

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-10

悬浮氮化镓微盘中尺寸调控的回音壁模式演化及 应力相关光谱红移

朱刚毅^{1,2*}, 朱方悦^{1,2}, 雷 明^{3*}, 杨大全⁴, 李 欣⁵, 秦飞飞⁵

(1. 南京邮电大学 集成电路科学与工程学院(产教融合学院), 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学 波特兰学院, 江苏 南京 210003;

3. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074;

4. 北京邮电大学 信息光子学与光通信全国重点实验室, 北京 100876;

5. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 悬浮氮化镓(GaN)微盘的尺寸变化会改变回音壁模式(Whispering gallery mode, WGM)的谐振光程, 并通过应力调制影响有效禁带宽度, 进而影响其光谱响应。本文以直径为 5 μm 、10 μm 和 15 μm 的悬浮 GaN 回音壁微盘腔为研究对象, 结合室温光泵发光测试、激光模态归属分析、空间光场分布仿真和有限元应力分析, 研究微盘尺寸变化对 WGM 模式演化及应力相关光谱漂移的影响。结果表明, 随着微盘直径增大, 光谱模式数目增加, 模式间距减小, 谱线半高全宽减小。实验观测结果与理论计算得到的 WGM 模式位置一致。仿真结果显示, 光场主要局域于微盘边缘呈周期性分布。有限元与归一化光谱结果显示, 微盘直径增大时悬浮结构形变和应力水平升高, 主发光峰中心波长整体红移, 说明尺寸相关应力变化与发光峰位漂移之间存在对应关系。本文研究结果可为悬浮 GaN 微盘在光学传感应用中的谱峰识别、尺寸设计和光谱标定提供参考。

关 键 词: 悬浮 GaN 微盘; 回音壁微腔; 光泵发光; WGM 模式; 应力响应

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260197

CSTR: 32170.14.CJL.20260197

Size-Controlled Whispering-Gallery-Mode Evolution and Stress-Related Spectral Redshift in Suspended Gallium Nitride Microdisks

ZHU Gangyi^{1,2*}, ZHU Fangyue^{1,2}, LEI Ming^{3*}, YANG Daquan⁴, LI Xin⁵, QIN Feifei⁵

(1. College of Integrated Circuit Science and Engineering (College of Industry-Education Integration),
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China;

2. Portland Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China;

3. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China;

4. National Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876, China;

5. School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zhugangyi@njupt.edu.cn; 15210985670@163.com

Abstract: The size variation of suspended gallium nitride (GaN) microdisks can change the resonant optical path of whispering-gallery modes (WGMs) and further influence their spectral response through stress-related modulation of the effective bandgap. In this work, suspended GaN whispering-gallery microdisk cavities with diameters of 5 μm , 10 μm , and 15 μm were investigated by room-temperature optically pumped luminescence measurements,

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 省基础研究专项基金(自然科学基金)一面上项目(BK20241892); 信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)开放基金; 南京市关键技术专项资金(编号: 202512132)

Provincial Basic Research Special Fund (Natural Science Foundation) – General Project (BK20241892);

spectral mode assignment, spatial optical-field simulation, and finite-element stress analysis. The influence of micro-disk diameter on WGM evolution and stress-related spectral shift was analyzed. The results show that, as the micro-disk diameter increases, the number of spectral modes increases, the mode spacing decreases, and the full width at half maximum (FWHM) of the spectral peaks becomes smaller. The experimentally observed peak positions agree well with the theoretically calculated WGM mode positions. Simulated optical-field distributions show that the optical field is mainly confined near the microdisk edge and exhibits a periodic azimuthal distribution. Finite-element results and normalized spectra indicate that the deformation and stress level of the suspended structure increase with increasing microdisk diameter, while the center wavelength of the main emission peak shows an overall redshift. These results suggest a correspondence between size-dependent stress variation and emission peak shift. This work provides a reference for spectral peak identification, size design, and spectral calibration of suspended GaN microdisks in optical sensing applications.

Keywords: suspended GaN microdisk; whispering-gallery microcavity; optically pumped luminescence; WGM mode; stress response

1 引 言

微腔激光器作为片上光源是集成光电子和微纳传感系统中的重要组成部分,与传统光源相比,微腔激光器具有尺寸小、谱线窄、模式可调和易于集成等特点,能够使片上光通信、光谱检测和传感等系统具有更高的光电集成度^[1-4]。微腔激光按照腔结构可分为回音壁微腔,光子晶体微腔和法布里-珀罗(Fabry-Pérot, FP)腔^[5-7],尤其是 WGM 激光,具有更高的光场限域能力和更高的光谱响应特性,在光学传感、无标记生物传感等领域具有重要研究价值^[8-10]。在多种 WGM 微腔结构中,微盘腔因具有平面结构、工艺兼容性好和易于片上集成等特点,成为构建微腔激光器和集成传感器件的重要平台^[11-13]。微盘腔的光场主要沿盘边传播, WGM 共振条件与腔体直径、边界形貌、材料折射率和有效光程密切相关。因此,微盘几何尺寸不仅会影响 WGM 模式的数量和谱峰间隔,也可能改变器件的光谱响应特征。

GaN 作为第三代半导体,具有宽直接带隙,良好的光学、机械和电学特性,是制备短波长光源和 MEMS 传感的理想材料^[14-15]。近年来,围绕 GaN 微腔及微结构器件,已有研究在 WGM 激光、耦合腔模式调控、温度诱导模式切换以及光机 MEMS 传感等方面开展了探索^[16-19]。其中,有研究指出悬浮结构有助于改善 GaN 微结构器件的光学响应和发光特性。围绕这种结构,Aharonovich 等研究了包裹量子点的 GaN WGM 微腔,实现了连续激光泵浦的 WGM 激光,并研究了其光学特性变化^[20],Zhu 等通过在 GaN 微盘侧壁制备光栅结构,利用

