材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260806001

外部应力对Si衬底GaN基发光器件性能的影响

汤英文*，张嘉甫，罗彩任

（闽南师范大学 物理与信息工程学院，福建 漳州 363000）

摘　要： 针对硅衬底与GaN之间晶格失配、热失配引发的应力难题，文章借助键合金属结构设计与连续阶梯退火工艺调控硅衬底GaN基绿光LED的外部应力，利用高分辨率X射线衍射与电致发光（EL）光谱，系统探究应力演变对器件光电性能的影响规律。结果表明：当退火温度由室温提升至200℃时，GaN薄膜面内张应变由0.094 1%下降至0.042%；垂直方向压应变由－0.031%变化至－0.017 8%，晶格常数逐步趋近无应力状态；同步EL测试结果显示，器件光功率相较于退火前（176 mW）持续衰减，发光波长发生约12 nm红移，光谱半峰宽由28 nm拓宽至35 nm。应力调控机理分析证实，退火过程诱发InGaN量子阱压应力上升，加剧量子限制斯塔克效应，降低电子-空穴辐射复合概率，最终造成器件发光效率衰减。

关键词： 硅衬底；GaN基发光芯片；应力调控；退火；量子限制斯塔克效应

中图分类号：TN304.055　　**文章编号：**1001－5868(2026)05－0933－05

Impacts of External Stress on the Optoelectronic Performance of GaN-Based Light-Emitting Devices on Si Substrates

TANG Yingwen, ZHANG Jiafu, LUO Cairen

(**School of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, CHN**)

Abstract: To solve the problem related to the stress induced by the lattice and thermal mismatch between a silicon substrate and GaN, the external stress of Si-substrate GaN-based green light-emitting diodes was regulated in this study via bonding metal structural design and a continuous stepwise annealing process. High-resolution X-ray diffraction analysis and electroluminescence (EL) spectroscopy were used to systematically investigate the influence of stress evolution on the optoelectronic performance of the devices. The results showed that when the annealing temperature increased from room temperature to 200℃, the in-plane tensile strain of the GaN film decreased from 0.094 1% to 0.042%, and the out-of-plane compressive strain changed from －0.031% to －0.017 8%. The lattice constants gradually approached those of the stress-free state. Synchronous EL measurements revealed that the optical power of the device decreased continuously compared with the initial state (176 mW before annealing). The emission wavelength exhibited a redshift of approximately 12 nm, and the full width at half maximum broadened from 28 to 35 nm. Analysis of the stress modulation mechanism verified that the annealing-induced increase in compressive stress in InGaN quantum wells aggravated the quantum-confined Stark effect, lowered the probability of electron-hole radiative recombination, and ultimately reduced the luminous efficiency.

Key words: silicon substrate; GaN-based LED; stress regulation; annealing; quantum-confined Stark effect

收稿日期：2026－08－21.

基金项目：福建省自然科学基金（2022J01917）.

* **通信作者：**汤英文

0 引言

近年来，GaN基LED已在固态照明与显示领域实现规模化应用，并不断向微显示、光通信等前沿领域拓展延伸，相关研究持续受到广泛关注[1-5]。当前商用GaN基发光器件主要采用蓝宝石、碳化硅（SiC）与硅（Si）三种衬底方案。其中，硅衬底凭借大尺寸、低成本及优良的导电性等优势，相较于蓝宝石和SiC衬底表现出显著的应用潜力。然而，GaN与Si之间存在高达17%的晶格失配与56%的热失配，两者在晶格常数和热膨胀系数上的固有差异，不可避免地在外延薄膜内部引入残余应力[6]。此外，硅衬底本身对可见光具有吸收特性，为最大限度提升发光器件的外量子效率，硅衬底GaN发光器件须采用薄膜垂直结构芯片。相较于传统LED结构，垂直结构GaN LED凭借更优异的电流注入能力、良好的散热特性以及表面粗化后显著提升的出光效率，展现出优异的可靠性，因而在大功率、高附加值产品中获得了广泛应用[7-9]，如汽车像素大灯、Micro-LED显示等前沿应用。硅衬底GaN基发光芯片在实际发展中仍面临严峻挑战，其核心问题在于GaN与Si之间的应力不仅存在于外延生长阶段，在垂直结构芯片的整个制备流程中同样持续存在并产生影响[10]。去除硅衬底后，残留在GaN薄膜芯片内部的应力若未得到有效释放，在芯片制程中即可观察到裂纹产生，且随冷热循环次数增加，裂纹数量递增。即便最终获得成品芯片，其在使用过程中仍频繁出现光衰、失效等问题。究其原因，芯片薄膜受基板及键合层热应力的持续作用，外延层极易开裂，不仅降低芯片制备良率与可靠性，也严重制约了硅衬底GaN基发光芯片的产业化进程。

