

文章编号: 1000-7032(2024)09-1488-15

基于六方氮化硼的确定性量子光源研究进展

吴欣瑜^{1,2}, 刘冠麟^{1,2}, 景鹏涛^{1*}, 刘 雷¹, 申德振¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 量子光源是量子信息科学技术的基石, 对于推动光量子科技的进步至关重要。高效、稳定且易于获得的单光子源的实现是促进相关技术发展的关键。目前, 六方氮化硼中的单光子源因其高亮度和优异的室温光学稳定性而备受关注。本文概述了六方氮化硼中单光子源的研究现状和物理特性, 详细介绍了在六方氮化硼中实现精确定位单光子源的各种制备技术; 并探讨了基于六方氮化硼的单光子源在不同应用领域的应用, 如与光学微腔和波导的耦合以及通过外部电场或应力对它们的调制。最后, 总结了六方氮化硼中单光子源所面临的机遇和挑战, 并讨论了目前正在探索的研究方向以及未来的新可能性。

关 键 词: 二维材料; 六方氮化硼; 固态单光子源; 量子光子学

中图分类号: O431.2; O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240129

Research Progress of Deterministic Quantum Light Source Based on Hexagonal Boron Nitride

WU Xinyu^{1,2}, LIU Guanlin^{1,2}, JING Pengtao^{1*}, LIU Lei¹, SHEN Dezhen¹

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: jingpt@ciomp.ac.cn

Abstract: Quantum emitter, the cornerstone of quantum information science and technology, is essential for advancing light quantum science and technology. The realization of efficient, stable and easily accessible single photon sources is the key to promote the development of related technologies. Currently, single-photon sources in hexagonal boron nitride (h-BN) have attracted much attention due to their high brightness and excellent room-temperature optical stability. This paper outlines the current research status and physical properties of single-photon sources in h-BN, details various preparation techniques for realizing precisely localized single-photon sources in h-BN, and explores the application of single-photon sources based on h-BN in different applications, such as coupling with optical microcavities and waveguides, and their modulation by external electric fields or stresses. Finally, the paper summarizes the opportunities and challenges facing single photon sources in hexagonal boron nitride and discusses the research directions currently being explored as well as new possibilities for the future.

Key words: two-dimensional materials; hexagonal boron nitride; solid-state single photon source; quantum photonics

1 引 言

量子信息科学技术以量子比特(qubit)作为基本单位, 与只能处于 0 或 1 两种确定状态的经典比特不同, 量子比特是一个双量子态系统, 能够处

于两个状态的量子叠加态。量子比特作为量子信息的最基本单元, 主要应用于量子计算机、量子通讯、量子传感等领域^[1]。光学量子比特作为飞行量子比特, 因其光速传播、高维度操作、长相干时间以及与集成技术的兼容性等优点, 成为量子通

收稿日期: 2024-05-09; 修订日期: 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(11727902)

Supported by National Natural Science Foundation of China(11727902)

信和量子计算的理想选择。单光子源(Single photon emitter, SPE)作为一种重要的量子光源(Quantum emitter),是光量子信号产生、编码、调制、存储、传输等技术的基础,是推动光量子技术发展的关键部分。高效率、稳定可靠且易获得的单光子源的制备是限制相关技术发展的瓶颈之一。因此,深入研究高质量的单光子源的制备具有重要意义。目前,实现单光子态的主要方法包括利用非线性晶体中的自发参量下转换过程^[2],以及基于不同原子或类原子能级的双能级系统中自发辐射产生的单光子发射^[3-8]。其中,单原子^[3]、单分子^[4]、金刚石色心^[5]、二维材料缺陷态^[6-7]和半导体量子点(QDs)^[8-9]等固态量子光源在可控制备和性能优化方面已取得了一定的进展。金刚石氮空位(NV)色心已成为量子传感应用中最广泛使用的固态量子光源,它对多个物理变量表现出卓越的稳定性和敏感性^[10-12]。然而,金刚石表面的悬挂键引起的表面电荷和自旋噪声限制了其表面高质量NV色心的制备,进一步限制了金刚石NV色心在量子科技中的应用。

二维材料,如过渡金属二硫属化物(WSe₂、WS₂、MoS₂)和六方氮化硼(h-BN),为量子光源的发展提供了新的可能性。二维材料表面不存在悬挂键,因此有望成为比块状材料更好的单光子发射源承载介质。在过渡金属二硫属化物^[13-17]和h-BN^[6]等二维薄层半导体材料中,已经观察到点缺陷的单光子发射现象。在过渡金属二硫属化物中,量子缺陷的存在归因于局域化的弱束缚激子、自由载流子或其他类型的缺陷,这些缺陷仅在低温下表现出单光子发射特性。而在h-BN中,与深带隙相关的缺陷单光子源允许在室温下产生明亮的单光子源(图1(a))^[6],从而引起了广泛的关注。h-BN,亦称为“白色石墨烯”,拥有类似石墨烯的层状晶体结构(图1(b))。在这些层中,B原子和N原子通过sp²杂化形成了高度极化的B—N共价键。B原子和N原子周期性地交替排列在平面内,层与层之间则通过范德华力结合。h-BN具有宽带隙(约为6 eV),使其在可见光范围内完全透明。得益于h-BN独特的光学特性组合,以及其在纳米光子学领域的新兴应用潜力,相关研究正在

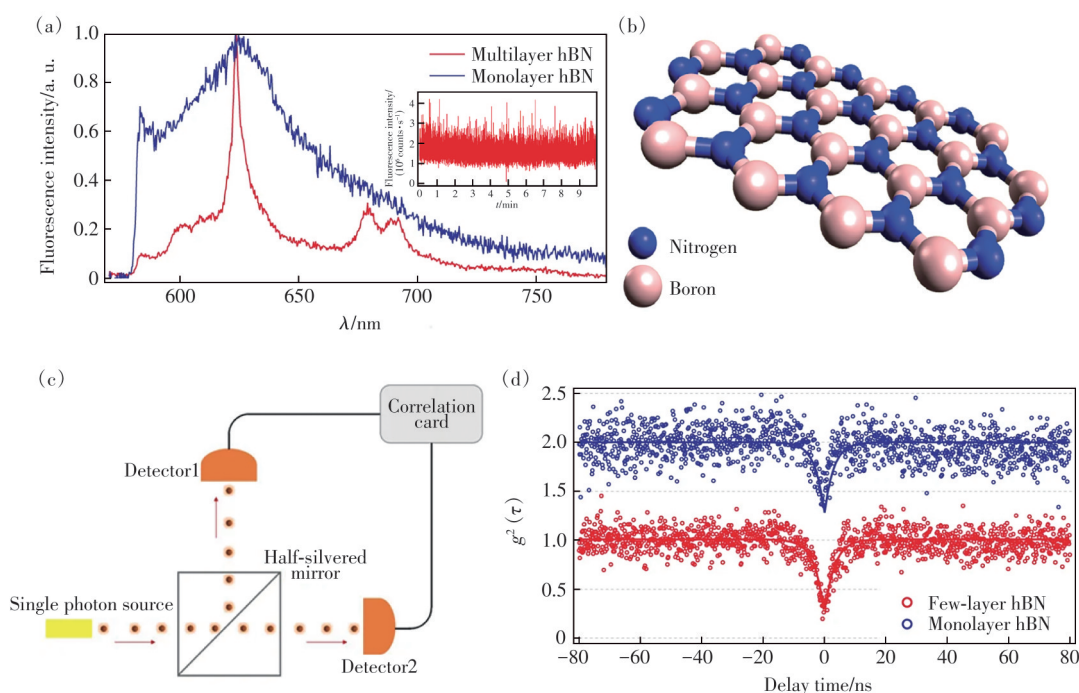


图1 (a)h-BN单层(蓝色)和多层(红色)缺陷中心室温下的光致发光光谱,插图为多层缺陷中心的荧光强度随时间变化轨迹^[6]; (b)h-BN晶体结构^[6]; (c)HBT干涉仪检测原理图^[18]; (d)h-BN单层(蓝色空心圆圈)和多层(红色空心圆圈)中缺陷中心的反聚束曲线,对应于(a)中所示的光谱^[6]

Fig.1 (a)Photoluminescence spectra of h-BN single(blue) and multilayer(red) defect centers at room temperature, and the inset shows the trajectory of the fluorescence intensity of the multilayer defect centers *versus* time^[6]. (b)Crystal structure of h-BN^[6]. (c) HBT interferometer detection schematic^[18]. (d) Anti-bunching curves of defect centers in h-BN monolayer (blue hollow circles) and multilayer(red hollow circles) corresponding to the spectra shown in (a)^[6]

迅速发展。

虽然已经报道了许多关于二维材料中单光子源的制备、光学性质方面的综述^[19-20],但很少有人系统地综述 h-BN 中确定性单光子源加工制备及器件应用方面的进展。本综述回顾了近期关于 h-BN 中单光子源的位置可控制备、性能调控和应用的研究进展。首先探讨了在 h-BN 中利用微纳加工技术位置可控地制备 SPE 的方法,如模版法^[21-22]、纳米压痕法^[23]、飞秒激光加工^[24-25]、电子束辐照^[26-29]以及聚焦离子束(FIB)技术^[30-31]等。而后介绍了 h-BN 中的 SPE 与金属纳米结构^[32-34]、光子晶体腔^[35-38]和波导^[39-42]等集成应用研究。此外,还介绍了外场调控单光子发光性能研究^[43-48]。最后,总结了 h-BN 中量子光源面临的机遇和挑战,并对其未来发展进行了展望。