结构的模式调控实现了高 Q 值的单模激光^[21]。随后,Zhu 等进一步研究 GaN 悬浮微盘的厚度和表面粗糙度对 WGM 激光的光学损耗和谐振模式的调控规律^[22]。与此同时,GaN 弯曲形变也会对禁带宽度产生影响,Lu 等研究了 GaN 微米棒在应力状态下对光学模式的调控,Chen 等研究了弯曲应变调制 InGaN 的能带分布的激光模式与能带分布,Liu 等研究了 InGaN 量子阱悬浮微盘在不同应力下的 PL 谱变化^[23-25]。

然而,现有研究多集中于 GaN 微盘的制备、单一尺寸器件的 WGM 激射或结构调控,对悬浮 GaN 微盘直径变化引起的 WGM 模式数量、谱峰分布、空间光场限域仍缺乏系统分析;且悬浮 GaN 微盘的结构形变和应力分布可能与光谱漂移存在关联,但作用关系仍缺乏充分讨论。因此,本文以直径 5 μm 、10 μm 和 15 μm 的悬浮 GaN 微盘为研究对象,结合室温光泵发光测试、WGM 模式归属、空间模式仿真和有限元应力分析,研究微盘尺寸变化对 WGM 模式演化及主发光峰红移行为的影响。本文结果有助于理解悬浮 GaN 微盘中尺寸效应、WGM 模式分布和应力相关光谱响应之间的关系,并可为光学传感应用中的谱峰识别、尺寸设计和光谱标定提供参考。

2 实 验

实验以商用 Si 基 GaN 外延片为材料体系,首先在外延片表面旋涂光刻胶,利用光刻工艺在光刻胶层中图形化制备圆形阵列掩膜图案;随后采用 ICP 刻蚀技术将光刻图形转移至 GaN 层中,刻蚀深度约 1.7 μm ,从而形成具有圆形轮廓的 GaN

微盘结构;完成刻蚀后,去除残余光刻胶,获得位于Si衬底上的GaN微盘阵列;最后,通过HF和稀HNO₃混合液各向同性湿法刻蚀Si,形成Si柱支撑的GaN悬浮微盘。通过设计不同直径的光刻掩膜图形,并调控湿法释放时间,最终获得直径分别为5 μm 、10 μm 和 15 μm 的悬浮 GaN 微盘样品。悬浮 GaN 微盘阵列样品的制备流程如图 1(a)所示。样品的形貌特性通过扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)进行表征,如图 1(b)

所示。器件为Si柱支撑的GaN圆盘,GaN厚度1.6 μm 。图 1(b)展示了直径为5 μm 、10 μm 和 15 μm 的悬浮 GaN 微盘形貌,并给出了微盘阵列的SEM图。结果显示,所制备微盘具有较完整的圆形轮廓,GaN上表面较为平整,侧壁连续性较好,为光场沿微盘边缘形成WGM周向谐振提供了基本的结构条件。同时,悬浮结构有利于降低垂直方向的光学损耗,并为后续获得边缘局域的WGM发光模式提供结构基础。

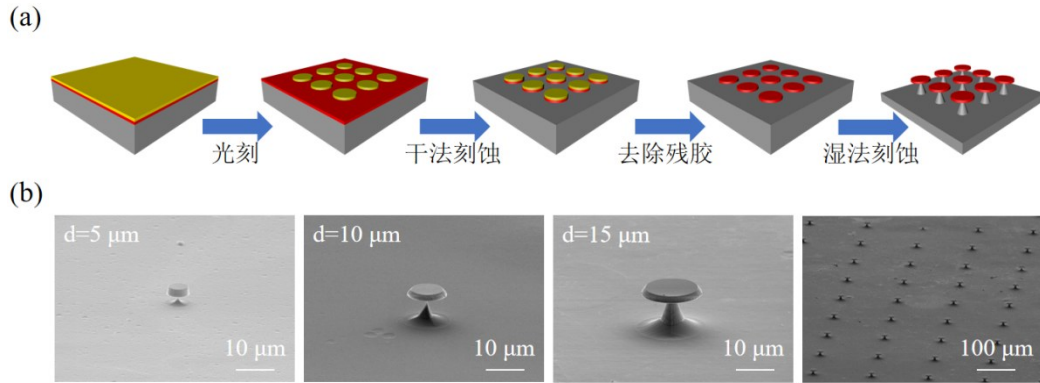


图1 悬浮 GaN 微盘阵列样品的制备流程及形貌表征。(a) 悬浮 GaN 微盘阵列样品的制备流程示意图;(b) 不同直径悬浮 GaN 微盘的 SEM 形貌图

Fig.1 Fabrication process and morphology characterization of suspended GaN microdisk array samples. (a) Schematic fabrication process of suspended GaN microdisk array samples. (b) SEM images of suspended GaN microdisks with different diameter

3 结果与讨论

3.1 不同直径悬浮 GaN 微盘的光学特性

样品的室温微区光泵发光测试采用微区光谱系统完成。以 325 nm 飞秒激光作为激发光源,脉冲宽度 70 fs,频率 1000 Hz,聚焦光斑直径 3 μm 经显微物镜聚焦后垂直照射于微盘表面,激发样品产生光致发光信号;发射光由物镜收集后耦合进入光谱仪。为保证不同尺寸样品之间的可比性,不同直径的悬浮 GaN 微盘均在上述相同测试条件下进行变功率室温光泵发光测试,所得光谱如图 2 所示。在不同泵浦功率下,各直径微盘均表现出明显的多峰发光特征。随着泵浦功率增加,GaN 微盘中的光生载流子浓度和光学增益逐渐提高,激光振荡逐渐从背景发光中显现,峰形也更加清晰,表明泵浦增强有利于微盘腔内窄线宽发光模式的形成。例如图 2(a)中,随着泵浦功率由 0.7 μW 增加到 2.0 μW ,激光模式个数从 2 个增加到 4 个,这说明微盘中的发光响应随激发增强而逐渐显现。此外,不同直径微盘也存在明显差异。5

