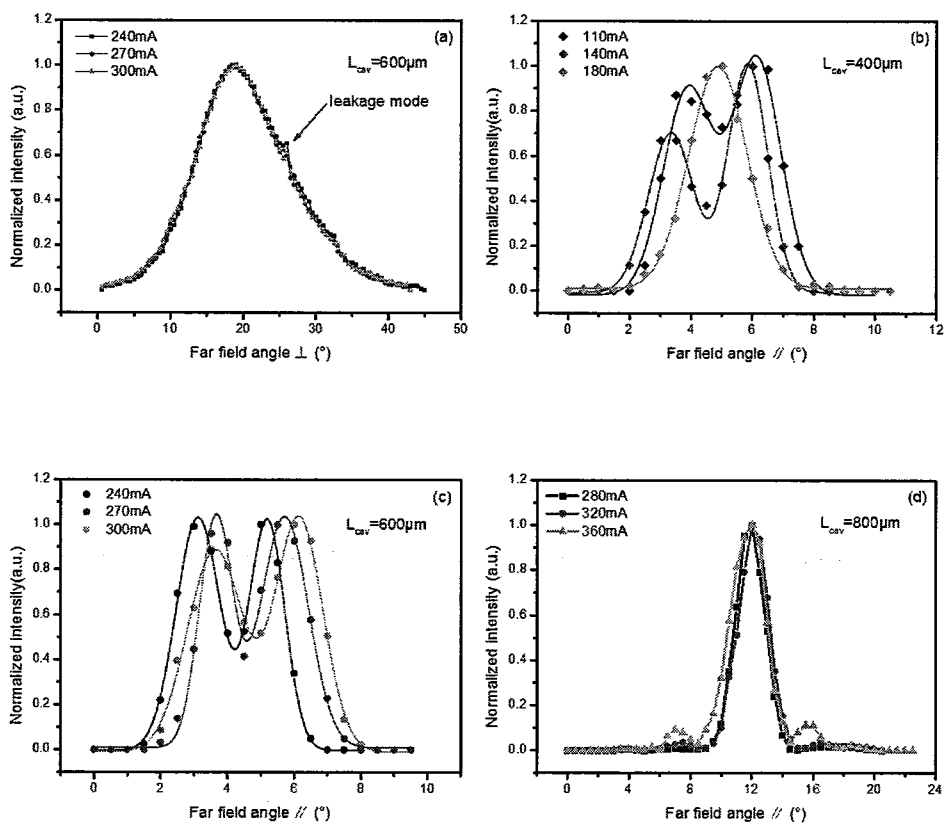


图 5-3 不同腔长的 GaN 基激光器平行和垂直于结平面的远场图

基于以上测试结果分析，这里将对激光器的结构设计做一个简单介绍，我们的激光器结构是典型的脊形波导结构，脊形结构刻蚀的只是 P 型层，并不影响有

源区的完整结构,这样就使得脊形垂直方向的有效折射率不同于脊形两侧垂直方向的有效折射率。如图 5-4 激光器横截面的脊形结构及折射率分布,由于组分和厚度的差别,位于脊形正下方垂直方向有源区的有效折射率 n_1 高于脊形两侧垂直方向有源区的有效折射率 n_2 ,因此在侧向上形成实折射率波导,这种波导比横向异质结波导的折射率差要小,为弱折射率波导。这种波导结构容易受到温度分布和注入载流子浓度起伏的影响,其模式的稳定性不太好。模式的稳定性和折射率差有关,当注入电流增加,有源区温度升高,折射率增加,导致模式不稳定。由温度和载流子引起折射率变化的表达式为:

$$\Delta n = \Delta n_{\text{eff}} + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial n}{\partial N} \Delta N \quad (5.1)$$

Δn_{eff} 表示有效折射率差, $\frac{\partial n}{\partial T} \Delta T$ 表示由温度引起的折射率, $\frac{\partial n}{\partial N} \Delta N$ 表示由载流子浓度引起的折射率变化。对于同一脊形宽度的激光器,高阶模和基模之间跳变对应的有效折射率差 Δn 存在临界值,当温度升高,会引起脊形区域下折射率 n_1 的增加,并且增加的差值高于脊形两侧的有效折射率 n_2 增加的差值,一旦折射率差 Δn 超过临界值,基模会跳变到高阶模状态,导致 P-I 曲线出现 kink。为了确认温升因素的影响,接下来做了不同脉宽下的 P-I 曲线的测试。

