用于集成量子光子学的单片平台六方氮化硼

Milad Nonahal[1], Chi Li[1*]Haoran Ren[3], Lesley Spencer[1], Mehran Kianinia[1], Milos Toth[1,2], Igor Aharonovich[1,2*]

1. 悉尼科技大学理学院数学与物理科学学院，厄尔特莫，新南威尔士州 2007，澳大利亚

2. ARC变革性超光学系统卓越中心（TMOS），悉尼科技大学，厄尔特莫，新南威尔士州 2007，澳大利亚

3. 莫纳什大学物理与天文学学院，克莱顿，维多利亚州 3800，澳大利亚

关键词： 六方氮化硼（六方氮化硼），集成量子光子学，波导，光子晶体腔

电子邮箱：chi.li@uts.edu.au；igor.aharonovich@uts.edu.au

摘要

集成量子光子学（*IQP*）为实现实用且可扩展的量子计算、通信和信息处理提供了途径。构建*IQP*平台需要将量子发射体与高品质光子线路集成。然而，由于同时需要高品质单光子源、优异的光学性能以及可扩展的纳米制造技术，适用于单片平台的材料种类有限。在此，我们展示了利用新兴量子材料六方氮化硼（*hBN*）制造*IQP*组件，包括锥形波导、微盘以及一维和二维光子晶体腔。我们实现了品质因数超过*4000*的谐振器，并以单晶六方氮化硼制造出原理验证性的复杂悬空集成量子光子线路。研究结果展示了六方氮化硼在可扩展集成量子技术中的应用潜力。

集成量子光子学（IQP）为实现大规模量子信息技术提供了一条前景广阔的途径。[1-3] 量子电路的主要组成部分是量子发射体（理想情况下具有自旋-光子接口）以及包括波导、腔和谐振器在内的光子元件[4, 5]。集成量子光子学方法的总体目标是将光学活性发射体与纳米光子组成元件耦合，从而实现量子元件与光子腔之间的相干相互作用[6-11]。过去十年间，人们投入了大量精力，利用多种材料开展关键量子实验，包括珀塞尔增强、单光子开关以及单光子水平的非线性效应，

体系。[12-22] 然而，适用于片上集成量子光子学电路的理想固态平台尚未确立。

六方氮化硼（hBN）近期已成为集成量子光子学的一个颇具前景的平台[23]。hBN中含有大量明亮的量子发射体，可按需进行工程化设计；此外，它还具有多种光学活性自旋缺陷，并呈现出清晰的光学探测磁共振信号。尤为重要的是，hBN是一种宽带隙范德华材料，可轻松从块体中剥离，获得从单层到数百纳米的各种厚度，从而支持在宽广的光谱范围内传导光。这些独特的光物理性质激发了人们利用hBN构建量子光子学电路的兴趣。迄今为止，已有研究报道了由hBN制成的独立光子谐振器和基本光学元件的原理验证展示。[24-31] 然而，全面的芯片级纳米加工方案仍未问世，主要原因是hBN材料坚固且化学惰性，因而加工面临挑战。

在此，我们展示了利用hBN制造片上和自支撑集成量子光子学元件的可行性。我们重点采用单片式方法，即完全由hBN制造整个器件。这种方法具有诸多优势，包括能够最大限度地降低耦合损耗，并将量子发射体定位在光学腔场强最高处。[32] 我们首先解决hBN加工这一关键问题。接下来，我们设计并制造潜在量子电路所需的全部组件，包括波导、耦合器、分束器和光子晶体腔（PCCs）。最后，为展示这一平台的全部潜力，我们演示了一种完全由悬空六方氮化硼制成的全集成单片式集成量子光子学芯片。

图1a以示意图形式展示了IQP的制造工艺。首先，使用光学显微镜识别出所需厚度的机械剥离的六方氮化硼薄片，并通过原子力显微镜（AFM）验证其厚度。随后，在选定的薄片上旋涂一层薄的电子束敏感抗蚀剂，并使用电子束光刻（EBL）进行图案化。显影后，在反应性SF_6气体环境中，通过感应耦合等离子体反应离子刻蚀（ICP/RIE）将图案转移到薄片上。去除残余聚合物后，立即将样品浸入氢氧化钾溶液中，以选择性地刻蚀掉支撑基底。图1b展示了单片六方氮化硼IQP芯片的示意图，该芯片由波导（光子输入）、光子晶体腔和谐振器（量子比特处理）以及用于光子探测的出耦合器组成。在本工作中，我们展示了利用六方氮化硼制造量子电路所有基本组件的能力，如图1c（i - iii）所明确展示的。这些组件包括用于引导光子至探测器的波导、分束器、谐振器、光学腔和出耦合器。