μm 微盘的发光峰主要集中在约 374 – 377 nm 范围内,谱峰数量较少,峰间分布相对稀疏;当微盘直径增大至 10 μm 和 15 μm 后,光谱中的离散峰数量明显增加,谱峰分布逐渐变得密集,同时主要发光峰群中心整体向长波方向移动,表现出一定的红移趋势。对比图 2 中的结果,微盘直径不仅影响光泵发光谱中的离散峰数量和峰间分布,也会影响主要发光区域的位置。

为进一步分析不同直径微盘的发光差异,对各样品的发光强度、谱线半高全宽(FWHM)以及模态数进行了统计,结果如图 3 所示。为保证不同尺寸样品之间的可比性,FWHM 取自各光谱中强度较高且可独立分辨的主谐振峰,并通过峰形拟合获得;可分辨模态数根据光谱中明显高于背景噪声且峰间可区分的激光模式数量进行统计。

图 3(a)给出了发光强度随泵浦功率的变化关系。在测试功率范围内,各直径微盘的发光强度均随泵浦功率增加而增强,说明光泵激发能够有效增强微盘的发光响应。然而,不同直径样品的

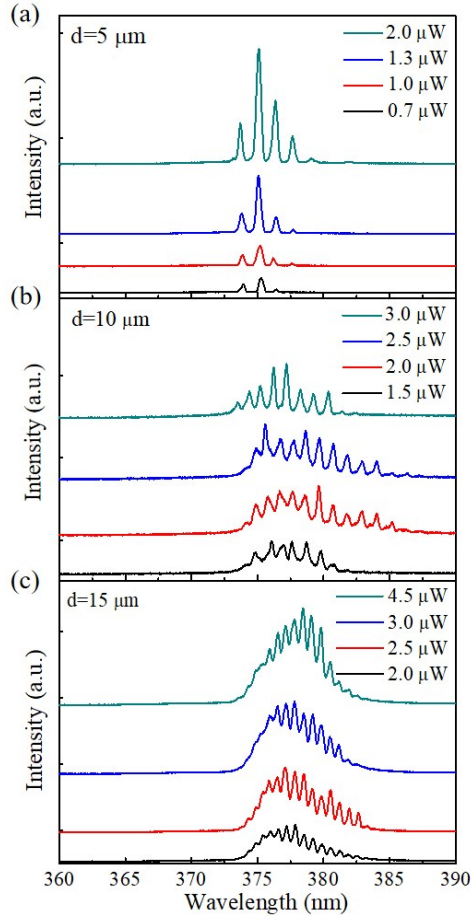


图2 不同直径悬浮 GaN 微盘在不同泵浦功率下的光致发光光谱。(a) $d=5\ \mu\text{m}$; (b) $d=10\ \mu\text{m}$; (c) $d=15\ \mu\text{m}$

Fig.2 Photoluminescence spectra of suspended GaN microdisks with different diameters under different pump powers. (a) $d=5\ \mu\text{m}$; (b) $d=10\ \mu\text{m}$; (c) $d=15\ \mu\text{m}$

发光强度增长过程存在差异。对于 $5\ \mu\text{m}$ 微盘, 发光强度在较低泵浦功率下即开始快速上升, 并在测试范围内达到三种直径中的最高水平; $10\ \mu\text{m}$ 微盘的发光强度在约 $1.0\ \mu\text{W}$ 之后逐渐增强, 但整体强度略低于 $5\ \mu\text{m}$ 微盘; $15\ \mu\text{m}$ 微盘在低泵浦功率下增长较为平缓, 随着泵浦功率提高才逐步增强, 激光强度处于三种直径中的较低水平。阈值和半高宽的分析显示, 不同直径悬浮微盘对泵浦功率的响应并不完全一致, 微盘直径会影响其发光增强过程。图 3(b) 给出了 FWHM 和模态数随微盘直径的变化规律, 数据均基于泵浦功率为 $2.0\ \mu\text{W}$ 时的 PL 光谱提取。随着微盘直径由 $5\ \mu\text{m}$ 增大至 $15\ \mu\text{m}$, FWHM 由 $0.42\ \text{nm}$ 减小至 $0.31\ \text{nm}$, 而模态数由约 5 个增加至约 14 个, 数量明显增加。

进一步分析不同尺寸微盘的谱线变化特征, 根据实验光谱中可分辨主谐振峰的 FWHM 及相

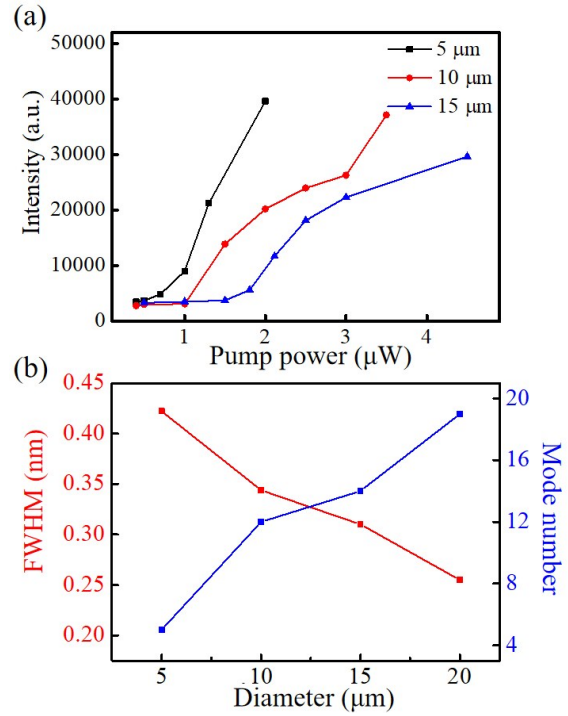


图3 不同直径悬浮 GaN 微盘的发光强度、FWHM 及模态数统计结果。(a) 发光强度随泵浦功率的变化; (b) FWHM 和模态数随微盘直径的变化

Fig.3 Statistical results of emission intensity, FWHM, and mode number for suspended GaN microdisks with different diameters. (a) Emission intensity as a function of pump power; (b) FWHM and mode number as functions of microdisk diameter