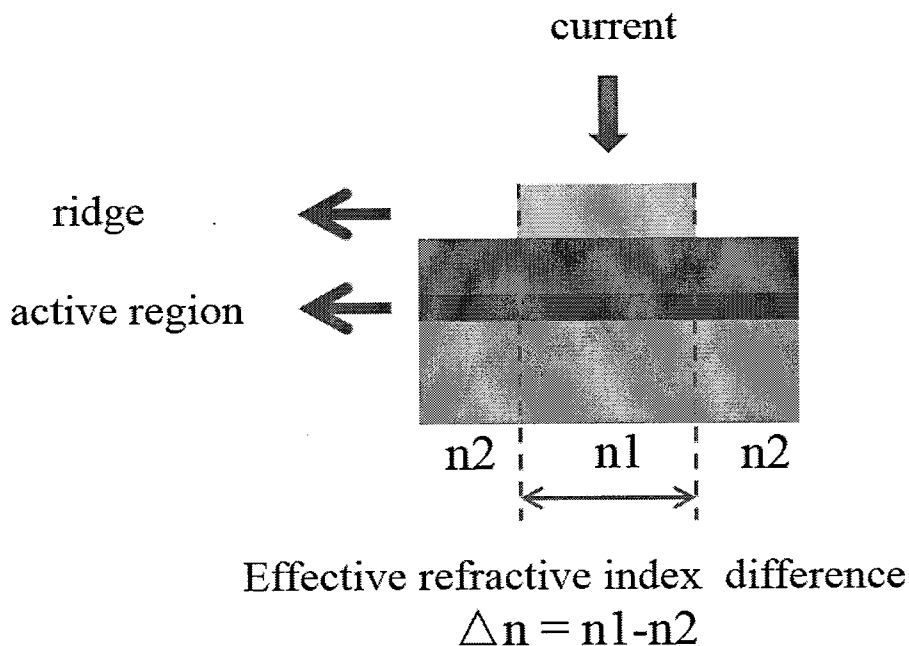


图 5-4 激光器横截面的脊形结构和折射率的分布

5.3 不同脉宽的 P-I 曲线分析

该测试是在室温下进行的，脉宽为 $10\mu\text{s}$ ，频率为 10kHz ，激光器输出光通过积分球探测。如图 5-5 所示，为腔长 $600\mu\text{m}$ 的激光器在不同脉宽下的 P-I 曲线，纵轴为强度，横轴为电流。图 (a)、(b) 和 (c) 对应的脉宽分别为 $0.5\mu\text{s}$ 、 $1\mu\text{s}$ 和 $1.5\mu\text{s}$ ，kink 初始点对应的电流为 340mA 、 300mA 和 280mA ，可以看出，随着脉宽的减小，kink 点对应的电流值越大。相对于连续直流驱动，在脉冲条件驱动下，激光器工作是一种处于发热和散热交替状态过程，当脉冲占空比足够小时，不会造成大的热积累和温升，而对于短脉宽，温升比长脉宽的温升高，热效应对非线性的影响小，kink 对应的电流值越大，所以认为非线性与热效应有关。为了进一步研究温度分布对非线性机制的影响，采用了有限元分析方法对激光器芯片进行了热场模拟。