2 六方氮化硼中位置可控单光子源制备方法

单光子源是指能够在预定时刻产生并发射单个光子。在理想情况下,如果激发光焦点内仅有单个发射器,其在激发-发射过程中将只会发射一个光子。单光子纯度是判断 SPE 的关键参数。单光子纯度指的是光子源发射的光子中,单个光子事件的比例。实验中,通常使用汉伯里-布朗和特维斯(HBT)干涉仪来测量发射器发出的光子间的时间相关性,如图 1(c)所示,通过观察两个光子探测器的信号时间差,可以区分单个光子和多个光子事件。如果光子源的单光子纯度很高,那么在两个探测器记录的信号中,将很少出现同时有两个或多个光子事件的情况,测得二阶关联函数在 $\tau=0$ 处的相关性值应低于 0.5(图 1(d)),符合 SPE 光子发射的亚泊松分布。

为了在 h-BN 中引入与单光子发射相关的点缺陷,人们应用了多种方法,例如热退火^[6,49]、化学或等离子蚀刻^[50-53]、CVD 生长^[54-56]等。然而,通过上述方法制备的单光子发射源的位置是随机分布的,这限制了相关器件的发展。为了将单光子源精准地集成到器件中,亟需开发一种能够在 h-BN 中定位产生单光子发射源的技术。本节将介绍在 h-BN 中实现位置可控的单光子源的制备方法,包括:预制的纳米柱阵列上^[21-22]、原子力显微镜(AFM)进行纳米压印^[23]、飞秒激光直写^[24-25]、电子束^[26-29]以及聚焦离子束加工^[30-31,57]。这些技术的应

用使得在 h-BN 中制备出位置可控的单光子发射器阵列成为可能,为量子技术的发展提供了一个可寻址和可调控平台。

2.1 模版法

模版法是一种常见的利用纳米结构制备 SPE 的方法。通过利用模板在所需位置上限制材料的生长,或是将材料转移到特定模版上的方式,在材料表面形成所需的纳米结构。通过选择合适的模板和材料,可以制备出各种形状和尺寸的纳米结构,包括纳米线、纳米柱、纳米孔等。模版法具有制备简单、成本较低、适用范围广等优点,因此在纳米科学和纳米技术领域得到了广泛应用。

2018 年,Proscia 等^[21]通过在 SiO₂ 纳米柱阵列上覆盖 20 nm 厚的 h-BN 薄膜的方式,成功激活了 h-BN 中的点缺陷,形成了室温下的单光子发射阵列。发射阵列与纳米柱的位置一一对应,这一现象表明缺陷激活与局部应变相关,而非随机产生。纳米柱直径越小,单光子发射源的密度越高。直径为 75 nm 的纳米柱,平均每个柱子约有 2 个单光子源。结合模型分析可知,缺陷的激活机制归因于载流子在由薄膜最大曲率处(纳米柱边缘)形成的应变势阱中的俘获现象。与之类似,Li 等^[22]通过在 SiO₂ 纳米柱上生长 h-BN 的方式,成功制备出大规模单光子源阵列,如图 2(a)所示。该研究发现纳米柱直径对单光子源形成至关重要,直径为 250 nm 柱上单光子源的产率最高。这些单光子源表现出明显的单光子发射特性,其二阶关联函数 $g^{(2)}(0) < 0.5$,谱线宽度约为 170 meV,寿命在 3~7 ns 范围内。并且大多数单光子源表现出稳定的发射状态,无明显的闪烁现象。SiO₂ 纳米柱阵列提供了一种位置可控且可扩展的单光子发射阵列制备方法,为实现单光子发射与纳米光子器件的集成提供了重要基础。

2.2 纳米压印法

纳米压痕技术依托于原子力显微镜或类似高灵敏度的机械探针装置,能够在精细调控探针与样本表面接触的条件下,执行微调的位移操作,进而开展对材料微区进行纳米量级力学形变的深度探索。AFM 纳米压痕技术的独特之处在于其能够精确施加载荷并实时监控力值的变化,极大促进了科学家对材料力学性能及表面形态特征的深入了解,并且能针对材料表面制造出预期尺寸的微小凹陷结构。这一技术广泛应用于材料表面微

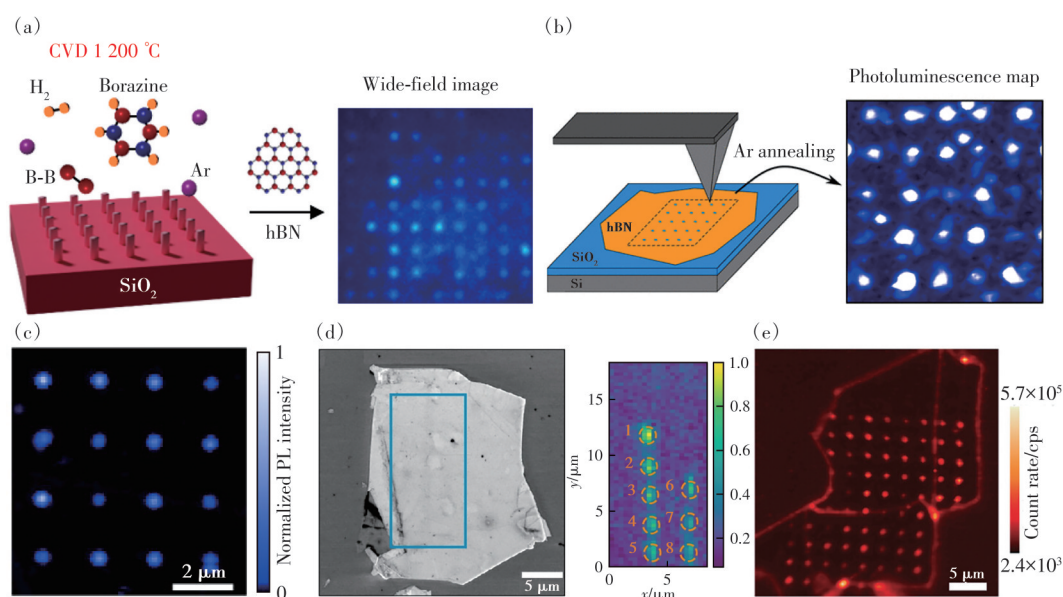


图2 (a)SiO₂纳米柱^[22]; (b)AFM针尖造成的纳米压印^[23]; (c)飞秒激光直写^[25]; (d)电子束辐照^[27]; (e)聚焦离子束辐照^[31]
Fig.2 (a) SiO₂ nanorods^[22]. (b) Nanoimprint by AFM tip^[23]. (c) Femtosecond laser^[25]. (d) Electron beam irradiation^[27]. (e) Focused ion beam^[31]

结构的精细加工及特定区域性质的激活研究中。

Xu等研究人员运用原子力显微镜纳米压印技术,在二维材料h-BN薄片上精确定位并激活了室温单光子发射源^[23],如图2(b)所示。实验中,他们通过调整AFM探针的最大垂直下压位移量,成功制备出了一系列横向尺寸从200 nm至750 nm不等的压痕结构。随后采用氩气退火处理后,发现在h-BN样品上压痕对应的位置出现了明亮的发光现象,经过光谱分析验证,这些发光点被确认为室温条件下的单光子发射源。进一步的研究揭示,通过调控压痕尺寸,单光子发射源的数量随着压痕尺寸的增大而显著提升,其中在400 nm左右的压痕尺寸条件下,实现了最大约36%的发射源产率;且这些发射源的波长分布集中在580~630 nm之间,其辐射寿命主要位于1.17~7.88 ns这一范围,平均寿命约为3.86 ns。该方法摒弃了传统的光刻或其他图案化步骤,有效避免了因制造过程可能带来的荧光污染问题。

2.3 飞秒激光直写

近年来,飞秒激光技术因其独特的超短脉冲属性,在h-BN单光子发射源的精密制备中扮演了核心角色。飞秒激光脉冲的极端短暂持续时间——以飞秒量级计量,保证了其与材料间发生的高强度、高度局域化的非热交互作用,这种作用几乎完全抑制了热效应扩散,从而有效地避开了对目标结构周边材料的热破坏,并确保了生成的

缺陷区域边界清晰且界定明确。这一特性对于构建具备极高效率单光子发射特性的微结构至关重要。得益于其无可比拟的超强非线性光学效应潜能,飞秒激光能够诱导材料内部产生超越传统光学衍射极限的细微结构,进而实现对微米甚至亚微米级别的超高精度加工,展现出非凡的空间解析能力。通过调控激光脉冲的数量、能量密度、重复频率等关键参数,飞秒激光技术能够在材料的微观结构层面进行精细规划与定制化构建,从而推进了单光子源以及其他微纳光学元件的研究与开发,并促进相关实际应用的广泛开展。