邻模式间隔, 计算不同直径微盘的精细度和 Q 因子, 结果如表 1 所示。其中, 精细度定义为 $F = \Delta\lambda_{\text{FSR}}/\Delta\lambda$, Q 因子定义为 $Q = \lambda/\Delta\lambda$, 其中 $\Delta\lambda$ 为谱线半高全宽, $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$ 为相邻谐振模式间隔。随着微盘直径增大, Q 因子由 893.36 增大至 1216.13, 说明较大尺寸微盘具有更高的等效品质因子和更窄的谱线宽度; 而精细度随直径增大而降低, 主要与大尺寸微盘中 FSR 减小、模式分布更加密集有关。

微盘尺寸变化还会影响阈值特征。对于较小直径微盘, 在相同泵浦光斑和泵浦功率下, 泵浦区域占腔体有效模式区域的比例更高, 因此有效激发效率较高, 更容易达到受激辐射所需的增益条件, 阈值较低。随着微盘直径增大, 腔体周长和有效模式体积增加, 固定泵浦光斑对应的相对激发区域减小, 同时光在腔内传播过程中更容易累积吸收、散射和非辐射复合等损耗, 因此需要更高泵浦功率来补偿腔内损耗并达到阈值条件。另一方面, 较小尺寸微盘虽然阈值较低, 但其边界曲率较大, 侧壁粗糙度、刻蚀损伤和边缘形貌偏差对

WGM传播损耗的相对影响更明显,使腔内光子寿命降低,因此表现出较宽的FWHM和较低的Q值。随着微盘直径增大,边界曲率减小,WGM沿圆周传播的稳定性增强,等效品质因子提高,因此FWHM减小。

表1 不同直径悬浮 GaN 微盘的精细度与 Q 因子比较
Table 1 Finesse and Q factor of suspended GaN microdisks with different diameters

微盘直径 d/ μm	FWHM/nm	精细度 F	品质因子 Q
5	0.42	4.426	893.36
10	0.34	2.715	1095.93
15	0.31	2.008	1216.13

综上,不同直径悬浮 GaN 微盘的光泵发光响应表现出明显的尺寸依赖性。随着微盘直径增大,腔体有效模式体积和周向光程增加,使阈值特征升高,同时在相近发光波段内可容纳更多谐振模式,导致可分辨发光峰数量增加、谱峰分布更加密集。结合FWHM、精细度和Q因子的变化可以看出,较大尺寸微盘具有更高的等效品质因子和更窄的谱线宽度。上述结果说明,微盘直径不仅影响光谱中的模式数量和峰间分布,也会通过改变模式体积、传播损耗和谐振条件调控微盘的阈值特征与谱线品质。为进一步确认激光峰与微盘腔WGM模式之间的关系,下面结合模式归属分析和空间模式分布仿真进行讨论。

3.2 WGM 空间模式及实验谱峰的模态归属分析

为明确激光模式来源,本文进一步开展了空间模式分布仿真,并结合实验谱峰的模态归属分析进行验证。其中,空间模式分布仿真则用于观察光场在微盘平面内的分布形态,从空间域角度验证其是否具有沿盘边传播和周向局域的WGM特征。模态归属分析用于比较实测激光峰与计算模式位置之间的对应关系,从频域角度判断谱峰是否满足微盘腔共振条件。两者结合可以更完整地分析不同直径微盘中离散多峰发光的物理来源。

空间模式分布仿真采用与实验样品一致的微盘直径和 GaN 厚度参数。由于各尺寸微盘的实验光谱均包含多个离散发光峰,仿真选取各尺寸样品主发光峰群附近的中心波长作为特征波长,用于展示不同直径微盘中的WGM光场分布。图4(a)-(c)分别对应 d=5 μm 、10 μm 和 15 μm 微盘在中心波长约为 375.0 nm、377.0 nm 和 378.0 nm 附

近的 WGM 模式,其对应特征频率约为 799.4 THz、795.2 THz 和 793.1 THz。从不同直径悬浮 GaN 微盘的俯视 WGM 光场强度分布仿真结果可以看出,光场主要集中于微盘边缘区域,并沿圆周方向呈现明显的周期性花瓣状强度分布,说明该模式具有典型的 WGM 边界局域特征。随着微盘直径由 5 μm 增大至 15 μm ,模式分布的周向周期结构也随之发生变化,表明微盘直径会影响腔内光场的空间分布特征。该结果从空间域上支持了不同直径悬浮 GaN 微盘中的发光模式具有沿微盘边缘传播并形成周向共振的特征。