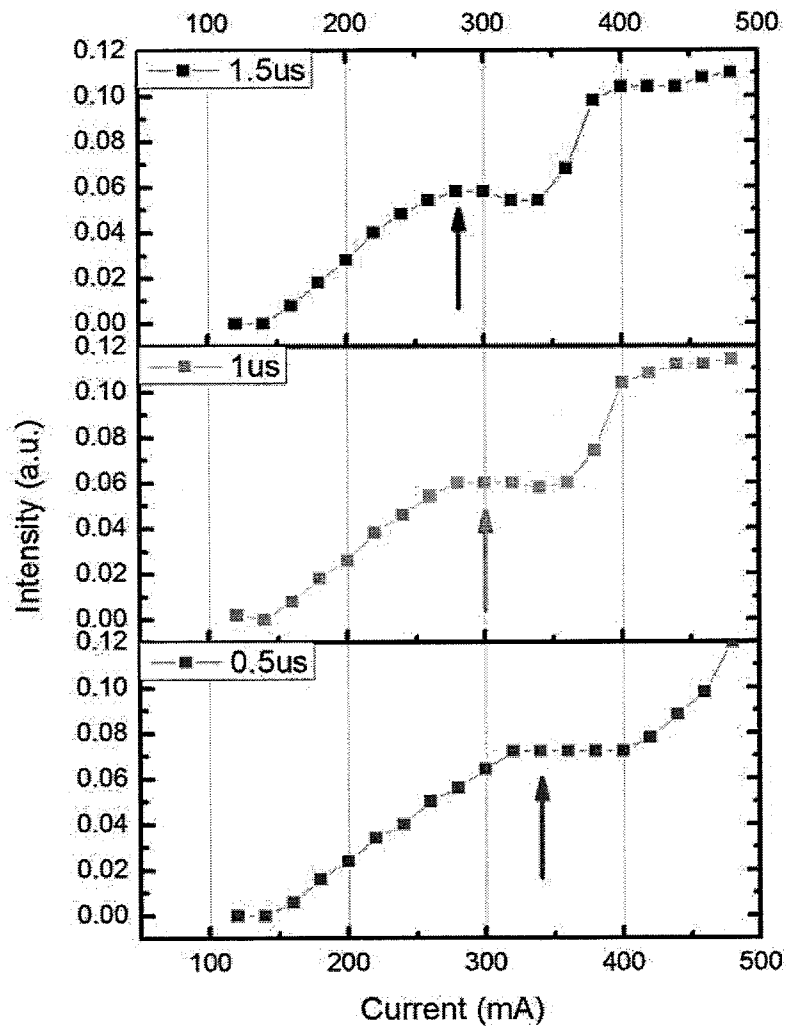


图 5-5 腔长为 $600\mu\text{m}$ 的激光器在不同脉宽下的 P-I 曲线

5.4 ANSYS 模拟温度分布分析

本节采用有限元热学分析软件 ANSYS 分析了激光器温度分布对模式的影响，如 5.2 节分析温度的变化会引起折射率的变化而导致模式不稳定，因此我们分别模拟了激光器腔面和沿腔长方向的温度分布曲线。在模拟中，激光器的封装均采用 TO9 的封装形式，设定激光器工作时的电流密度为 $5\text{kA}/\text{cm}^2$ 。图 5-6 所示的为不同腔长激光器腔面的温度分布，激光器的腔面宽度均为 $200\mu\text{m}$ 。从图中可以看出，最高温度出现在脊形正下方横向区域为 $95\text{-}105\mu\text{m}$ 的有源区，脊形两侧 $2\mu\text{m}$ 范围内温度为对称分布。腔长 $400\mu\text{m}$ 的激光器有源区的最高温度低于腔长 $600\mu\text{m}$ 、 $800\mu\text{m}$ 的激光器有源区的最高温度，三种不同腔长激光器的最高温度与脊形两侧附近最低温度的温差依次为 6.2K 、 5.6K 、 4.9K ，三者的温差随腔长增加逐渐减小。而且通过上述远场图分析，三种腔长激光器已存在多模形式，说明该温差下激光器模式已经发生了跳变，且长腔长激光器腔面温度分布差值对于短腔长激光器温差差值小，因此对模式跳变的影响也相对要小。由于对腔面的温度模拟只是简单的二维方向上的分析，而温度对于激光器模式的影响是三维的，因此我们还需分析激光器沿腔长方向的温度分布。