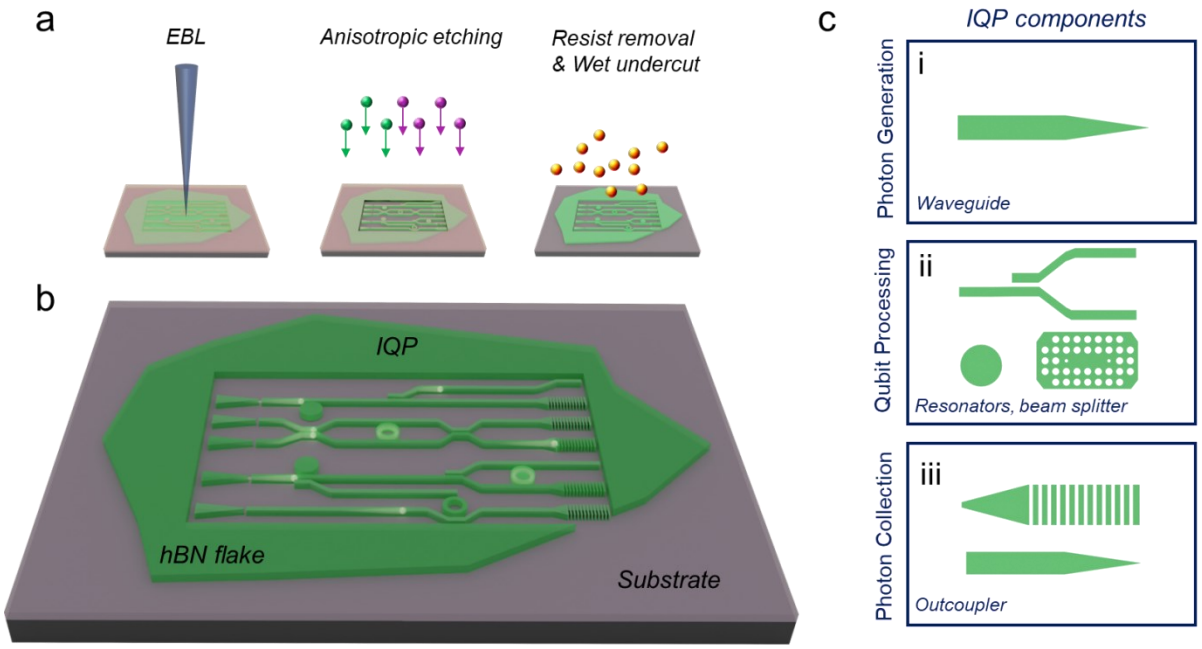

图***1.*** 使用六方氮化硼进行单片制造的示意图。*(a)* 制造过程的关键步骤：电子束光刻、反应离子刻蚀和光刻胶去除。*(b)* 由单晶六方氮化硼制造的集成电路。*(c) IQP*组件：*(i)* 低损耗波导；*(ii)* 谐振器、光学腔和分束器；*(iii)* 用于探测的出耦合器。图中展示了两个出耦合器，分别用于从顶部和侧面收集光子。

六方氮化硼制造工艺的详细信息见方法部分。这里我们强调实现高质量光学元件所需的关键要素，即各向异性刻蚀，以及使用能够实现平滑且垂直侧壁形貌的硬掩模。表1总结了本研究中采用的刻蚀参数，以及以往六方氮化硼纳米光子结构制造工作中所采用的参数。如下文所示，我们的工艺能够在各种纳米结构中形成一致且平滑的刻蚀轮廓。这主要通过采用相对较低的反应气体分压并最大化离子方向性来实现。为此，我们采用了浓度为1.5%的低SF_6 浓度，同时将腔室压力和感应耦合等离子体功率降至最低。在这些条件下，离子碰撞、离子反射以及等离子体的反应性均受到抑制，从而抑制六方氮化硼的横向刻蚀。横向刻蚀会产生倾斜的侧壁，并可能导致表面粗糙化；这两者都会损害光子结构，因此必须尽量减小。