2022年,Gan等^[24]使用飞秒激光脉冲对h-BN材料进行单脉冲照射,成功地在室温条件下实现了大规模制备高质量单光子发射器。他们发现,使用单脉冲飞秒激光制备不同尺寸的缺陷结构,随着激光脉冲能量的增加,缺陷结构的尺寸呈现出线性增加的趋势。特别是当激光脉冲能量高于37 nJ时,会在材料中产生明显的孔洞结构。经过紫外臭氧清洗和900 °C退火处理后,这些缺陷结构产生明亮的发光,其中3.0 μm的缺陷结构具有最高的单光子发射源产量,达到了42.9%。这些缺陷结构的发光峰位于540.97 nm、556.22 nm和586.46 nm,与h-BN发光中心的零声子线相匹配,亮度最高可达7.15 Mcps。研究推测,这些发光中心可能为氧相关的空位复合体缺陷,而900 °C退火处理1 h有助于形成稳定的B-N-O复合体。为

了进一步优化定位精度,2024年,Wang等^[25]使用阈值追踪和锁相技术实现了接近原子尺度的激光制造,达到了小于5 nm的特征尺寸,接近量子不确定性极限,如图2(c)所示。该技术被用于h-BN中确定性生成单原子缺陷复合体(SADC),实现了单色中心的确定性生成,从而将h-BN色心的产率从随机性转变为确定性。所得到的色心阵列表现出高亮度、高发射纯度和高稳定性,并且每个点仅形成一个单色中心,实现了接近100%的产率和高位置精度。

2.4 电子束辐照法

电子束辐照技术将电子枪产生的电子通过加速和聚焦后形成细束流,迅速冲击到工件表面的微小区域。在短暂的时间内,电子束的能量大部分转化为热能,导致工件局部温度升高至数千摄氏度,从而引起材料局部熔化或蒸发,实现对材料的去除。这一加工过程不仅在材料中引入的缺陷较少,而且对周围材料造成的损伤较小,保持了材料的完整性。此外,电子束技术还具备精确控制发射器位置的能力,无需额外的扫描定位步骤,从而大大提高了加工精度和效率。

Choi^[58]、Tran^[26]和Duong^[59]等的早期工作已经证明了电子辐照可以增加单光子发射器形成概率。2021年,Fournier等^[27]利用电子束成功激活了h-BN样品中的单光子源(图2(d)),并在特定位置实现了精确激活。这些单光子源的位置精度达到了亚微米级,其光谱分布宽度仅为3 meV,表现出了极高的均一性,实现了对SPE发射波长的精确控制。此外,这些单光子源具有高饱和发射速率、稳定的发射线宽度和寿命,以及显著的反聚束效应。2022年,Gale等^[28]同样采用电子束辐照技术在h-BN薄膜上制备出蓝色光波长范围内单光子发射器,其零声子线位于436 nm (2.8 eV)。在光激发下,单个发射器的激发态寿命约为1.85 ns。通过控制电子束辐照剂量,研究者能够有效地控制发射器的发光强度,且强度与电子束剂量呈线性关系。此外,经过高温退火预处理后,其单光子生成效率得到了提升。研究还发现,h-BN中是否存在305 nm (4.1 eV)的紫外发光缺陷与制造蓝色发射器的效率密切相关。只有当h-BN薄片中存在305 nm (4.1 eV)紫外发射时,才能产生单光子发射。通过建模分析发现C₆C_N碳二聚体可能是305 nm发射的来源,这表明蓝色光波长范围

内单光子发射与碳相关的缺陷有关。2023年,Kumar等^[29]使用聚焦电子束辐射的方法成功制备出具有可重复发射波长的黄色光波长范围内单光子发射器阵列。该方法避免了对h-BN进行预处理或后处理的需求,并且发射器的波长稳定在575 nm, $g^{(2)}(0)$ 值低于0.5,发射寿命约为3.8 ns。密度泛函理论计算结果表明,黄色光波长范围内单光子发射可能来源于C₆C_NC₆C_N和C_NV_N两种碳相关缺陷,其中C₆C_NC₆C_N缺陷更有可能是黄色光波长范围内单光子发射的来源。这些研究成果不仅展示了电子束辐照技术在精确制备单光子发射器方面的潜力,而且揭示了碳相关缺陷在单光子发射过程中的作用。

2.5 聚焦离子束辐照法

聚焦离子束是一种先进的纳米加工和微纳尺度分析技术,通过将高能离子聚焦成极小的束斑,实现对材料进行精确切割、沉积、注入或表面改性等操作。FIB与电子束辐照加工原理相似,但在实际操作中存在一些关键差异。离子由于其较大的质量,在电场中加速到较高速度所需的时间更长,但一旦达到这一速度,它们将拥有更大的撞击动能,这使得FIB技术能够通过微观的机械撞击实现对工件的精细加工。在二维h-BN材料加工中,FIB能够以极高的精度引入特定的缺陷,这些缺陷可作为色心,进而产生稳定的单光子发射。

2019年,Ziegler等^[30]首次使用聚焦镓离子束(Ga⁺)对h-BN薄膜进行图案化铣孔,得到的孔洞直径约为500 nm。经过热退火处理,研究者在圆孔边缘处成功观察到了单光子发射现象,通过优化FIB参数,将单光子发射源的产量提升至31%。为了进一步优化加工精度,Liu等^[31]使用聚焦氦离子束(He⁺ FIB)在h-BN表面制造位置可控的缺陷点阵,如图2(e)所示,随后在氧气氛围下对样品进行热退火处理,使这些点缺陷转变为具有明亮的单光子发射特性的单光子发射器。通过优化实验条件,例如氦离子剂量和退火温度等,成功制备出定位精度小于50 nm、产率高于35%的单光子发射器,其发光亮度可达每秒 3×10^5 个光子。这些研究成果展示了FIB技术在h-BN材料中生成单光子发射器方面的潜力和精确性。

在探索单光子源的制备与特性方面,近年来的研究取得了显著进展。表1汇总了2016—2024年间在确定性空间上制备单光子源的相关

研究论文的详细数据。这些研究成果不仅展示了单光子源在量子信息科学和光电子学领域的应用潜力,而且揭示了氮化硼色心发射特性的多样性。值得注意的是,氮化硼色心的发射光谱覆盖了整个可见光区域,从紫外到近红外波段。其中,大部分的零声子线集中在绿光至红光区域(550~650 nm),同时,也观察到紫外线发射(300~

400 nm)和近红外(>750 nm)发射。多数通过后期加工引入的缺陷需要通过退火处理以激活成为单光子源,采用该方法制备的单光子源具有较宽的零声子线分布范围(500~800 nm),见图 3(a)。然而,由电子束辐照产生的单光子发射表现出了不同寻常的特性,如图 3(b)所示,它具有发射光谱的单一性,这在单光子源的发射特性中是非常宝贵的。

表 1 不同方式在 h-BN 中空间确定引入 SPE 的一些关键特性

Tab. 1 Different ways to spatially identify some of the key properties for introducing SPE in h-BN						
加工方法		定位精度	激活方法	波长分布范围	发射强度/Mcps	文献
模版法	SiO ₂ 纳米柱	75 nm~2 μm		530~610 nm		[21]
	SiO ₂ 纳米柱	250 nm		559~630 nm	0.25	[22]
纳米压印法	AFM 针尖	400 nm	1 000 °C Ar 退火	580~630 nm	1.1	[23]
飞秒激光直写法		3 μm	900 °C 空气退火	534~588 nm	7.15	[24]
		5 nm	1 000 °C 真空退火	500~800 nm	9	[25]
电子束		亚微米级		405 nm	0.25	[27]
		200~1 000 nm		436 nm	0.4	[28]
辐照法		亚微米级		575 nm	0.04	[29]
聚焦离子束	镓离子	500 nm	850 °C 氧气退火	559~602 nm	2.6	[30]
辐照法	氦离子	50 nm	1 050 °C 氧气退火	500~700 nm	0.3	[31]