近年来，随着GaN HEMT应用日益广泛，为提升器件耐压能力，垂直型GaN HEMT成为重要发展方向。采用硅或蓝宝石衬底进行HEMT外延生长有利于降低成本，但制备垂直结构器件须去除原始衬底并将薄膜键合至新的导电衬底[11-12]，同样面临键合工艺与应力调控的技术难题。因此，实现对GaN薄膜芯片内部残留应力的有效调控以提升可靠性，并系统研究应力对器件性能的影响机制，已成为该领域亟待解决的关键问题。

生长缓冲层与采用图形化衬底是现阶段缓解GaN薄膜应力的常用手段[6,13]，但上述方案无法从根源上消除外延应力。本文基于垂直结构LED的键合工艺，通过优化键合金属体系并结合阶梯退火工艺，实现对器件外部应力的有效调控，系统探究外部应力演变对硅衬底GaN基绿光发光芯片光电性能的影响。实验中，采用高分辨率X射线衍射（HRXRD）表征GaN外延薄膜的应力状态，同步开展电致发光（EL）光谱测试以评估器件发光特性，并结合扫描电子显微镜（SEM）观察键合层在不同退火温度下的形貌演变。通过多维度表征手段的交叉分析，旨在阐明外部应力与硅衬底GaN基绿光发光芯片光电特性之间的内在作用机制。

1 实验过程

本实验采用英国Thomas Swan公司金属有机化学气相沉积（MOCVD）系统，在4英寸Si（111）衬底上外延生长GaN基绿光多量子阱LED薄膜，具体生长工艺参见文献[14]。外延结构自衬底向上依次为：Si衬底、缓冲层、n-GaN层、准备层、绿光多量子阱、p-AlGaN层及p-GaN层。

外延片首先在空气气氛中于500℃下退火15 min，以激活p-GaN层中的Mg掺杂受主。随后，蒸镀Ni（2 Å）/Ag（1 200 Å）作为p-GaN的反射欧姆接触电极，经光刻与腐蚀工艺形成图形化P面反射金属，清洗后蒸镀Cr（20 Å）/Pt（100 Å）/Au（100 Å）/Ag（15 000 Å）作为键合层。将制备好的外延片与预先蒸镀有Cr（20 Å）/Pt（100 Å）/Au（100 Å）/Ag（15 000 Å）/In（10 000 Å）的导电硅基板进行键合，随后腐蚀去除Si衬底，并对暴露的n-GaN面进行表面粗化处理。采用PECVD在150℃下沉积SiO_2钝化层，经光刻后蒸镀Ti/Al作为n电极。

采用Disco划片机将完整的圆片均匀划分为A，B，C，D四个等面积样品，严格遵循单一变量原则。各样品功能分配如下：样品A用于应力表征，在退火前及每次退火后分别测试晶格常数，以探究升温过程中芯片应力的演变规律；样品B经划片分选后封装为成品器件，与样品A同步进行退火处理，并在各退火节点测试光电性能参数；样品C用于SEM观察，分析键合层微观结构随退火温度的变化；样品D为备用样品，用于补充验证实验。上述实验设计旨在系统研究退火工艺对芯片电致发光

特性的影响机制。

实验设置退火温度梯度为160℃,170℃,180℃,190℃,200℃。每次退火前,待加热台温度稳定后,将样品A与芯片B同时置于加热台上,保温15 min后取出。

