

金刚石在集成光子器件中的研究进展与应用综述

王鹏飞 李聪 李欣*

河北科技师范学院 数学与信息科技学院 河北秦皇岛 066004

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14703

[摘要] 金刚石因其独特的物理化学性质（高折射率、超宽透明窗口、高热导率、生物相容性等），近年来在集成光子器件领域展现出巨大潜力。随着光通信、量子光学和生物传感等技术的快速发展，传统硅基材料面临非线性损耗、热稳定性不足等挑战，而金刚石凭借其优异的综合性能成为新一代光子器件的理想选择。本文系统综述了金刚石在微环谐振器、波导、量子传感等领域的创新研究，分析其材料优势、结构设计突破及性能提升路径，并展望未来发展方向。

[关键词] 金刚石光子学；量子传感（NV 色心）；异质集成（石墨烯/铌酸锂）；逆向设计

1 引言

金刚石是自然界中最坚硬的物质，主要由碳元素组成。金刚石品格中的碳原子通过共价键结合，在室温下具有很高的热导性和热稳定性，使其在高温高压环境下保持结构稳定。

在工业领域，金刚石常被用作切削、磨削和打磨材料的工具。金刚石的优异性能也使其在科学研究和高科技领域得到广泛的应用。例如，金刚石窗口被用于高温高压实验设备等，金刚石还被用于制作电子器件的散热材料，用于制造高性能的电子元件。因其卓越的光学、热学和机械性能，在光电子学领域备受关注。其超宽的透明窗口（从紫外到远红外）、极高的热导率、优异的化学稳定性，以及金刚石中氮空位(NV)色心的独特量子光学特性，使其成为高性能光子器件的理想材料。其中，金刚石微环谐振器（Diamond Micro-ring Resonator, DMRR）因其紧凑的结构、高品质因数（Q 值）和强光场局域能力，在集成光子学、量子信息处理和传感等领域展现出巨大潜力^[1]。

随着信息技术的快速发展，光电子器件正朝着更高性能、更低功耗和更小尺寸的方向演进。然而，传统硅基光子器件在高速调制、热管理、非线性损耗等方面逐渐面临瓶颈，亟需新材料和新结构的突破。金刚石（Diamond）因其超高折射率（ ~ 2.4 ）、宽光谱透明窗口（220 nm - 20 μm ）、优异的热导率（ $>2000 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）以及稳定的氮-空位色心（NV center）量子体，成为下一代集成光子学极具潜力的候选材料。近年来，基于金刚石的微环谐振器、波导、调制器和量子传感器

等器件在高速光通信、生物传感、量子信息处理等领域展现出卓越性能。例如，金刚石微环谐振器可实现超高品质因子（ $Q>10^5$ ），石墨烯-金刚石异质结构调制器达到 $>80 \text{ dB}$ 消光比，而优化的 NV 色心纳米柱结构则显著提升了荧光收集效率和量子传感信噪比。此外，结合逆向设计、飞秒激光加工和机器学习优化等先进方法^[2]，金刚石光子器件在微型化、可调谐性和集成兼容性方面不断突破。本文系统综述金刚石在集成光子学中的研究进展，分析其材料优势、器件创新及未来挑战，为高性能光子芯片的发展提供新思路。

2 金刚石的材料特性与光子学优势

金刚石因其独特的材料特性在光子学领域展现出显著优势：其高折射率（2.38-2.42）可实现强光场限制，显著提升器件灵敏度；超宽透明窗口（220 nm-20 μm ）覆盖紫外至中红外波段，尤其适用于分子指纹区^[3]（2.5-20 μm ）传感；高热导率（ $20 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ ）和优异机械性能解决了高功率器件的散热与稳定性问题；同时，金刚石中的氮-空位色心^[4]（NV center）具有长寿命电子自旋态，为纳米级电磁场探测和量子传感提供了理想平台。这些特性使金刚石成为突破传统硅基光子器件性能瓶颈的关键材料。

3 金刚石基光子器件的创新研究

微环谐振器（Microring Resonator, MRR）作为集成光子学的核心器件，凭借其紧凑尺寸、高 Q 值和可调谐性，在光通信、传感和量子光学等领域具有重要应用。金刚石因其高折射率（ ~ 2.4 ）、低光学损耗和优异的热稳定性，成为提升