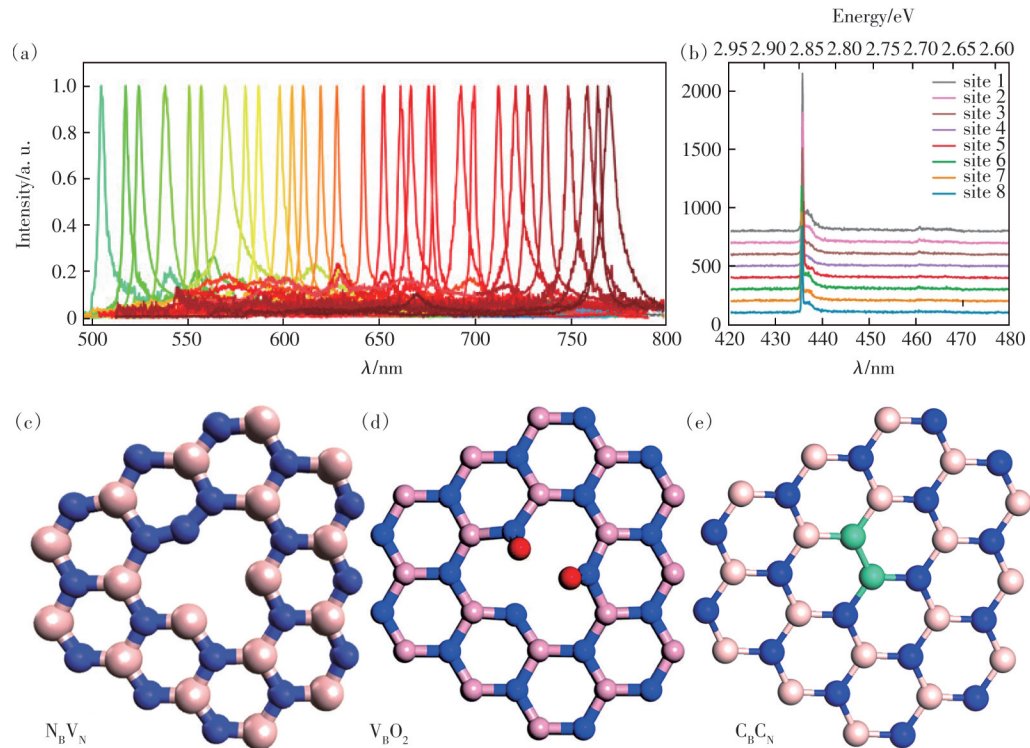


图 3 (a)飞秒激光写入的单光子源室温下的 PL 光谱^[25]; (b)利用电子束加工出的单光子源低温下(5 K)的 PL 光谱^[27]; (c)N_BV_N 缺陷^[6]; (d)V_BO₂ 缺陷^[52]; (e)C_BC_N 缺陷^[60]

Fig.3 (a)PL spectra of single-photon source written by femtosecond laser at room temperature^[25]. (b)PL spectra of a single-photon source at low temperature(5 K) processed with an electron beam^[27]. (c)N_BV_N defects^[6]. (d)V_BO₂ defect^[52]. (e)C_BC_N defect^[60]

在 h-BN 材料中,不同波长的光子发射特性取决于色心的种类。目前,h-BN 中单光子源的确切缺陷类型尚未被明确鉴定,但已经提出了多种潜

在的缺陷候选,如图 3(c)~(e)所示。早期研究指出,氮化硼中的固有缺陷结构——氮空位色心,可能是导致单光子发射的原因。氮空位色心主要分

为普通氮空位(V_N)和反位点氮空位($N_B V_N$),它们可以通过在氩气环境中进行热退火工艺来产生^[6]。然而,在无杂质存在的条件下,这些天然缺陷很难以孤立的点缺陷或间隙缺陷的形式存在,因此需要引入其他杂质原子(如碳、氧)以实现单光子发射的特性^[61]。

其中,C原子会替代N或B原子,在h-BN带隙中产生杂质能级。例如,碳杂质色心($C_B C_N$)是在h-BN晶体生长过程中引入的,能够发出蓝光和紫外光,波长范围大约在300~450 nm^[60]。而对于能量在2 eV附近的单光子发射,Sajid等^[62]将其归因于 V_N-C_B 缺陷。然而,Mendelson在2021年的研究认为 V_B-C_N 缺陷是2 eV附近单光子发射的来源^[63]。此外,O原子则会取代N原子与B原子。例如,Xu等^[52]经过空气退火处理的方式生成波长位于700 nm左右的单光子发射源,根据理论计算推断该发光缺陷为氧空位色心($V_B O_2$)。这些研究展示了点缺陷类型研究中的分歧,需要进一步的探索和研究来达成共识。

3 单光子源的片上集成

尽管h-BN中的单光子源已经在性能上展现了显著的优势,但与理想的单光子源相比,在性能上仍有一定的提升空间,单光子源的不可分辨性尚未实现。不可分辨性是单光子源的一个关键特性,意味着发射出的光子在偏振、空间频率、频率等多个自由度上无法被区分。在量子光学中,实现光子纠缠和长距离量子通信依赖于光子间的有效相互作用,这要求光子必须是完全不可分辨的。Hong-Ou-Mandel(HOM)干涉效应是一种实验现象,通过测量量子点发出的两个光子的HOM干涉对比度来评估光子的不可分辨性。然而,原子结构中的发光偶极子受到晶格振动(声子)的影响,会导致光子的能量谱去相干和展宽,从而影响其不可分辨性。为了进一步提高单光子的性能,目前的研究正在探索多种单光子源的片上集成策略以实现性能的优化。其中一种有效的方法是将单光子源与光学微腔或波导耦合,光学微腔能够改变光子的模式体积,从而提高单光子源与光子态之间的耦合效率;波导的集成可以有效地引导和传输光子,实现光子态的定向输出。另一种提升单光子源性能的策略是采用外场调控技术,如电场、磁场或应力等,来精确控制单光子源的发射特性。这些外场可以通过改变色心的

能级结构或波函数分布,从而调节单光子的发射波长、强度和相干时间。通过这些方法实现更高性能的单光子发射源,对于其在量子信息处理、量子计算以及高密度光电子集成系统等领域的应用具有重要意义。

3.1 微腔耦合

光学微腔是一种微型的光学谐振结构,能够有效地捕获并多次反射光子,通常由高折射率与低折射率材料组合而成,其形式多样,包括等离激元腔、光子晶体、微球、圆形布拉格光栅等多种类型。通过对微腔的材料和结构的精心设计,研究者能够精确调控微腔的谐振频率和模式分布,实现对光子的高效操控。这些微腔的设计旨在通过Purcell效应显著增强光与物质的相互作用,进而提升发射体的光学性能,尤其是亮度和光子的收集效率。

等离激元微腔是一种利用金属纳米结构中的等离激元共振来显著增强电磁场的微纳结构。等离激元是金属中自由电子与光子相互作用的产物,它们能够在特定频率下被激发,产生强烈的电磁场增强效应。通过设计金属纳米结构的几何形状和排列方式,可以精确地控制等离激元共振的频率及其强度,从而有效增强h-BN中单光子源的发射强度。Tran等^[32]通过采用湿法转移的方式将h-BN与等离激元纳米腔阵列集成,如图4(a)所示,使h-BN中的单光子源与周期性金属纳米粒子(NP)阵列(银或金)确定性地耦合。耦合后发射器的发射强度增强了约2.5倍,同时荧光寿命也从4 ns缩短到0.6 ns。这项研究为平面量子光学的实现奠定了基础。Nicholas等^[33]同样利用底板形状工程激活目标区域的单光子源,金属银纳米阵列与h-BN中的单光子源耦合。h-BN中单光子源的发光在耦合后表现出明显的方向性,发射强度明显增强,其光谱形状与银纳米柱阵列的表面等离激元共振模式相关,呈现出与表面等离激元共振模式类似的色散特征。旋涂在薄层h-BN上方的银纳米立方体^[64]也可通过等离激元效应增强h-BN中单光子源发射强度。除了金属纳米阵列,Nguyen等^[65]使用AFM操控金纳米球实现了与h-BN发射器的耦合。通过在单光子源附近放置一个或两个金纳米球,如图4(b)所示,观察到其荧光寿命缩短和荧光增强。耦合后发射衰减时间从原始的4.92 ns减少到单球配置下的2.68 ns,进一步减少到双球

配置下的 1.54 ns。单个纳米球耦合后,单光子发射计数率提高到 3 Mcps;而两个纳米球耦合后,计数率可进一步提高到 6 Mcps。在此基础上,Li 等提出了将 h-BN 中单光子源耦合到金属介质的天线阵列中(图 4(c)),发射器的光收集效率提高到 98%,相比无天线结构提高了 7 倍^[34]。在室温条件下,耦合后的 h-BN 单光子发射器实现了 700 nm 波段的单光子发射,单光子发射速率最高可达 44 Mcps,脉冲激发下最高可达 10 Mcps。类似地,将 h-BN 单光子

发射器与共振铝纳米天线耦合^[66],使用时间门控技术可以区分 h-BN 缺陷发射和天线发光。然而,实验观察到天线近场区域发射减少,荧光寿命降低。h-BN 中的单光子源与天线耦合后,辐射速率和非辐射速率都增加,但非辐射速率的增加会降低量子效率,从而降低发光强度。研究者提出将纳米天线直接制备在 h-BN 上,预计可实现 h-BN 缺陷发射增强。这一系列研究成果为未来基于等离激元微腔的量子光源带来了希望。