钝化膜生长温度设定为150℃,主要基于以下考量:温度过低难以保证SiO_2成膜质量及钝化效果,故将该温度设为工艺下限。该设定既满足了钝化膜制备要求,又能最大限度保留芯片的初始应力状态,为后续连续退火工艺的应力调控预留了充足空间。

应力测试选用样品A(1/4圆片)而非封装芯片B,主要原因为单颗芯片尺寸过小,XRD难以获得精准的衍射峰位。为提升测试精度并减小实验误差,采用双晶面扫描策略,同时采集(0002)面和(10-12)面的衍射信号,通过同一晶面不同级次衍射峰位计算晶格常数。扫描参数设置如下:(0002)面扫描范围为10°～45°,(10-12)面为20°～60°;步长由常规的0.000 5°优化至0.000 1°,以提高峰位定位精度。

为保障退火前后测试结果的可比性,每次XRD测试后将样品取下进行下一轮退火,再放回测试时需确保辐照区域一致。具体操作中,尽量以样品中心作为X射线入射点,并采用原位复测、样品旋转90°及180°复测等方法验证测试重复性。四次测量结果显示,晶格常数基本一致,表明测试数据的可靠性与重复性良好。

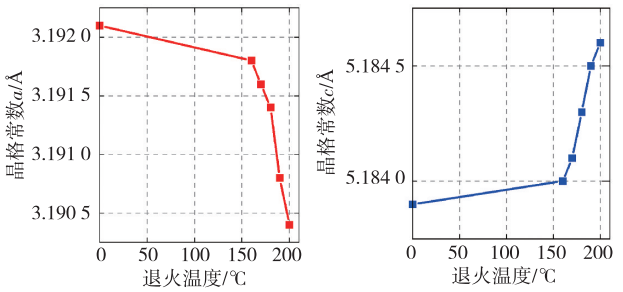
2　实验结果和讨论

2.1　HRXRD图谱计算与分析

不同退火温度下的应变如表1所示,并将表1数据绘制为图1所示的晶格常数随退火温度变化曲线。退火前,GaN薄膜的晶格常数显示其受到张应力作用,这与硅衬底与GaN外延层之间因晶格失配和热失配所诱导的残余张应力特征一致。随着退火温度升高,GaN薄膜的a值逐渐减小,c值逐渐增大,表明晶格常数向无应力状态逐步恢复。在160℃～180℃温度区间内,a值和c值变化尤为显著;200℃退火后,晶格常数已接近GaN的标准值(a=3.189 1 Å,c=5.185 5 Å)。实验退火温度上限设定为200℃,主要受限于封装材料的热稳定性,继续升温将对器件封装造成不利影响。

表1　不同退火温度下的应变

退火温度/℃	晶格常数a/Å	晶格常数c/Å	水平应变ε_a	垂直应变ε_c
退火前	3.192 1	5.183 9	0.094 1%	−0.031 0%
160	3.191 8	5.184 0	0.084 4%	−0.029 0%
170	3.191 6	5.184 1	0.080 5%	−0.027 6%
180	3.191 4	5.184 3	0.068 5%	−0.024 3%
190	3.190 8	5.184 5	0.052 3%	−0.019 6%
200	3.190 4	5.184 6	0.042 0%	−0.017 8%



(a) 晶格常数a　　(b) 晶格常数c

图1　晶格常数随退火温度的变化情况

上述演化规律表明,随着退火温度升高,薄膜内部应力得到逐步释放;其中160℃～180℃为应力释放的主要区间,至200℃时应力释放趋于充分,进一步升温对应力状态的调节作用有限。值得指出的是,GaN层张应力的减小对应着InGaN量子阱层压应力的增大,二者通过外延层间的晶格共格关系相互耦合,揭示了退火工艺对量子阱能带结构与发光性能的间接调控路径。

2.2　芯片EL光谱分析

去硅衬底后的LED薄膜芯片因受到键合基板的机械束缚,应力无法自由释放。在退火过程中,当温度升至In熔点以上时,键合层中低熔点In发生熔化,其流动性使GaN薄膜得以在一定范围内伸展,从而实现薄膜内部应力的有效释放。SEM观察结果显示,随退火温度升高,键合层中In与Ag逐步形成Ag-In合金相,其微观结构与物相演变与应力释放过程密切相关,具体分析详见文献[15]。