为进一步判断实验光谱与微盘腔 WGM 共振

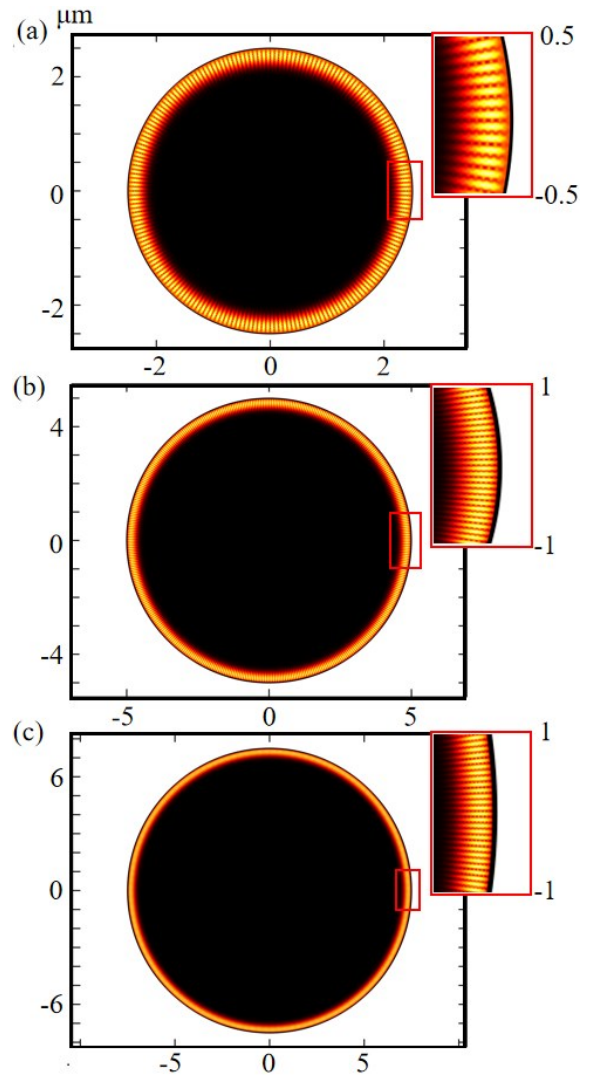


图4 不同直径悬浮 GaN 微盘的俯视 WGM 光场强度分布仿真图。(a) d=5 μm ; (b) d=10 μm ; (c) d=15 μm

Fig.4 Simulated top-view WGM optical-field intensity distributions of suspended GaN microdisks with different diameters. (a) d=5 μm ; (b) d=10 μm ; (c) d=15 μm

模式之间的对应关系,需要确定 GaN 在实验发光波段内的折射率,并据此估算不同直径微盘的理论模式位置。由于 GaN 在近紫外波段的折射率随波长变化较为明显,本文采用 TE 偏振下 GaN 的 Sellmeier 色散关系描述其折射率随波长的变化^[18],其表达式为:

$$n^2 = 3.60 + \frac{1.75\lambda^2}{\lambda^2 - 0.256^2} + \frac{4.1\lambda^2}{\lambda^2 - 17.86^2} \quad (1)$$

式中, λ 为入射光波长,单位为 μm ; n 为 GaN 在对应波长 λ 处的折射率。本文实验发光峰主要位于 370 – 380 nm 范围内,由此可得近紫外波段内 GaN 的折射率。需要指出的是,实际悬浮微盘中的 WGM 模式会受到有限厚度、边界形貌和局部应力分布等因素影响,因此本文将 Sellmeier 关系计算得到的 GaN 折射率作为模式归属中有效折射率 n_{eff} 的近似输入,用于分析实验谱峰与理论 WGM 模式位置之间的对应关系。

对于圆形微盘腔, WGM 可近似理解为光场沿微盘边缘传播,并在绕行一周后形成稳定谐振。其共振条件可表示为^[26]:

$$m\lambda \approx \pi D n_{\text{eff}} \quad (2)$$

其中, m 为 WGM 周向模式阶数, D 为微盘直径, n_{eff} 为该模式在对应波长附近的有效折射率, λ 为真空波长。根据式(2),在给定微盘直径和有效折射率的条件下,不同整数阶数 m 对应一系列理论共振波长。随着 D 增大,在相同发光波段内可满足相位匹配条件的整数阶模式数量增加,因此理论上应观察到更多可分辨的 WGM 激光模式。

将计算出的理论峰位置与实验光谱中的峰位进行对比。当实验峰位置与某一整数阶 WGM 模式位置接近,且空间模式仿真的光场局域于边缘呈周期性分布时,可将该实验谱峰归属为对应阶数 WGM 谐振模式。考虑到微盘制备过程中存在一定尺寸偏差,图 5 中给出仿真直径和实际直径对应的模式位置,用于比较微小尺寸变化对 WGM 模式位置的影响。可以看出 5 μm 微盘的实验谱峰与理论 WGM 模式位置具有较好的对应关系。结合支持信息中 10 μm 和 15 μm 微盘的结果可以看出,随着微盘直径增大,理论计算得到的模式分布更密集,实验光谱中的离散发光峰数量也随之增加。对于较小直径微盘,腔体周向光程较短,在相近发光波段内能够满足相位匹配条件的整数阶模式数量较少,因此实验峰数量较少,谱峰间隔相对较大;而当微盘直径增大后,腔体周长和有效光

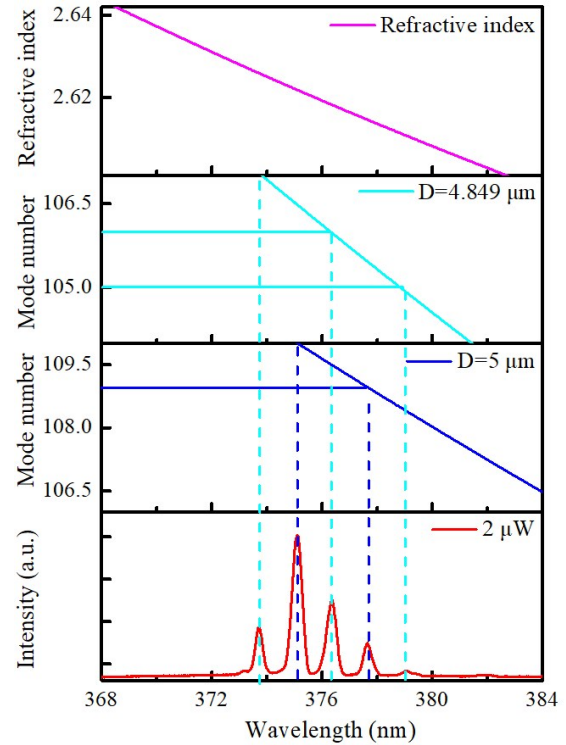


图5 直径 $d=5 \mu\text{m}$ 的悬浮 GaN 微盘实验谱峰模式归属分析

Fig.5 Mode assignment analysis of experimental spectral peaks for the suspended GaN microdisk with $d=5 \mu\text{m}$