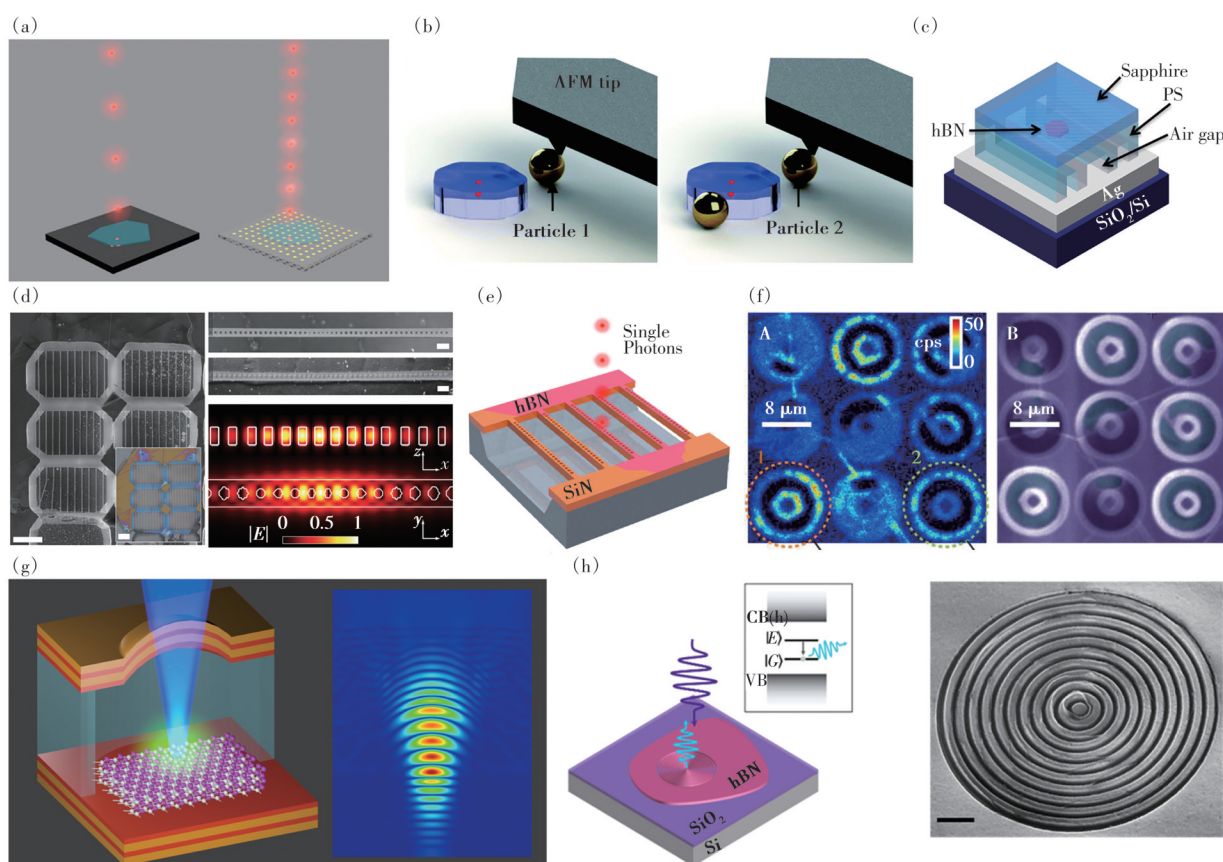


图4 h-BN 中的 SPE 与各种微腔耦合。(a)金属纳米阵列^[32];(b)金纳米球^[65];(c)纳米天线^[34];(d)一维光子晶体^[36];(e)Si₃N₄光子晶体腔^[37];(f)微盘^[67];(g)半球微腔^[38];(h)牛眼腔^[68]

Fig.4 SPE in h-BN coupled with various microcavities. (a) Metal nano-arrays^[32]. (b) Gold nanorods^[65]. (c) Nano-antenna^[34]. (d) One-dimensional photonic crystal^[36]. (e) Si₃N₄ photonic crystal cavity^[37]. (f) Microdisk^[67]. (g) Hemispherical microcavity^[38]. (h) Bull's eye cavity^[68]

光子晶体微腔是利用光子晶体中周期性结构的对称性来限制和增强光场的一种微腔。光子晶体可以形成带隙,阻止特定频率的光传播,而允许其他频率的光在晶体中传播。通过设计光子晶体的周期性和微腔的形状,可以实现对光场的有效调控,提高微腔的品质因子(Q 值)和光子发射的定向性。h-BN 是一种双折射介质材料,折射率具有各项异性,其本身就是光子晶体腔的潜在材料。Kim 等^[35]成功地在 h-BN 上制备了具有 Q 值超过

2 000 的光子晶体腔,并在不会显著降低 Q 值的情况下使用电子束诱导化学刻蚀(EBIE)对单个腔体进行了迭代调谐。随后,对制备好的光子晶体进行热退火,激活 h-BN 中的单光子源。虽然他们实现了发射器与腔体的空间匹配,但是单光子源的发射波长与腔体的共振波长不匹配,再次利用 EBIE 调谐后单光子源消失。2022 年,Frösch 等^[36]通过在低温下进行气体冷凝,成功实现了 h-BN 单光子发射与一维光子晶体腔的共振耦合

(图 4(d)), 其 Q 值约 5 000, 相较于之前报道有了显著提升。当发射器与腔模式共振时, 观察到发射器零声子线的强度提升了 10 倍, 荧光寿命降低了 1.5 倍。根据发射器的线宽和发射寿命变化, 计算出耦合系统的 Purcell 因子约为 15。这一结果与其他材料系统在量子纳米光子学发展早期阶段报道的数值相当, 为 h-BN 量子纳米光子学的未来发展奠定了基础。除了 h-BN 这一光子晶体微腔材料选择之外, Si_3N_4 因其与 h-BN 相匹配的折射率、高 Q 值、成熟的工艺流程以及对多种二维材料的兼容性, 也是与 h-BN 中单光子源耦合的理想选择。如图 4(e) 所示, Frösch 等^[37]将 h-BN 单光子源与 Si_3N_4 光子晶体腔进行片上集成。他们将 h-BN 薄膜转移到 Si_3N_4 基板上, 并使用电子束光刻 (EBL) 等方法制备与 h-BN 薄膜集成的 Si_3N_4 光子晶体纳米腔, Q 值达到约 3 300, 耦合后单光子源的光致发光增强了 6 倍。Nicholas 等^[67]通过标准的湿法转移工艺, 将 20 nm 厚的 h-BN 薄膜从铜基底转移到图 4(f) 中的 Si_3N_4 微盘腔阵列上。微盘腔直径约为 3~4 μm , 支持可见光范围内 (550~650 nm) 的横向电 (TE) 模式共振, 与 h-BN 中 SPE 的发射波长大致匹配。h-BN 薄膜在微盘周围形成多边形折叠, 从而激活 h-BN 中的缺陷态发射。耦合后的单光子源发射强度增强。Parto 等^[69]通过优化 Si_3N_4 的制备工艺, 成功降低了背景荧光, 并精确控制了二维材料单光子发射器的位置和偶极取向。实验结果显示, 室温下 h-BN 发射器的谱线耦合效率达到了 46%, 远超先前研究耦合的效率。

另一种微球腔结构与 h-BN 薄片的耦合可以充分抑制声子边带和其他非谐振噪声, 并大大增强单光子发射的方向性和自发发射率。微球微腔是一种有球形几何形状的微腔, 如图 4(g) 所示, 其优点在于天然的全内反射边界和相对简单的制造工艺。通过改变微球的材料、尺寸和表面结构, 可以调整微腔的谐振频率和模式分布, 优化微腔的光学性能。Tobias 等^[38]通过在平面镜上转移多层 h-BN, 并利用氧等离子体辐照在 h-BN 中制造出单光子发射器。接着, 使用聚焦离子束制作了一个半球形镜面, 并与平面镜构成微腔。与微腔耦合后, 单光子源的光谱线宽显著减小至 0.224 nm, 同时通过 Purcell 效应实现了约 2.3 倍的寿命缩短, 激发态寿命缩短至 366 ps, 单光子计数率显著提高, 尤其在低激发功率下。此外, 该单光子源发射

出线性偏振光, 其偏振度高达 90.4%。通过调节腔长, 实现了发射波长可调谐。值得注意的是, 腔耦合后的单光子源在长时间内表现稳定, 未出现闪烁或光漂白现象。

此外, 单片圆形布拉格光栅装置可增强对 h-BN 中单光子源的收集效率。最近有研究已经成功实现了单光子发射器在 h-BN 环状布拉格光栅结构中的集成, 使单光子发射器的位置和取向可控, 提高了集成度和确定性^[68]。研究采用了多种刻蚀方法制作圆环布拉格光栅结构, 并利用电子束辐照的方法在结构中心位置制备单光子发射器 (图 4(h))。与未耦合光栅结构的单光子发射器相比, 耦合到光栅的单光子发射器收集效率提高了 6 倍, 并在低温下展现出卓越的谱线稳定性。这项工作首次实现了在 h-BN 中高精度控制位置的单光子源的单片集成技术, 为后续开发各种集成光量子芯片奠定了基础。