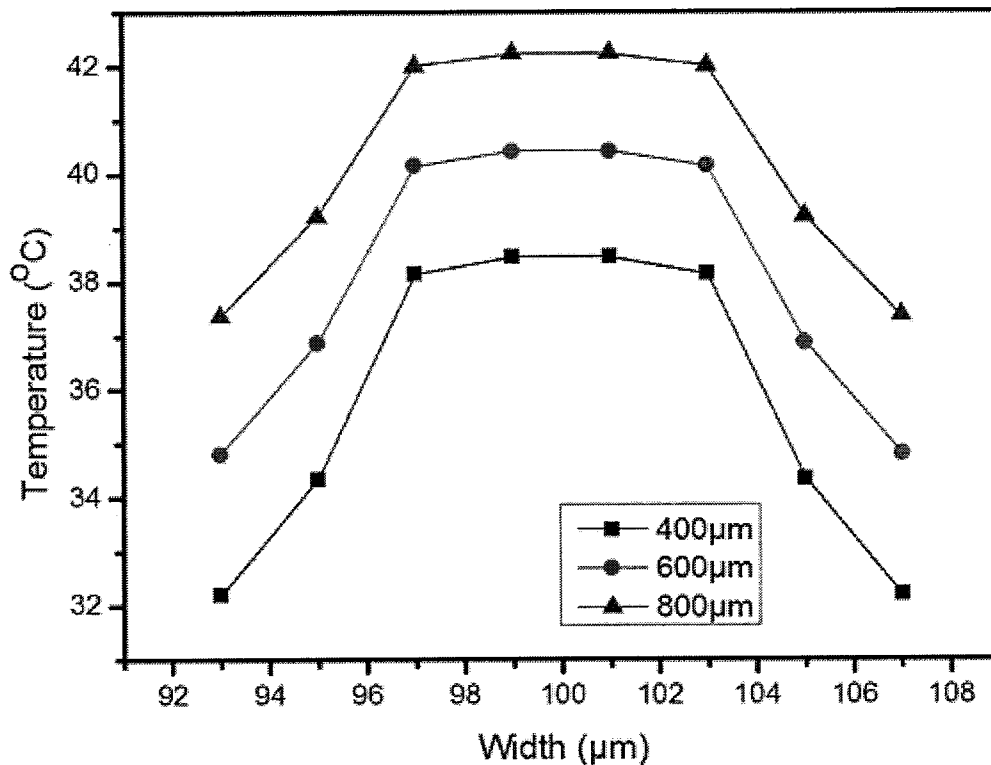


图 5-6 不同腔长的激光器腔面的温度分布

图 5-7 所示的为不同腔长激光器沿腔长方向的温度分布。模拟曲线中温度分布是沿脊形从前腔面到后腔面，模拟结果和我们之前的实验值^[85]是一致的，最高温度出现在有源区前腔面附近，热量随后向侧向和下方传递。如图中黑色方框数据点，腔长 400 μm 激光器的温度分布靠近前腔面急剧降低，最低温度位于距离后腔面 150 μm 的位置，最高与最低温度的温差为 4.5K。而腔长 600 μm 激光器的曲线和腔长 400 μm 激光器的温度分布趋势一样，但是温差比 400 μm 的温差小。800 μm 腔长的激光器温度分布曲线相对平缓，温差为 2.5K，在三者中最小。对比三组不同腔长激光器的温度分布发现，长腔长的激光器沿着腔长方向温度分布更加均匀，因此波导层的光场分布更加稳定，模式也趋于稳定。此外，我们知道激光器的热阻反比于腔长，对应的热阻分别为 55K/W、31K/W、24K/W。激光器腔长越长，热阻越小。这种热阻效应降低了温差，改善了 P-I 曲线的线性度。