我们的反应离子刻蚀参数使电子束光刻胶的刻蚀速度非常慢，因此光刻胶可作为优异的硬掩模，用于对六方氮化硼进行单步图形化，从而无需单独的剥离步骤，避免可能产生的侧壁粗糙化。此外，在高反应性的 SF_6 环境中，金属侵蚀也会导致粗糙化，而我们的工艺避免了这一问题。我们

注意到，我们 5 nm/s 的刻蚀速率适用于芯片级制造，且与其他材料体系的刻蚀速率相当。

	mask	腔室 压力	感应耦合等离子体 反应离子刻蚀 功率	SF6 浓度	刻蚀速率
本研究	光刻胶	1 mT	1/300 W	1.5%	5 nm/s
Froch 等人[28]	光刻胶	1 mT	50/100 瓦	10%	-
Kuhner 等人[33]	金属	6 mT	150/300 瓦	-	4 纳米/秒
Kim 等人[24]	光刻胶	10 毫托	0/100 瓦	100%	~ 13 纳米/秒

表***1***。 本文采用的各向异性干法刻蚀条件，以及以往工作中用于刻蚀六方氮化硼的反应离子刻蚀参数。

采用上述条件，我们用六方氮化硼制备了多种光学元件。首先，我们设计了波导。图2a（b）展示了刻蚀过程前（后）六方氮化硼薄片的光学图像。图2c展示了波导锥形头部和尾部的放大扫描电子显微镜图像。使用六方氮化硼这类层状材料的一个显著优势，是能够在不同制造步骤之间转移结构。为此，我们首先在基底中部找到厚度合适的六方氮化硼薄片并进行图案化，因为此处的制造步骤（光刻胶旋涂）不会产生边缘伪影。图案显影后，将六方氮化硼和光刻胶掩模转移至基底边缘，以便有效使用锥形波导。最后，使用电感耦合等离子体/离子反应刻蚀将图案转移到六方氮化硼中。

通过光学测量展示了波导的功能。如图 2d 所示的明场图像，透镜光纤通过锥形区域激发波导，并从波导末端收集光。由于制造工艺质量优良，波导主体中的散射极少，从而实现了高效的光限制和导光。

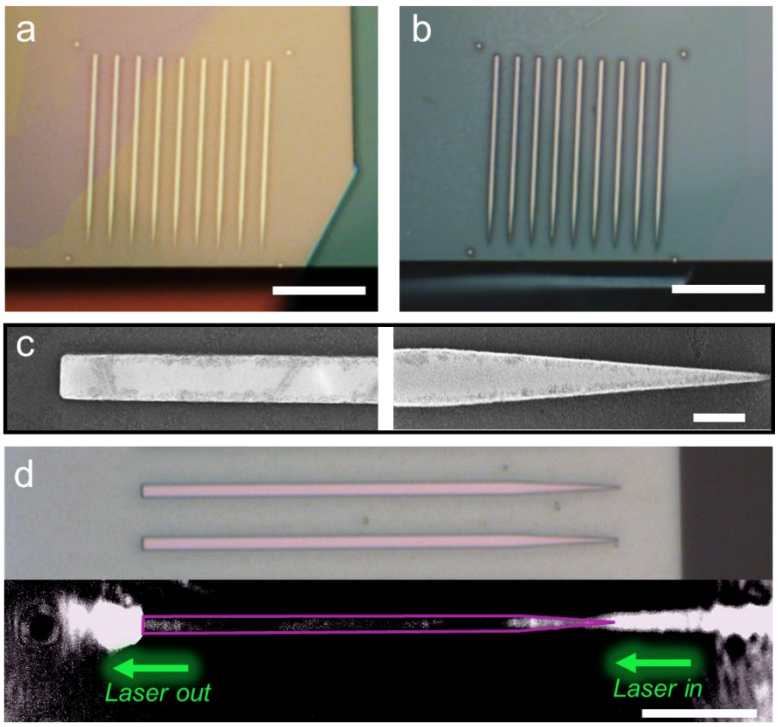

图 ***2.*** 光波导的制备与表征。 锥形波导阵列在 *(a)* 制备前和 *(b)* 制备后的光学图像，显示这些结构在反应离子刻蚀步骤后已完全刻蚀。比例尺对应 *25 μm*。*(c)* 两段波导的扫描电子显微镜图像。比例尺为 *1 μm*。*(d)* 白光（上）和激光（下）照射下锥形波导的放大光学显微镜图像。比例尺为 *10 μm*。