3.2 波导耦合

将单光子发射器与光子电路集成是一个至关重要的应用, 这不仅要在芯片上产生 SPEs, 还要引导光束沿着设备中的特定路径传播, 通常通过光子波导来实现。图 5(a) 展示了将 h-BN 单光子发射器确定性集成到 SiN 波导中^[39], 他们在 SiO_2 衬底上激活 h-BN 单光子发射, 然后用化学气相沉积将其封装在保护性的 SiO_2 层中, 并沉积 SiN 波导层。发射器偶极子的取向与波导传播方向的误差仅为 4° 。同时, Li^[40]报道了 h-BN 单光子发射器的同质波导集成 (图 5(b))。利用电子束光刻与反应离子束刻蚀的方式在 h-BN 上制备波导结构, 对波导结构进行氢等离子体辐照与退火处理, 以激活 h-BN 薄片中的单光子发射, 实现了 h-BN 波导中 SPE 的单片集成, 耦合效率为 0.032。这是 h-BN 中首个同质集成的工作, 可以实现比传统异质集成更高的耦合效率。此外, 单光子发射器还可与表面等离激元波导耦合。Liu 等^[70]采用由光纤锥体和银纳米线组成的混合型等离激元探针来控制 h-BN 中不同极化取向的单光子发射器的辐射特性。对于平面取向的 SPEs, 通过精确控制探针与 SPE 的相对位置, 可以选择性地增加或减少其寿命。该方案为在位调控单光子发射器性能提供了新的途径, 并具有分析单光子发射器偏振取向的潜力。

除了上述微米和纳米尺度的短波导外, h-BN

中单光子源与光纤集成在近几年也取得了很大进展。Andreas等^[41]已成功将h-BN中的单光子发射源耦合到锥形光纤中,如图5(c)所示。当光被引导通过光纤时,光的量子特性保持不变。通过后焦面成像和偏振测量,确认了单光子发射器与光纤的高效耦合,耦合效率达到10%。在随后的研究中,Häußler等实现了将h-BN中的单光子源耦合到基于光纤法布里-珀罗腔的混合系统中^[42]。如图5(d)所示,光纤法布里-珀罗腔由一个宏观平面镜和一个光纤端面镜组成。平面镜上涂有高反射率的介电涂层,形成分布式布拉格反射镜

(DBR)。光纤端面镜采用CO₂激光烧蚀制成凹面镜,半径约为35 μm,也涂有高反射率的介电涂层。腔体长度在30 μm以上,通过调谐光纤端面镜的位置,可以改变腔体的长度,从而改变腔体的共振波长。研究使用了化学气相沉积生长的h-BN,并将其与光纤端面构成的光纤法布里-珀罗腔耦合,实现了超过30 nm的宽光谱范围调谐;并实现了强耦合,观察到光子发射强度提高了50倍,线宽显著窄化。这些研究为h-BN材料中单光子发射器实现高度集成的量子光子学系统提供了可能性。

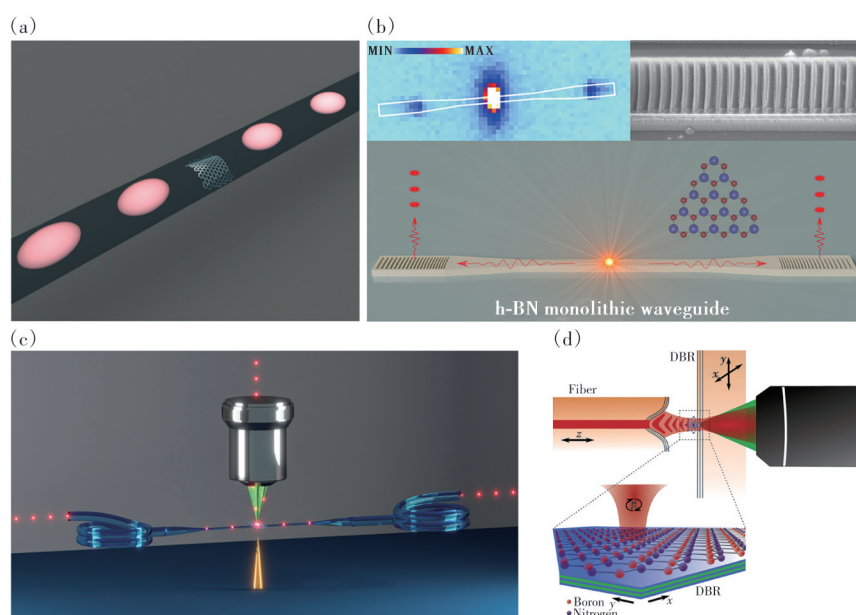


图5 h-BN中的SPE与波导耦合。(a) SiN光子波导^[39]; (b) h-BN波导^[40]; (c) 光纤耦合^[41]; (d) 由一个宏观平面镜和一个具有凹凸结构的玻璃纤维尖端组成的平面谐振器^[42]

Fig.5 SPE coupling to waveguide in h-BN. (a) SiN photonic waveguide^[39]. (b) h-BN waveguide^[40]. (c) Optical fiber^[41]. (d) Planar resonator consisting of a macroscopic plane mirror and a glass fiber tip with a concave-convex structure^[42]

3.3 外场调控

h-BN量子光源的光谱调谐对于实际应用至关重要。最初,Grosso等^[71]将含有单光子发射源h-BN薄片转移到可弯曲的聚碳酸酯梁上,从而在施加拉伸应变时产生垂直方向上的微弱压缩。这种调制在h-BN中实现了6 meV的光谱调谐,提高了单光子纯度,其二阶关联函数低至0.077,并且其饱和状态下的单光子计数提升至 7×10^6 cps。另外,通过静水压力也可以调控h-BN中的单光子发射源^[72]。h-BN能够承受最高3 GPa的压力,在该过程中,发射源可能会出现红移或蓝移,其压力系数大约在-10 ~ 10 meV/GPa之间。科研人员使用密度泛函理论(DFT)对N_BV_N系统进行了模拟。模拟结果表明,在单层h-BN中,N_BV_N缺陷主要是

层内作用,这会引起蓝移;而在双层结构中,N_BV_N缺陷主要是层间作用,这会导致红移。对于那些先红移后蓝移的发射源,当压力增加时,层内作用逐渐变强,并最终超越层间作用,使得发射线从红移变为蓝移。

为了解决由局部环境不均匀性引起的发射能量随机分布问题,需要将室温下的SPE与具有可调控电场的器件相结合,以实现对其光学性能的电学调控。一种有效的方式就是利用斯塔克效应(Stark effect)施加外部电场来调整电子能级,从而实现对其发射光子能量的精确调控。最早,Noh^[43]利用范德瓦尔斯异质结构(图6(a))对单个光子发射器进行斯塔克调谐。该研究通过在h-BN和石墨烯之间施加垂直电场,调控h-BN中原子缺陷发

射器发光能量。在低温下观察到,电场可以引起位于 2.0 eV 附近的发光峰产生 $5.4 \text{ nm}/(\text{V} \cdot \text{nm}^{-1})$ 的斯塔克位移,这表明原子缺陷发射器存在垂直方向的偶极矩。研究还发现电场可以诱导发射强度的离散化和稳定化,且这一效应可以通过外部电场实现可逆控制。此外,有研究利用相似的垂直结构,使位于 2.84 eV 附近的单光子发射源产生斯塔克位移^[48]。除了垂直叠层结构外,Xia 等^[44]设计制备了纳米尺度四电极结构,如图 6(b)所示。4 个电极围绕着 h-BN 中的单光子发射源,通过施加不同电压来控制电场的强度和方向,单光子源的 Stark 位移 $43 \text{ meV}/(\text{V} \cdot \text{nm}^{-1})$,是室温下发

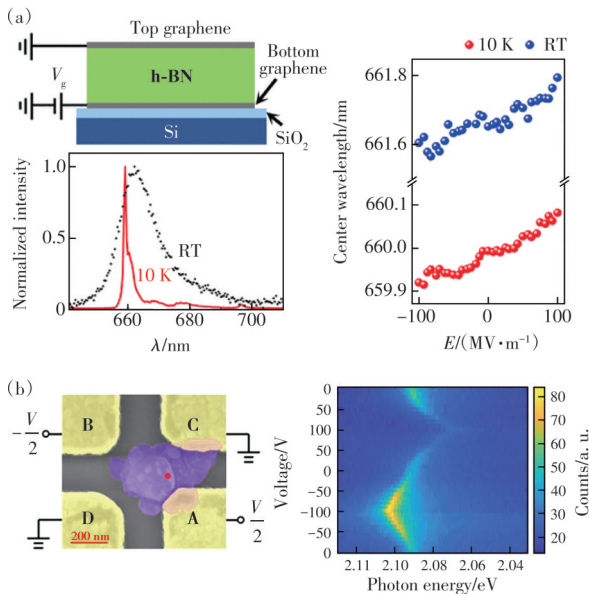


图 6 电学叠层器件。(a)左图为 graphene/h-BN/graphene 异质结示意图,右图为不同电场下单光子源在 10 K (红点)和室温(蓝点)下的中心波长偏移^[43]。(b)左图为四电极装置的两通道彩色 SEM 图像,h-BN 纳米片(紫色)中 SPE(红点),A、B、C 和 D(黄色)表示 4 个金电极;右图为 h-BN SPE 的 ZPL 谱线随施加到电极 A 和 B 的电压变化的图像^[44]

Fig. 6 Electrical stacked devices. (a) Schematic of the graphene/h-BN/graphene heterojunction on the left. On the right, the center wavelength shifts of the single-photon source at 10 K (red dots) and room temperature (blue dots) under different electric fields^[43]. (b) The left panel shows a two-channel color SEM image of the four-electrode device with SPE (red dot) in h-BN nanosheets (purple), and four gold electrodes are indicated by A, B, C, and D (yellow). The right panel shows the ZPL spectral lines of the h-BN SPE with the voltage applied to the electrodes A and B^[44]