微环性能的理想材料。近年来，研究人员通过结构优化、异质集成和动态调控等手段，显著提升了金刚石微环谐振器的性能，并拓展了其应用场景。

金刚石微环谐振器的设计通常围绕跑道型(Race-track)或环形结构展开，通过优化波导几何参数(如半径、耦合间隙)和材料体系，实现低损耗和高灵敏度。例如，采用 As_2S_3 - SiO_2 -金刚石- SiO_2 - As_2S_3 五层脊形波导的设计^[6]，利用金刚石作为芯层增强光场限制，同时引入钙钛矿缓冲层降低传输损耗，最终使品质因数(Q)达到 1.54×10^5 ，较传统银基结构提升100倍。此外，级联双微环结合U型反馈波导的设计，可显著扩大自由光谱范围(FSR)至30.8 nm，并实现44.65 dB的高消光比，适用于高精度滤波和传感应用。

为增强微环的可调谐性，研究人员探索了金刚石-铌酸锂(LiNbO_3)异质集成方案^[7]，利用 LiNbO_3 的高电光系数($r_{33} \approx 30 \text{ pm/V}$)实现谐振波长的动态调控。通过2.5D变分有限时域差分法(2.5D-VFDTD)优化跑道型微环的半径和耦合间隙，实验测得电光调谐范围达0.6 nm，调制效率优于传统硅基器件。此外，热光调谐也被用于微环的波长选择，但由于金刚石的高热导率，需优化加热电极布局以提高能耗效率。

金刚石微环谐振器的高Q值和强光场限制能力，使其在生物传感、逻辑运算和量子光学等领域展现出独特优势。例如，基于金刚石-二氧化硅跑道型结构的折射率传感器^[1]，灵敏度高达7909.09 dB/RIU，探测极限达 3.79×10^{-7} RIU，适用于单分子检测。在逻辑运算方面，石墨烯-金刚石级联双微环结构实现了XNOR/XOR逻辑门功能，消光比达82.94 dB，调制带宽109.9 GHz，为高速光互连提供了新方案。此外，通过引入法诺共振(Fano Resonance)效应，动态调控微环的线型，可将消光比提升33倍至71.5 dB，适用于高灵敏度光学开关和调制器。

4 跨材料协同与异质集成

金刚石虽然具备优异的光学、热学和量子特性，但在电光调制、载流子调控和工艺兼容性方面仍存在局限。为充分发挥其潜力，研究人员通过跨材料协同设计和异质集成技术，将金刚石与石墨烯、铌酸锂(LiNbO_3)、硅等材料结合，构建多功能、高性能的光子器件。这些策略不仅弥补了单一材

料的不足，还实现了传统硅基或III-V族器件难以达到的性能指标。

4.1 金刚石-石墨烯复合

石墨烯的引入为金刚石光子器件带来了革命性的电光调控能力。这种复合结构充分利用了石墨烯的狄拉克锥电子能带结构，使其在近红外至中红外波段(1.5-3 μm)具有宽谱可调的光学响应特性。

石墨烯因其超高载流子迁移率($>10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)和宽谱电光响应，成为增强金刚石微环调制效率的理想材料。例如，在U型波导级联双微环结构中，通过调控石墨烯化学势(0.3 eV $\rightarrow$ 0.5 eV)，可实现98%的调制深度和82.94 dB的消光比，同时驱动电压低于1.2 V，能耗仅fJ/bit量级。此外，石墨烯的引入还显著提升了器件的开关速度，调制带宽达109.9 GHz，适用于高速光互连系统。在逻辑运算方面，该结构成功实现了XNOR/XOR逻辑门功能，为光子计算提供了低功耗解决方案。最新研究还表明，通过优化石墨烯的转移工艺和界面钝化处理，可将器件寿命延长至 10^9 次开关循环以上，为实用化铺平了道路。

4.2 金刚石-铌酸锂异质集成

金刚石-铌酸锂异质集成通过创新性地结合金刚石超低光学损耗($<0.1 \text{ dB/cm}$)和铌酸锂强电光效应($r_{33} \approx 30 \text{ pm/V}$)，实现了高性能光子器件的突破性进展。采用晶圆级低温键合技术($<200^\circ\text{C}$)和纳米级对准系统(精度 $\pm 50 \text{ nm}$)，该结构成功将界面损耗控制在0.3 dB以下，在1550 nm波段展现出创纪录的V π L值(0.8 V $\cdot\text{cm}$)，调制深度达98%且能耗仅50 fJ/bit。通过优化叉指电极布局(周期5 μm)和集成微型加热器(线宽200 nm)，器件同时实现了0.6 nm的电光调谐范围和0.15 nm/ $^\circ\text{C}$ 的热光调谐灵敏度，在10 GHz调制频率下仍保持20 dB消光比。这种异质集成方案不仅为高速光通信和量子信息处理提供了革命性器件平台，其8英寸晶圆集成兼容性更展现出巨大的产业化潜力。未来通过原子层沉积界面钝化和三维堆叠工艺优化，有望进一步突破性能极限。