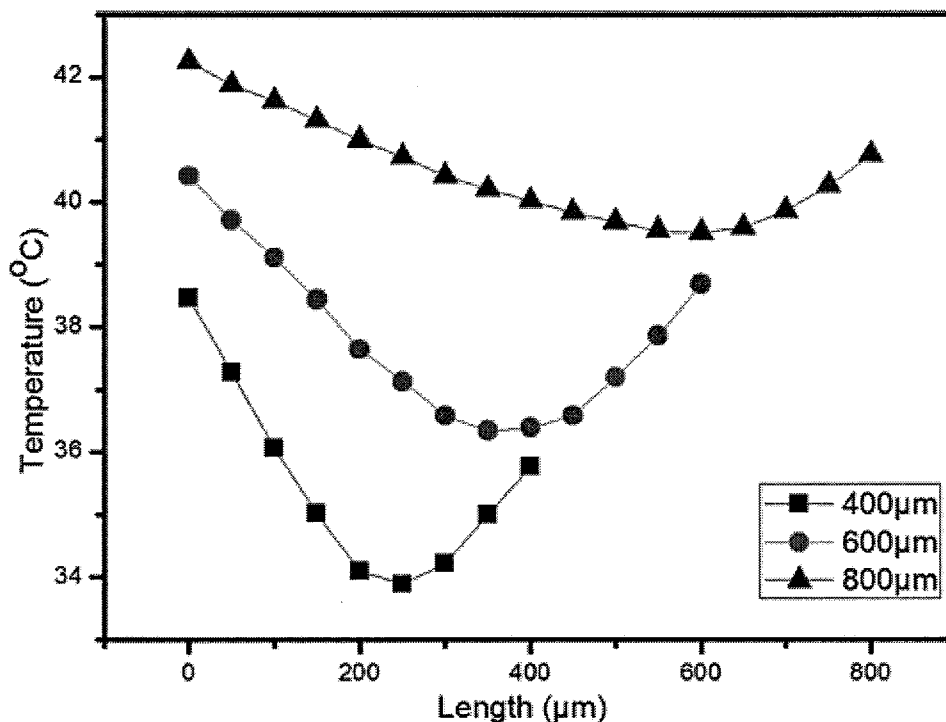


图 5-7 不同腔长的激光器沿腔长方向的温度分布

因此，通过实验结果和模拟结果相结合，由此推断光输出功率的 kink 与激光器结构有关。当注入电流大于阈值电流，激光器开始是以基模工作，且基模增益随注入电流增加而增加，当注入电流达到某特定值，有源区内载流子变化导致基模增益、有源区温度分布等也发生变化，造成基模增益下降，高阶模增益增加，

而有源区温度分布的均匀性进一步影响了模式的稳定性,不均匀的温度分布使得光输出功率的不稳定,即产生了 P-I 曲线的 kink。因此增加激光器腔长使得温度分布更均匀,并且高阶模出现的阈值得到增加,克服了激光器光输出特性的 kink 现象。

5.5 本章小结

1. 分析了不同腔长脊形结构的 GaN 基激光器的 P-I 曲线的非线性机制,随着腔长的增加, kink 出现在更高的电流密度,腔长大于 $800\mu\text{m}$ 的激光器甚至没有 kink。
2. 通过测试不同电流下的远场图和不同脉宽下的 P-I 曲线,认为热效应引起模式不稳定导致了 kink 的产生。
3. 采用有限元热学模拟,结果表明短腔长中温度分布的不均匀性导致了光场分布差异,使得模式的稳定性不好。

第六章 全文总结与展望

6.1 全文总结

本论文主要针对 GaN 基激光器的特性及可靠性进行了研究，并采用电学、光学及微观结构的表征方法对 GaN 基蓝光和绿光激光器的退化特征进行了分析，利用实验测试和热学模拟的结合分析了蓝光激光器的 P-I 输出特性，本论文的完成的主要内容如下：

1、分析了恒电流条件下蓝光激光器的老化现象。随老化时间延长，光功率开始呈快速下降，随后缓慢降低。老化后脊形边缘出现孔洞，确定了老化初期功率下降速率与激光器脊形边缘孔洞密度成正比例关系。对其横截面结构分析，孔洞处 Au 和 Ti 层发生反应形成了合金。

2、分析了恒电流条件下绿光激光器的老化现象。绿光激光器老化后阈值电流增加。通过变温光荧光测试评估其内量子效率没有下降，而微区荧光显微镜(μ -PL)分析发现老化后的样品脊形上呈现不均匀的变暗，认为可能是金属与半导体之间发生了扩散作用。

3、研究了不同腔长（400 μ m、600 μ m 和 800 μ m）激光器光输出光功率-电流（P-I）曲线。发现短腔长（400 μ m 和 600 μ m）激光器都出现非线性，即所谓的“kink”，而 800 μ m 腔长的激光器没有 kink。通过分析不同电流下的远场图、不同脉宽的 P-I 曲线，并采用 ANSYS 模拟了激光器腔面和沿腔长方向的温度分布。结果表明，温度分布不均匀引起模式的不稳定最终导致 kink 的产生。

6.2 工作展望

基于本论文的研究结果，我们对蓝绿光激光器退化现象的分析有了一定的了解，并且通过改进器件结构设计提高了激光器光输出最大功率，后续还需要在以下几个方面作进一步的研究：

1、研究蓝光激光器中电流因子诱发孔洞产生、生长、恶变的具体机制，降低孔洞产生的几率，提高激光器性能。

2、研究光场和电流对 GaN 基绿光激光器退化的影响，确定绿光激光器不均匀退化的物理机制。

3、改进绿光激光器的生长条件、工艺设计、器件封装等因素，延长绿光激光器的寿命。