现在我们转向光子谐振器。我们重点关注集成纳米光子学中最常见的三种器件几何结构：微盘腔以及一维和二维光子晶体腔。请注意，为了最大限度地提高折射率反差，从而增强腔内的光限制，通常优先采用悬空腔。这通常通过对腔材料外延生长所在的牺牲层进行底切来实现。在本研究中，我们将剥离的六方氮化硼薄片转移到硅上，并采用氢氧化钾湿法化学刻蚀工艺对硅进行底切。

图3a展示了一个悬空圆盘谐振器（直径为3 μm）的倾斜伪彩色扫描电子显微镜图像。该谐振器由一个小型硅柱支撑，表明采用湿法化学刻蚀制备此类小型自支撑结构是可行的。我们使用10 wt%的KOH对硅衬底进行底切（参见方法部分）。进行光学表征时，我们采用了配备532纳米激发光源的标准共聚焦显微镜。图3b展示了六方氮化硼微盘的光致发光光谱。光谱中可见一系列清晰的回音壁模式（WGM）谐振，表现为尖锐的峰。为获得品质因数 $(Q = \lambda/\Delta\lambda)$，我们记录了单个WGM的高分辨率光致发光光谱，并用洛伦兹函数拟合峰值。该微盘的线宽窄至180 pm，Q值高达>3000 （图3c）。与此前的报道相比，其Q因数提高了6倍。[25] 这一提升

主要得益于实验上成功实现了由六方氮化硼制成的悬浮微盘谐振器，以及改进后的刻蚀工艺。

图 3d 是一维六方氮化硼光子晶体腔的俯视伪彩色扫描电子显微镜图像。该光学腔由波导中的孔阵列组成，孔径逐渐变化（最小达 80 nm）。腔共振如图 3(e、f)所示。共振线宽为 140 pm，对应的品质因子为 >4000 （图 3f）。随后，我们制备了二维光子晶体腔。图 3g 展示了二维光子晶体腔结构的扫描电子显微镜图像（L5 构型，即从中心区域沿直线去除 5 个孔）。光学腔中心的放大图显示在插图中。二维光子晶体腔呈现出单一光学模式（图 3h），其品质因数适中，为 ~ 2000；如图 3i 的高分辨率光谱所示。二维构型的品质因数较低，是由于六方氮化硼的折射率相对较低，从而导致其中存在损耗。尽管如此，对于某些应用而言，二维光子晶体腔几何结构有利于扩展为片上集成量子光子学电路。

上述光子晶体腔的珀塞尔增强可表示为 $F_p = \frac{3}{4\pi^2}(\frac{\lambda}{n})^3 \frac{Q}{V}$，且有望达到很高的水平。鉴于一维光子晶体腔的模式体积较小*($V\sim 1.5(\lambda/n)^3$)*，且品质因子为 *~ 4000*，预计珀塞尔增强将超过 200。值得注意的是，对于完全由六方氮化硼制成的单片腔，发射体将位于腔的高场区域内，而非通过倏逝场耦合。这应能使发射体与腔场充分重叠，从而实现显著增强。[6, 34, 35]