图2～图4分别为连续退火条件下LED芯片的EL光谱测试结果。随着退火温度升高,芯片光功率逐渐下降,发射波长持续红移,同时半峰宽呈现展宽趋势。

InGaN/GaN多量子阱LED的发光特性主要取决于阱层组分、厚度及应力诱导的压电效应。鉴于本实验所设退火温度较低,不足以引起量子阱的组分或厚度发生显著变化,因此上述光电参数的变化可主要归因于压电效应的演变。GaN基材料为极

性半导体，InGaN/GaN多量子阱中阱层所承受的压应力将导致能带倾斜，进而引起发光波长红移并降低电子-空穴复合几率，即量子限制斯塔克效应（QCSE）。

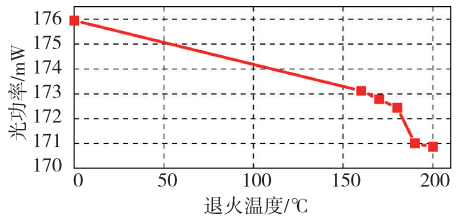


图2 光功率随退火温度的变化

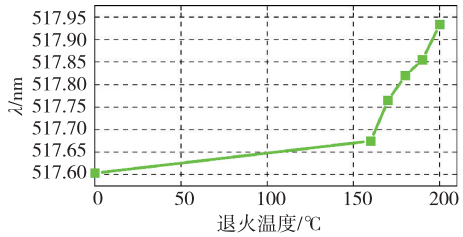


图3 波长随退火温度的变化

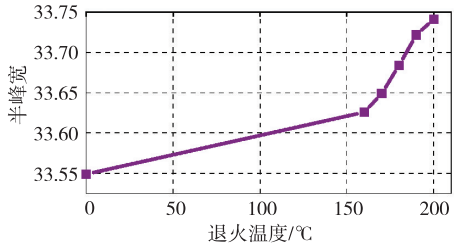


图4 半峰宽随退火温度的变化

HRXRD晶格常数分析结果表明，随退火温度升高，量子阱所受压应力逐步增大，证实压电效应增强，QCSE加剧，与EL光谱中光功率下降及波长红移的演化趋势一致。此外，压应力作用下阱层In组分的微观涨落被进一步放大，In富集区极化电场更强，从而引起半峰宽展宽。

值得注意的是，150℃钝化膜生长过程本身具有退火效应。未经历钝化膜生长（或未经历150℃退火）的发光芯片，其光功率显著高于经历该过程的芯片。采用同批次外延片经金-金键合工艺制备的相同尺寸芯片（键合后退火过程中金不熔化，应力无法通过此途径释放），其光功率可达192 mW，较经历150℃钝化膜生长工艺的芯片提高约9%，较200℃退火后的芯片提高约12%，表明该影响十分显著。尽管上述对比数据并非源自同一外延片，但其变化趋势具有明确的参考价值。

综上，退火引起的应力释放虽有利于提升器件可靠性，却对光功率造成显著损耗。HRXRD晶格常数分析所得应力演化规律与EL光谱所反映的量子阱光电性能变化趋势高度一致，二者相互印证，验证了退火温度对器件性能的调控机制。

3 结论

本文以导电硅基板支撑的去衬底GaN基绿光LED薄膜器件为研究对象，系统开展了连续退火工艺调控实验。HRXRD及SEM表征结果表明，在优化键合层结构的前提下，退火处理可有效诱导GaN外延薄膜发生应力演化，是调控薄膜应力状态的有效后处理手段。

光电性能测试进一步揭示，退火温度对InGaN量子阱应力水平具有显著调制作用。量子阱压应力的升高会加剧量子限制斯塔克效应，进而导致器件光功率下降、发射波长红移及光谱展宽。随着退火温度的升高，薄膜内部失配应力逐步释放。与未生长钝化层（或未经150℃退火处理）的样品相比，200℃退火条件下器件光输出功率衰减幅度达12%，表明退火温度对绿光LED发光性能具有显著影响。

由此可见，衬底剥离型垂直LED存在应力释放与发光性能衰减的固有矛盾。通过优化键合材料体系、键合层厚度及退火工艺参数，可有效缓解这一矛盾，推动器件综合性能趋于最优。本研究初步揭示了薄膜应力演化与硅基绿光LED光电特性的内在作用机制，可为垂直结构GaN发光器件乃至GaN HEMT器件的应力调控工艺提供有效的实验依据与设计思路。

参考文献：

[1] Crawford M H. LEDs for solid-state lighting: performance challenges and recent advances[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(4): 1028-1040.