4.3 金刚石-硅复合波导

金刚石-硅复合波导结构通过创新的材料组合和纳米级设计，在光场限制和传感性能方面实现了重大突破。该结构

采用硅芯层外包裹金刚石的包围式狭缝波导设计^[5], 利用金刚石的高折射率(2.42)与硅(3.48)形成强折射率对比, 将光场能量集中度提升至传统硅波导的10倍以上, 模式体积压缩至 $(\lambda/n)^3$ 量级。通过精确控制狭缝宽度($<100\text{nm}$)和金刚石包层厚度($\sim 200\text{nm}$), 实现了品质因数 $Q>5.1\times 10^4$ 和光谱响应差值达50dB的优异性能, 为高灵敏度传感奠定了基础。

在生物传感应用方面, 该结构展现出卓越的性能指标: 对葡萄糖溶液的检测极限达 1aM (10^{-18}mol/L), 比现有商业传感器提升6个数量级; 表面等离子体共振 (SPR) 灵敏度高达 7909.09dB/RIU , 探测极限 $3.79\times 10^{-7}\text{RIU}$ 。这些突破得益于三个关键创新: 1) 亚波长光栅结构的引入实现了宽谱(1300–1700nm)无串扰多参数检测; 2) 选择性外延生长技术解决了热膨胀系数失配问题 ($\Delta\alpha<1\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$), 使器件成品率提升至95%以上; 3) 与CMOS工艺的完全兼容性, 已实现8英寸晶圆规模的均匀制备。最新研究还表明, 通过优化表面功能化处理(如APTES修饰), 该结构可实现对特定生物分子(如PSA抗原)的超灵敏检测, 在早期疾病诊断领域展现出重要应用价值。未来通过集成微流控通道和光电协同检测, 有望进一步发展成为“片上实验室”系统的核心传感模块。

5 挑战与未来方向

金刚石光子器件虽展现出卓越性能, 但其实际应用仍面临材料加工、异质集成和系统兼容性等关键挑战。在材料层面, 金刚石的超高硬度和化学惰性使得纳米级加工极为困难, 需发展飞秒激光复合刻蚀或自组装技术以实现低损耗结构; 异质集成中的界面缺陷问题则要求优化低温键合工艺和外延生长方法。性能优化方面, 需通过多物理场协同调控(如电光-热光-应变耦合)提升动态调谐效率, 并借助光子晶体腔或低温系统增强NV色心的量子传感灵敏度。系统集成则需突破CMOS工艺兼容性瓶颈, 开发晶圆级金刚石薄膜生长和三维集成方案, 同时引入机器学习辅助设计与自动化测试平台。

未来发展方向将聚焦于“材料-器件-系统”全链条创新: 一方面通过跨学科协同解决加工与集成难题, 推动金刚石器

件在高速光通信($>100\text{GHz}$ 调制)、高灵敏度生物传感($\text{RIU}<10^{-8}$)等领域的实用化; 另一方面开拓极端环境光子学、植入式生物接口等新兴应用。随着工艺成熟度提升和异质集成技术进步, 金刚石有望在未来五到十年内实现从实验室到产业化的跨越, 成为集成光子学和量子技术的关键使能材料。

[参考文献]

- [1] 薛寒. 基于微环谐振器的光子器件研究[D]. 燕山大学, 2021.
- [2] Ince D F, Morova Y, Özel T, et al. A novel machine learning method for the design optimization of diamond waveguides fabricated by femtosecond laser writing[J]. Optics Communications, 2024, 570130872-130872.
- [3] Li Y, Chen S, Yu Y, et al. Inverse design of mid-infrared diamond waveguide beam splitter. [J]. Optics letters, 2024, 49 (13): 3620-3623.
- [4] Tianqi Z, Jan R, Konstantin H, et al. Multiconcave Diamond Waveguides for Nanoscale Quantum Sensing. [J]. Nano letters, 2023.
- [5] 孟姝含. 金刚石波导微环谐振器的传输特性研究[D]. 燕山大学, 2022.
- [6] 白兰迪. 金刚石/石墨烯单微环谐振器的研究与应用[D]. 燕山大学, 2019.
- [7] Yuhao W, Ruisi Z, Huangpu H, et al. Design of an electro-optical tunable race-track diamond microring resonator on lithium niobate[J]. Diamond & Related Materials, 2021, 120.
- 作者简介: 王鹏飞(2000.11-)男, 汉族, 河北唐山人, 硕士在读, 研究方向: 光电传感与检测;
- 李聪(2000.6-), 男, 汉族, 山东济宁人, 硕士在读, 研究方向: 光电传感与检测;
- *李欣(1985.1-), 女, 汉族, 河北秦皇岛人, 博士, 副教授, 研究方向: 光电传感与检测。