射线宽的 4 倍。该研究首次实现了对 h-BN 色心固有对称性的破坏,并观测到与发射偏振方向一致的偶极子斯塔克效应模式,表明色心具有非零电偶极矩。这一发现为 h-BN 色心原子结构的深入研究和在室温下实现可扩展的固态量子信息处理奠定了基础。h-BN 中单光子源发射光谱通常会受到各种展宽机制的强烈影响。有研究表明,通过电场调谐手段,能够在 h-BN 中有效抑制光谱扩散现象,并实现线宽的显著窄化,从而达成可调谐的量子光发射性能^[45]。在 10 V 电压下,线宽显著减小到 89 MHz,接近同质宽度的寿命极限,几乎消除了非同质加宽效应。

利用外部电场激活单光子荧光发射对于实现基于 h-BN 的光子量子通信至关重要。h-BN 单光子源光致发光的电激活已通过垂直器件结构实现^[47]。利用石墨烯作为电荷储层,通过调节石墨烯的费米能级,实现了对 h-BN 缺陷发光的可控开关。h-BN 中 SPE 的发光强度随电压的开启而增强,这表明了 h-BN 缺陷的电荷状态改变。这项工作为实现可控的 h-BN 单光子发射的电荷状态奠定了基础,为 h-BN 在光电量子信息处理、量子通信和量子存储等领域的应用铺平了道路。

4 结论与展望

本综述重点介绍了 h-BN 中确定性单光子源研究进展。单光子源作为量子信息科技的基本单元,其在量子光学、量子传感以及量子计算中至关重要。目前,h-BN 中单光子发射的确定性制备已取得了一定的进展,包括模版法^[21-22]、纳米压印^[23]、飞秒激光^[24-25]、电子束^[26-29]、聚焦离子束^[30-31],可以有效地解决单光子源定位问题;单光子发射性能的提升可以满足特定量子技术应用的需求,如将 h-BN 单光子发射与金属等离子体腔、光子晶体腔、波导耦合,或是外场调控等。

然而,单光子源器件在发展中面临一些挑战。首先是 h-BN 单光子发射器单光子纯度的提升。目前尚不清楚 h-BN 中单光子发射源的确切生成或激活机制,对缺陷类型和密度的精确控制还无法实现。其次,实现单光子发射中的光子不可分辨性也是一个重要挑战。尽管 h-BN 在单光子发射中表现出良好反聚束特性的性能,但其发射波长分布较广,h-BN 中两个独立单光子源发射光子的不可分辨性仍未实现,这对于实现与量子纠缠相关的应用(如量子计算)至关重要。目前,通过外场调谐来解

决这个问题,但调谐范围有限,需要进一步优化。此外,光子发射效率也是需要解决的挑战之一。目前通过将固态单光子源与光学谐振腔或其他光学元件集成,通过优化设计来提高光子循环和发射效率。但h-BN中单光子源尚未达到实际应用所需的高耦合效率,还需进行更多努力。解决这些问题将

有助于h-BN中量子光源性能的提升,并在未来量子信息科技领域发挥更多作用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240129>.

参 考 文 献:

- [1] 陈宇翱,潘建伟. 量子飞跃:从量子基础到量子信息科技[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2019.
 CHEN Y A, PAN J W. *Quantum Leap: From Foundation to Quantum Information Science and Technology* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2019. (in Chinese)
- [2] POLITI A, CRYAN M J, RARITY J G, *et al.* Silica-on-silicon waveguide quantum circuits [J]. *Science*, 2008, 320(5876): 646-649.
- [3] DARQUIÉ B, JONES M P A, DINGJIAN J, *et al.* Controlled single-photon emission from a single trapped two-level atom [J]. *Science*, 2005, 309(5733): 454-456.
- [4] TREUSSART F, ALLÉAUME R, LE FLOC'H V, *et al.* Single photon emission from a single molecule [J]. *C. R. Physique*, 2002, 3(4): 501-508.
- [5] SIPAHIGIL A, JAHNKE K D, ROGERS L J, *et al.* Indistinguishable photons from separated silicon-vacancy centers in diamond [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 113(11): 113602.
- [6] TRAN T T, BRAY K, FORD M J, *et al.* Quantum emission from hexagonal boron nitride monolayers [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2016, 11(1): 37-41.
- [7] JUNGWIRTH N R, CALDERON B, JI Y X, *et al.* Temperature dependence of wavelength selectable zero-phonon emission from single defects in hexagonal boron nitride [J]. *Nano Lett.*, 2016, 16(10): 6052-6057.
- [8] SENELLART P, SOLOMON G, WHITE A. High-performance semiconductor quantum-dot single-photon sources [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2017, 12(11): 1026-1039.
- [9] 李函聪,陈沛庆,杨静南,等. 单量子点的发光与应用[J]. 发光学报, 2023, 44(7): 1251-1272.
 LI H C, CHEN X Q, YANG J N, *et al.* Luminescence and applications of single quantum dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(7): 1251-1272. (in Chinese)
- [10] BALASUBRAMANIAN G, NEUMANN P, TWITCHEN D, *et al.* Ultralong spin coherence time in isotopically engineered diamond [J]. *Nat. Mater.*, 2009, 8(5): 383-387.
- [11] BAR-GILL N, PHAM L M, JARMOLA A, *et al.* Solid-state electronic spin coherence time approaching one second [J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4: 1743.
- [12] HERBSCHLEB E D, KATO H, MARUYAMA Y, *et al.* Ultra-long coherence times amongst room-temperature solid-state spins [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 3766.
- [13] TONNDORF P, SCHMIDT R, SCHNEIDER R, *et al.* Single-photon emission from localized excitons in an atomically thin semiconductor [J]. *Optica*, 2015, 2(4): 347-352.
- [14] KERN J, NIEHUES I, TONNDORF P, *et al.* Nanoscale positioning of single-photon emitters in atomically thin WSe₂ [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(33): 7101-7105.
- [15] PALACIOS-BERRAQUERO C, KARA D M, MONTBLANCH A R P, *et al.* Large-scale quantum-emitter arrays in atomically thin semiconductors [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8: 15093.
- [16] CHAKRABORTY C, GOODFELLOW K M, NICK VAMIVAKAS A. Localized emission from defects in MoSe₂ layers [J]. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(6): 2081-2087.
- [17] 王云坤,李耀龙,高宇南. 二维过渡金属硫族化合物中的缺陷和相关载流子动力学研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(1): 18-42.
 WANG Y K, LI Y L, GAO Y N. Progress on defect and related carrier dynamics in two-dimensional transition metal chalcogenides [J]. *Chin. Opt.*, 2021, 14(1): 18-42. (in Chinese)