[2] Nakamura S. The roles of structural imperfections in InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes[J]. Science, 1998, 281(5379): 955-961.

[3] 刘中凡，冯志庆，于乃森，等. 光子晶体提高GaN基LED发光效率实验与工艺研究[J]. 半导体光电，2013，34(3)：383-387.
Liu Zhongfan, Feng Zhiqing, Yu Naisen, et al. Improvement of luminous efficiency of GaN-based LEDs using photonic crystal[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(3): 383-387.

[4] 柳钟旭，谢大炜，戴御荣，等. 高速微发光二极管器件及其可见光通信系统最新进展[J]. 光通信研究，2026(2)：5-21.
Liu Zhongxu, Xie Dawei, Dai Yurong, et al. The latest

developments of high-speed micro-LED devices and their visible light communication systems [J]. Study on Optical Communications, 2026(2): 5-21.

[5] 王仙翅，潘章旭，刘久澄，等. 蓝光GaN基Micro-LED芯片制备及激光剥离工艺研究[J]. 半导体光电，2020，41(2)：211-216.
Wang Xianchi, Pan Zhangxu, Liu Jiucheng, et al. Preparation of blue light GaN-based micro-LED chips and study on laser lift-off process [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(2): 211-216.

[6] Liu C, Akihito K, Sodabanlu H, et al. Evolution of crystal quality and stress in MOVPE GaN-on-Si (111) induced by AlN interlayers[J]. Vacuum, 2025, 242: 114762.

[7] Yin H X, Zhu C R, Shen Y, et al. Enhanced light extraction in n-GaN-based light-emitting diodes with three-dimensional semi-spherical structure [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(6): 061113.

[8] Sung H K, Wang C, Kim N Y. Electrical and optical properties of laser irradiation treated vertical light-emitting diodes[J]. Electronics Letters, 2016, 52(12): 1041-1043.

[9] Kimura S, Yoshida H, Uesugi K, et al. Performance enhancement of blue light-emitting diodes with InGaN/GaN multi-quantum wells grown on Si substrates by inserting thin AlGaN interlayers [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 120(11): 113104.

[10] Lei Y, Wan H, Tang B, et al. Optical characterization of GaN-based vertical blue light-emitting diodes on P-type silicon substrate[J]. Crystals, 2020, 10(7): 621.

[11] Khadar R A, Liu C, Soleimanzadeh R, et al. Fully vertical GaN-on-Si power MOSFETs [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(3): 443-446.

[12] Brusaterra E, Bahat Treidel E, Deriks L, et al. Vertical GaN-on-tungsten high voltage pn-diodes from sapphire-grown GaN membranes[J]. IEEE Electron Device Letters, 2025, 46(4): 564-567.

[13] Song Y, Wu Z, Cui W, et al. Two-zone temperature AlN buffer layer-assisted growth of high-quality AlN films with controllable step bunching morphology on Si (111) substrates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2026, 1059: 187240.

[14] Wang Z H, Wang X L, Liu J L, et al. Effect of green quantum well number on properties of green GaN-based light-emitting diodes[J]. Chinese Physics Letters, 2018, 35(8): 087302.

[15] 汤英文，熊传兵，王佳斌. 硅衬底GaN基LED薄膜芯片的应力调制[J]. 发光学报，2016，37(8)：979-983.
Tang Yingwen, Xiong Chuanbing, Wang Jiabin. Stress modulation of GaN based LED thin film chip on silicon substrate [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(8): 979-983.

作者简介：

汤英文(1969—)，男，湖南省洪江市人，博士，教授，主要研究方向为宽禁带半导体GaN的光电及电子器件芯片研发及应用。