程增加,在相同发光波段内可容纳更多整数阶 WGM 模式,因此实验谱线中可分辨的激光模式数增加,谱峰分布也更加密集。这些结果表明,实验谱峰与理论 WGM 模式位置之间具有较好的对应关系,且不同直径微盘中观察到的多峰发光与微盘腔内满足 WGM 周向相位匹配条件的特定模式密切相关。

综上,图 4 从空间域上表明光场主要局域于微盘边缘并呈周期性周向分布,图 5 从频域上证明实验谱峰与理论 WGM 模式位置具有较好对应关系。结合 Sellmeier 色散关系得到的 GaN 折射率和 WGM 周向相位匹配条件可知,随着微盘直径增大,腔体周向光程增加,在相同发光波段内可满足共振条件的模式阶数增多,从而导致可分辨峰数量增加、谱峰分布更加密集。上述结果支持离散多峰发光主要来源于微盘腔内 WGM 周向共振,也表明悬浮 GaN 微盘的光泵发光行为与微盘尺寸相关,为后续讨论悬浮 GaN 微盘结构中的应力分布及其对光谱响应的影响提供了依据。

3.3 不同直径悬浮 GaN 微盘的力学响应与光谱峰位变化

考虑到悬浮结构会改变器件的力学边界条

件,影响腔体的实际几何轮廓和有效光学路径,为比较不同直径悬浮 GaN 微盘在相同力学边界条件下的形变趋势,本文采用有限元方法对其面外位移和应力分布进行分析。有限元仿真采用 COMSOL Multiphysics 中的固体力学模块建立悬浮 GaN 微盘模型。模型由 GaN 圆盘和 Si 支撑柱组成, GaN 圆盘厚度为 $1.6\ \mu\text{m}$,微盘直径分别设为 $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 和 $15\ \mu\text{m}$ 。GaN 圆盘与 Si 支撑柱接触界面设置为连续连接,下支撑柱底面设置为固定约束,以模拟其与 Si 衬底连接后的支撑作用,其余外表面设为自由边界。材料参数采用 GaN 和 Si 的弹性模量、泊松比及密度,其中 GaN 的弹性模量、泊松比和密度分别取约 $300\ \text{GPa}$ 、 0.23 和 $6150\ \text{kg/m}^3$, Si 的弹性模量、泊松比和密度分别取约 $170\ \text{GPa}$ 、 0.28 和 $2330\ \text{kg/m}^3$ 。在相同边界条件和载荷设定下,对不同直径微盘的 z 向位移和应力分布进行比较。需要指出的是,实际器件中的应力状态可能同时受到外延残余应力、湿法释放过程和悬浮边界条件等因素影响,因此本文有限元分析的结果主要用于比较不同尺寸微盘的相对力学响应趋势。

图 6(a)给出了不同直径悬浮 GaN 微盘中心线沿 z 方向的位移分布。可以看出,各直径微盘均表现出一定程度 z 向位移变化,且随着微盘直径由 $5\ \mu\text{m}$ 增大至 $15\ \mu\text{m}$,位移幅度整体增大,其中 $15\ \mu\text{m}$ 微盘的形变最为明显。这说明在相同边界条件和载荷设定下,较大直径悬浮微盘由于横向直径和有效跨距增加,更容易表现出弯曲形变。图 6(b)进一步给出了不同直径微盘的应力变化情况。可以看出,最大应力和最小应力均随微盘直径增大而升高,其中 $5 - 10\ \mu\text{m}$ 区间变化相对较小,而 $10 - 15\ \mu\text{m}$ 区间增幅更加明显。图 6(c)给出了泵浦功率为 $2.0\ \mu\text{W}$ 时不同直径悬浮 GaN 微盘的归一化光谱响应对比。可以看出,不同直径微盘的谱峰位置并不完全重合,且随着微盘直径由 $5\ \mu\text{m}$ 增大至 $15\ \mu\text{m}$,光谱峰值中心整体向长波方向移动,即表现出红移现象。由于发光波长向长波方向移动对应发光能量降低,因此,随着微盘直径增大,样品的有效发光能量位置发生了变化。同时,不同直径样品的谱线形态也存在差异,说明微盘直径变化不仅影响光谱峰值中心位置,也会影响其整体光谱响应特征。

图 6 结果表明,随着微盘直径增大,悬浮区域

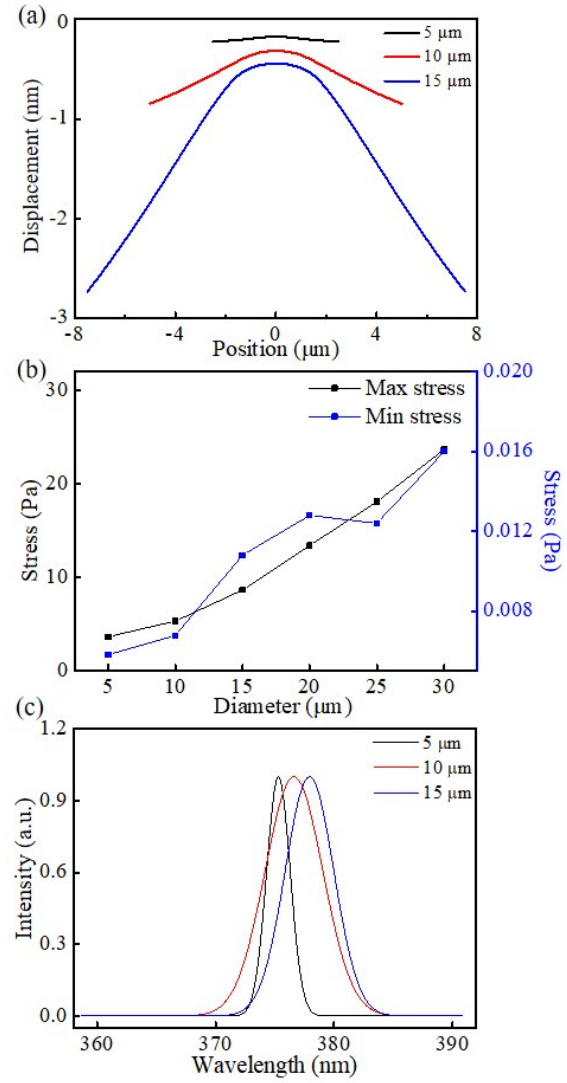


图 6 (a) 不同直径微盘中心线沿 z 方向的位移分布; (b) 最大应力和最小应力随微盘直径的变化; (c) 不同直径悬浮 GaN 微盘的归一化光谱响应对比,其中黑色、红色和蓝色曲线分别对应 $d=5\ \mu\text{m}$ 、 $d=10\ \mu\text{m}$ 与 $d=15\ \mu\text{m}$