- [18] LI R S, LIU F Q, LU Q Y. Quantum light source based on semiconductor quantum dots: a review [J]. *Photonics*, 2023, 10(6): 639.
- [19] CALDWELL J D, AHARONOVICH I, CASSABOIS G, *et al.* Photonics with hexagonal boron nitride [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2019, 4(8): 552-567.
- [20] TOTH M, AHARONOVICH I. Single photon sources in atomically thin materials [J]. *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 2019, 70: 123-142.
- [21] PROSCIA N V, SHOTAN Z, JAYAKUMAR H, *et al.* Near-deterministic activation of room-temperature quantum emitters in hexagonal boron nitride [J]. *Optica*, 2018, 5(9): 1128-1134.
- [22] LI C, MENDELSON N, RITIKA R, *et al.* Scalable and deterministic fabrication of quantum emitter arrays from hexagonal boron nitride [J]. *Nano Lett.*, 2021, 21(8): 3626-3632.
- [23] XU X H, MARTIN Z O, SYCHEV D, *et al.* Creating quantum emitters in hexagonal boron nitride deterministically on chip-compatible substrates [J]. *Nano Lett.*, 2021, 21(19): 8182-8189.
- [24] GAN L, ZHANG D Y, ZHANG R L, *et al.* Large-scale, high-yield laser fabrication of bright and pure single-photon emitters at room temperature in hexagonal boron nitride [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(9): 14254-14261.
- [25] WANG X J, FANG H H, LI Z Z, *et al.* Laser manufacturing of spatial resolution approaching quantum limit [J]. *Light Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 6.
- [26] TRAN T T, ELBADAWI C, TOTONJIAN D, *et al.* Robust multicolor single photon emission from point defects in hexagonal boron nitride [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(8): 7331-7338.
- [27] FOURNIER C, PLAUD A, ROUX S, *et al.* Position-controlled quantum emitters with reproducible emission wavelength in hexagonal boron nitride [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 3779.
- [28] GALE A, LI C, CHEN Y L, *et al.* Site-specific fabrication of blue quantum emitters in hexagonal boron nitride [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(6): 2170-2177.
- [29] KUMAR A, CHOLSUK C, ZAND A, *et al.* Localized creation of yellow single photon emitting carbon complexes in hexagonal boron nitride [J]. *APL Mater.*, 2023, 11(7): 071108.
- [30] ZIEGLER J, KLAISS R, BLAIKIE A, *et al.* Deterministic quantum emitter formation in hexagonal boron nitride *via* controlled edge creation [J]. *Nano Lett.*, 2019, 19(3): 2121-2127.
- [31] LIU G L, WU X Y, JING P T, *et al.* Single photon emitters in hexagonal boron nitride fabricated by focused helium ion beam [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(9): 2302083.
- [32] TRAN T T, WANG D Q, XU Z Q, *et al.* Deterministic coupling of quantum emitters in 2D materials to plasmonic nanocavity arrays [J]. *Nano Lett.*, 2017, 17(4): 2634-2639.
- [33] PROSCIA N V, COLLISON R J, MERILES C A, *et al.* Coupling of deterministically activated quantum emitters in hexagonal boron nitride to plasmonic surface lattice resonances [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(11): 2057-2064.
- [34] LI X Z, SCULLY R A, SHAYAN K, *et al.* Near-unity light collection efficiency from quantum emitters in boron nitride by coupling to metallo-dielectric antennas [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(6): 6992-6997.
- [35] KIM S, FRÖCH J E, CHRISTIAN J, *et al.* Photonic crystal cavities from hexagonal boron nitride [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9(1): 2623.
- [36] FRÖCH J E, LI C, CHEN Y L, *et al.* Purcell enhancement of a cavity-coupled emitter in hexagonal boron nitride [J]. *Small*, 2022, 18(2): 2104805.
- [37] FRÖCH J E, KIM S, MENDELSON N, *et al.* Coupling hexagonal boron nitride quantum emitters to photonic crystal cavities [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(6): 7085-7091.
- [38] VOGL T, LECAMWASAM R, BUCHLER B C, *et al.* Compact cavity-enhanced single-photon generation with hexagonal boron nitride [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(8): 1955-1962.
- [39] ELSHAARI A W, SKALLI A, GYGER S, *et al.* Deterministic integration of hBN emitter in silicon nitride photonic waveguide [J]. *Adv. Quantum Technol.*, 2021, 4(6): 2100032.
- [40] LI C, FRÖCH J E, NONAHAL M, *et al.* Integration of hBN quantum emitters in monolithically fabricated waveguides [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(10): 2966-2972.
- [41] SCHELL A W, TAKASHIMA H, TRAN T T, *et al.* Coupling quantum emitters in 2D materials with tapered fibers [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(4): 761-767.

- [42] HÄUBLER S, BAYER G, WALTRICH R, *et al.* Tunable fiber-cavity enhanced photon emission from defect centers in hBN [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2021, 9(17): 2002218.
- [43] NOH G, CHOI D, KIM J H, *et al.* Stark tuning of single-photon emitters in hexagonal boron nitride [J]. *Nano Lett.*, 2018, 18(8): 4710-4715.
- [44] XIA Y, LI Q W, KIM J, *et al.* Room-temperature giant stark effect of single photon emitter in van der Waals material [J]. *Nano Lett.*, 2019, 19(10): 7100-7105.
- [45] AKBARI H, BISWAS S, JHA P K, *et al.* Lifetime-limited and tunable quantum light emission in h-BN *via* electric field modulation [J]. *Nano Lett.*, 2022, 22(19): 7798-7803.
- [46] WHITE S J U, YANG T S, DONTSCHUK N, *et al.* Electrical control of quantum emitters in a Van der Waals heterostructure [J]. *Light Sci. Appl.*, 2022, 11(1): 186.
- [47] YU M, YIM D, SEO H, *et al.* Electrical charge control of h-BN single photon sources [J]. *2D Mater.*, 2022, 9(3): 035020.
- [48] ZHIGULIN I, HORDER J, IVÁDY V, *et al.* Stark effect of blue quantum emitters in hexagonal boron nitride [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2023, 19(4): 044011.
- [49] LI C, XU Z Q, MENDELSON N, *et al.* Purification of single-photon emission from hBN using post-processing treatments [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(11): 2049-2055.
- [50] CHEJANOVSKY N, REZAI M, PAOLUCCI F, *et al.* Structural attributes and photodynamics of visible spectrum quantum emitters in hexagonal boron nitride [J]. *Nano Lett.*, 2016, 16(11): 7037-7045.
- [51] VOGL T, CAMPBELL G, BUCHLER B C, *et al.* Fabrication and deterministic transfer of high-quality quantum emitters in hexagonal boron nitride [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(6): 2305-2312.
- [52] XU Z Q, ELBADAWI C, TRAN T T, *et al.* Single photon emission from plasma treated 2D hexagonal boron nitride [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(17): 7957-7965.
- [53] FISCHER M, CARIDAD J M, SAJID A, *et al.* Controlled generation of luminescent centers in hexagonal boron nitride by irradiation engineering [J]. *Sci. Adv.*, 2021, 7(8): eabe7138.
- [54] MENDELSON N, XU Z Q, TRAN T T, *et al.* Engineering and tuning of quantum emitters in few-layer hexagonal boron nitride [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(3): 3132-3140.
- [55] ABIDI I H, MENDELSON N, TRAN T T, *et al.* Selective defect formation in hexagonal boron nitride [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(13): 1900397.
- [56] STERN H L, WANG R Z, FAN Y, *et al.* Spectrally resolved photodynamics of individual emitters in large-area monolayers of hexagonal boron nitride [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(4): 4538-4547.
- [57] MITTERREITER E, SCHULER B, COCHRANE K A, *et al.* Atomistic positioning of defects in helium ion treated single-layer MoS₂ [J]. *Nano Lett.*, 2020, 20(6): 4437-4444.
- [58] CHOI S, TRAN T T, ELBADAWI C, *et al.* Engineering and localization of quantum emitters in large hexagonal boron nitride layers [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(43): 29642-29648.
- [59] NGOC MY DUONG H, NGUYEN M A P, KIANINIA M, *et al.* Effects of high-energy electron irradiation on quantum emitters in hexagonal boron nitride [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(29): 24886-24891.
- [60] JARA C, RAUCH T, BOTTI S, *et al.* First-principles identification of single photon emitters based on carbon clusters in hexagonal boron nitride [J]. *J. Phys. Chem. A*, 2021, 125(6): 1325-1335.
- [61] WESTON L, WICKRAMARATNE D, MACKOIT M, *et al.* Native point defects and impurities in hexagonal boron nitride [J]. *Phys. Rev. B*, 2018, 97(21): 214104.
- [62] SAJID A, THYGESEN K S. V_NC_B defect as source of single photon emission from hexagonal boron nitride [J]. *2D Mater.*, 2020, 7(3): 031007.
- [63] MENDELSON N, CHUGH D, REIMERS J R, *et al.* Identifying carbon as the source of visible single-photon emission from hexagonal boron nitride [J]. *Nat. Mater.*, 2021, 20(3): 321-328.
- [64] DOWRAN M, BUTLER A, LAMICHHANE S, *et al.* Plasmon enhanced quantum properties of single photon emitters with hybrid hexagonal boron nitride silver nanocube systems [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(16): 2300392.
- [65] NGUYEN M, KIM S, TRAN T T, *et al.* Nanoassembly of quantum emitters in hexagonal boron nitride and gold nanospheres [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(5): 2267-2274.

- [66] PALOMBO BLASCETTA N, LIEBEL M, LU X B, *et al.* Nanoscale imaging and control of hexagonal boron nitride single photon emitters by a resonant nanoantenna [J]. *Nano Lett.*, 2020, 20(3): 1992-1999.
- [67] PROSCIA N V, JAYAKUMAR H, GE X C, *et al.* Microcavity-coupled emitters in hexagonal boron nitride [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2937-2944.
- [68] SPENCER L, HORDER J, KIM S, *et al.* Monolithic integration of single quantum emitters in hBN bullseye cavities [J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(12): 4417-4424.
- [69] PARTO K, AZZAM S I, LEWIS N, *et al.* Cavity-enhanced 2D material quantum emitters deterministically integrated with silicon nitride microresonators [J]. *Nano Lett.*, 2022, 22(23): 9748-9756.
- [70] LIU X J, WU Y K, QI X Z, *et al.* Near-field modulation of differently oriented single photon emitters with a plasmonic probe [J]. *Nano Lett.*, 2022, 22(6): 2244-2250.
- [71] GROSSO G, MOON H, LIENHARD B, *et al.* Tunable and high-purity room temperature single-photon emission from atomic defects in hexagonal boron nitride [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8(1): 705.
- [72] XUE Y Z, WANG H, TAN Q H, *et al.* Anomalous pressure characteristics of defects in hexagonal boron nitride flakes [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(7): 7127-7133.



吴欣瑜(1998–),女,宁夏银川人,硕士研究生,2020年于东南大学获得学士学位,主要从事二维宽禁带半导体点缺陷发光性质方面的研究。
E-mail: wuxinyu21@mails.ucas.ac.cn



景鹏涛(1984–),男,山西长治人,博士,副研究员,硕士生导师,2011年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事超高精度半导体光电材料表征及器件制备方面的研究。
E-mail: jingpt@ciomp.ac.cn