Fig.6 (a) Center-line z -displacement of microdisks with different diameters; (b) Maximum and minimum stresses as a function of microdisk diameter; (c) Normalized spectra of suspended GaN microdisks, with black, red, and blue curves corresponding to $d=5\ \mu\text{m}$, $d=10\ \mu\text{m}$, and $d=15\ \mu\text{m}$, respectively.

横向跨距增加,盘面形变增强,悬浮结构中的应力水平升高。应力的增强会进一步影响 GaN 的能带结构和载流子复合过程,因此归一化光谱中的峰值中心随微盘直径增大产生红移。其原因在两方面:第一,应变会通过形变势效应调制能带结构,改变有效禁带宽度;第二, GaN 的极性晶体结构使其对应变较为敏感,应变诱导的压电极化场

变化也可能影响载流子复合能量。除尺寸相关应力变化外,局部热效应和载流子浓度变化也可能影响光谱峰位。结合前文图2中的结果,同一尺寸微盘在不同泵浦功率下的主发光峰位置变化较小,不足以解释图6(c)中不同尺寸微盘之间更明显的红移趋势。同时,GaN具有较高热导率,在本文微瓦量级光泵条件下,局部热积累成为主导因素的可能性相对较低。载流子浓度升高可能通过带隙重整化引起红移,但带填充效应和内建电场屏蔽通常会使发光峰向高能方向移动。如果载流子浓度效应占主导,随泵浦功率升高应观察到明显的功率依赖峰位移动,而图2中并未表现出该特征。因此,局部热效应和载流子浓度变化不足以解释本文中主发光峰随微盘直径增大而出现的系统性红移,尺寸相关应力变化是导致峰值红移的主要影响因素。

综上,悬浮结构的应力响应会对GaN回音壁微盘腔的光谱特性产生重要影响。有限元结果表明,随着微盘直径由5 μm 增大至15 μm ,盘面z向位移幅度和整体应力水平均逐渐升高,说明较大直径悬浮微盘在相同边界条件和载荷设定下更容易发生形变并表现出更高的应力水平。进一步结合归一化光谱响应可以看出,不同直径微盘的光谱峰值中心随直径增大整体向长波方向移动,表现出红移现象,提示悬浮结构中的尺寸相关应力变化可能是影响光谱峰值中心的重要因素之一。其原因在于,应力会改变GaN材料的晶格状态和能带结构,使有效禁带宽度发生变化,从而引起发光峰值中心移动。因此,不同直径悬浮GaN微盘的光谱差异不仅与直径变化引起的WGM共振条件改变有关,也与悬浮结构应力响应及其引起的能带变化有关。

4 结 论

本文研究了直径为5 μm 、10 μm 和15 μm 的悬浮GaN回音壁微盘腔中WGM光泵发光特性及应力相关光谱响应的尺寸依赖规律。结果表明,悬浮GaN微盘直径是影响WGM光谱和主发光峰位的重要结构参数,尺寸变化会改变腔体谐振光程和模式容纳能力,并引起悬浮结构的力学响应的变化,从而导致光谱漂移。随着微盘直径由5 μm 增大至15 μm ,各样品均表现出明显的离散多峰发光特征,且发光强度随泵浦功率增加而增强;同时,可分辨激光模式数量增加,谱峰分布更加密集,FWHM由0.42 nm减小至0.31 nm,说明增大微盘直径有利于提高WGM谱峰的可分辨性。空间模式分布仿真和实验的模式归属表明,理论计算得到的WGM模式位置与实验谱峰位置一致,表明离散发光峰主要来源于微盘边缘WGM周向共振。随着微盘直径增大,腔体周向相位匹配条件和有效光程发生变化,在相近发光波段内可容纳更多WGM周向模式,从而使激光模式数量增加、谱峰分布更加密集。归一化光谱结果显示,主发光峰中心波长随微盘直径增大整体向长波方向漂移。有限元分析表明,在相同边界条件和载荷设定下,悬浮微盘沿z方向的位移幅度和整体应力水平随直径增大而升高。有限元结果与归一化光谱结果共同表明,微盘尺寸增大引起的力学响应变化对应主发光峰红移。以上结果明确了微盘直径变化对WGM谱峰可分辨性和发光峰中心波长移动的影响规律,有助于理解悬浮GaN微盘中尺寸效应、WGM模式分布和应力相关光谱响应之间的关系,并可为光学传感应用中的谱峰识别、尺寸设计和光谱标定提供参考。

参 考 文 献:

- [1] LI K H, CHEUNG Y F, FU W Y, *et al.* Electrically injected whispering-gallery mode InGaN/GaN microdisks[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(10): 101106.
- [2] FENG M X, ZHAO H R, SUN Q, *et al.* Continuous-Wave Current Injected InGaN/GaN Microdisk Laser on Si(100)[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(7): 2208-2215.
- [3] GU P, YANG S, MA L L, *et al.* Flexible GaN-based ultraviolet microdisk lasers on PET substrate[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(15): 4117-4120.
- [4] LIU M S, ZHANG E W, DONG L, *et al.* Platinum nanoparticles engineered external-cavity-free single-mode microlasers beyond cavity-size and configuration constraints[J]. *Chip*, 2026, 5(2): 100180.
- [5] 刘启发,曹宇翼,黄远等. 片上微腔激光器发展概述[J]. *发光学报*, 2025, 46(12): 2241-2264. DOI: 10.37188/

- CJL. 20250166. CSTR: 32170. 14. CJL. 20250166.
- LIU Qifa, CAO Yuyi, HUANG Yuan, *et al.* Development Overview of On-chip Microcavity Lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(12): 2241-2264. DOI: 10.37188/CJL.20250166. CSTR: 32170. 14. CJL. 20250166.
- [6] 朱刚毅, 颜新悦, 叶鹏等. 硅基氧化锌微盘回音壁激光[J]. *发光学报*, 2025, 46(01): 12-22. DOI: 10.37188/CJL.20240242. CSTR: 32170. 14. CJL. 20240242.
- ZHU Gangyi, YAN Xinyue, YE Peng, *et al.* WGM Lasing from Toroid-shaped ZnO Microdisk Pivoted on Si[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(01): 12-22. DOI: 10.37188/CJL.20240242. CSTR: 32170. 14. CJL. 20240242.
- [7] 胡清波, 杨一秉, 童彬彬等. 基于一维光子晶体纳米束的外腔激光器光电设计[J]. *发光学报*, 2025, 46(12): 2353-2361. DOI: 10.37188/CJL.20250169. CSTR: 32170. 14. CJL. 20250169.
- HU Qingbo, YANG Yisu, TONG Binbin, *et al.* Optoelectronic Design of An External Cavity Laser Based on One-dimensional Photonic Crystal Nanobeam[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2025, 46(12): 2353-2361. DOI: 10.37188/CJL.20250169. CSTR: 32170. 14. CJL. 20250169.
- [8] FOREMAN M R, SWAIM J D, VOLLMER F. Whispering gallery mode sensors[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 168-240.
- [9] FU W Y, CHEUNG Y F, CHOI H W. Monolithic multi-wavelength lasing from multi-sized microdisk lasers[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(24): 6397-6400.
- [10] JIANG X F, QAVI A J, HUANG S H, YANG L. Whispering-gallery sensors[J]. *Matter*, 2020, 3(2): 371-392.
- [11] TOROPOV N, CABELLO G, SERRANO M P, *et al.* Review of biosensing with whispering-gallery mode lasers[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 42.
- [12] ZI H, FU W Y, TABATABA-VAKILI F, *et al.* Whispering-gallery mode InGaN microdisks on GaN substrates[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21280-21289.
- [13] ZI H, FU W Y, CHEUNG Y F, *et al.* Comparison of lasing characteristics of GaN microdisks with different structures[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55: 355107.
- [14] QIN F F, LU X Y, WANG X X, *et al.* On-chip warped three-dimensional InGaN/GaN quantum well diode with transceiver coexistence characters[J]. *Chip*, 2024, 3(4): 100115.
- [15] XU T, SHA S L, TANG K, *et al.* On-chip integrated plasmon-induced high-performance self-powered Pt/GaN ultraviolet photodetector[J]. *Chip*, 2024, 4(1): 100118.
- [16] ZHU G Y, QIU G Q, QIN F F, *et al.* Floating GaN micro wheel light emitting diodes[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(9): 1146-1152.
- [17] MEI Y, XIE M C, YANG T, *et al.* Improvement of the Emission Intensity of GaN-Based Micro-Light Emitting Diodes by a Suspended Structure[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(12): 3967-3973.
- [18] QIN F F, ZHU G Y, YANG J B, *et al.* Unidirectional single-mode lasing realization and temperature-induced mode switching in asymmetric GaN coupled cavities[J]. *Nanoscale*, 2022, 14: 1921-1928.
- [19] ZHU G Y, JI X, ZHANG Z F, *et al.* Electrically pumped optomechanical beam GaN-LED accelerometer based on the quantum-confined Stark effect[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(9): 1583-1591.
- [20] AHARONOVICH I, WOOLF A, RUSSELL K J, *et al.* Low threshold, room-temperature microdisk lasers in the blue spectral range[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(2): 021112.
- [21] ZHU G Y, LI J P, LI J T, *et al.* Single-mode ultraviolet whispering gallery mode lasing from a floating GaN microdisk[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 647-650.
- [22] ZHU G Y, TIAN M F, ALMOKHTAR M, *et al.* Whispering Gallery Mode Lasing Performance's Evolution of Floating GaN Microdisks Varying with Their Thickness[J]. *Chinese Physics Letters*, 2022, 39(12): 123401.
- [23] PENG Y Y, LU J F, PENG D F, *et al.* Dynamically modulated GaN whispering gallery lasing mode for strain sensor[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(42): 1905051.
- [24] CHEN L, ZHANG K, DONG J, *et al.* The piezotronic effect in InGaN/GaN quantum-well based microwire for ultrasensitive strain sensor[J]. *Nano Energy*, 2020, 72: 104660.
- [25] LIU T, LI D, HU H, *et al.* Piezo-phototronic effect in InGaN/GaN semi-floating micro-disk LED arrays[J]. *Nano Energy*, 2020, 67: 104218.

- [26] ZHANG X H, CHEUNG Y F, ZHANG Y Y, *et al.* Whispering-gallery mode lasing from optically free-standing InGaN microdisks[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(19): 5614-5617.



朱刚毅(1980—),男,河南洛阳人,博士,教授,硕士研究生导师,2013年于东南大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体微腔光电特性的研究。
E-mail: zhugangyi@njupt.edu.cn



雷明(1983—),男,博士,研究员,从事硅光陀螺,微光机电陀螺等新型惯性仪表研究。承担国家重点研发计划、基金委重点、北京市新兴专项等课题20余项,研究成果在无人机等多领域实现量产应用。
Email: 15210985670@163.com