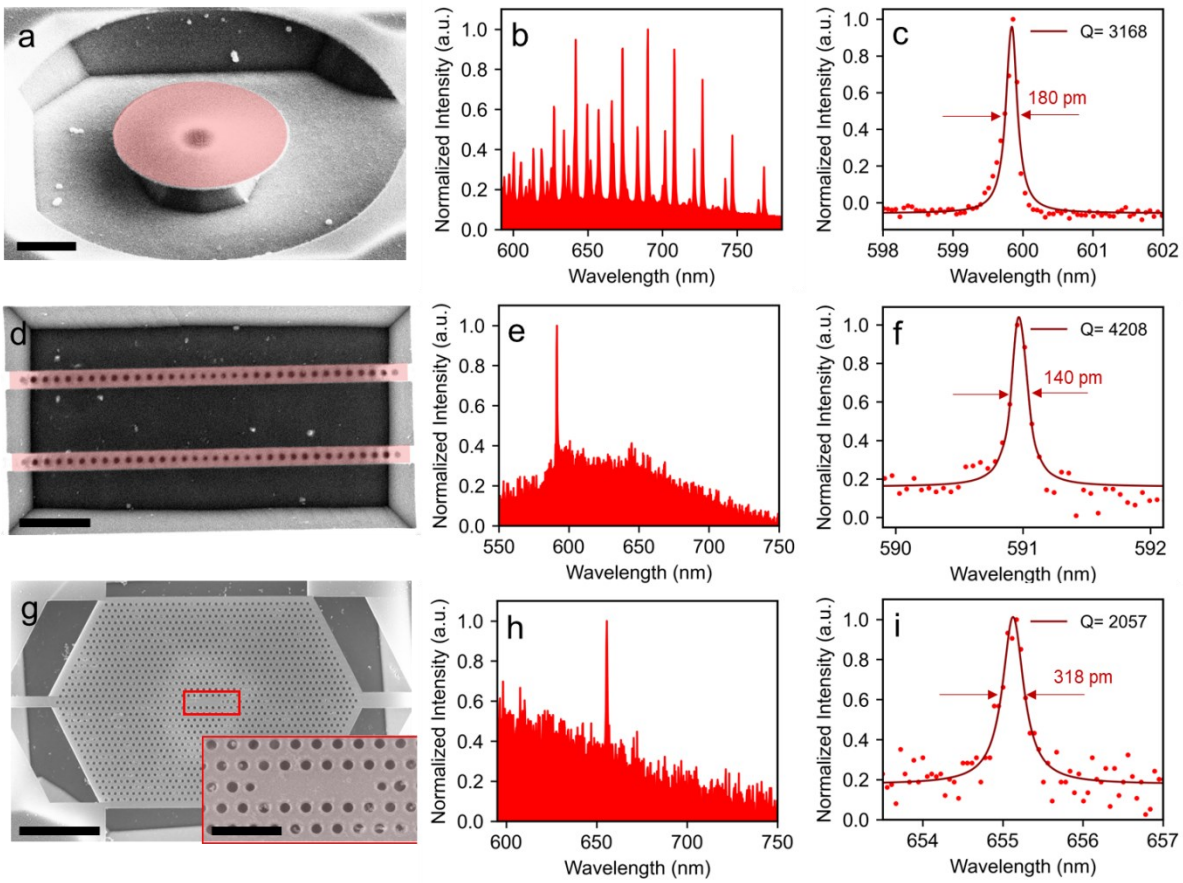

图 ***3.*** 光子谐振器的制备与表征。（*a*、*d*、*g*）分别为悬空六方氮化硼微盘谐振器、一维光子晶体腔和二维光子晶体腔的伪彩色扫描电子显微镜图像。（*a*、*d*）和（*g*）中的比例尺分别对应 *1*、*1* 和 *4 μm*。（*g*）插图——二维光子晶体腔中心区域的放大扫描电子显微镜图像。比例尺对应 *1 μm*。（*b*、*e*、*h*）显示微盘腔中的回音壁模以及一维和二维光子晶体腔中的谐振的光致发光光谱。（*c*、*f*、*i*）显示光学腔模线宽的高分辨率光致发光光谱。采用洛伦兹函数对数据进行拟合，以获得谐振品质因数（$\lambda/\Delta\lambda$）。

最后，我们利用单晶六方氮化硼薄片制备了一个悬空集成量子光子学电路的概念验证样品 。图4a展示了该六方氮化硼集成量子光子学电路的光学图像。硅衬底上的剥离六方氮化硼薄片尺寸足够大，可容纳这个 50 μm x 25 μm 的电路；电路在光学图像中呈矩形区域。对比度差异是由选择性底切刻蚀工艺造成的——电路下方的区域经氢氧化钾溶液化学刻蚀，刻蚀液通过图4d中可见的大型矩形孔进入硅衬底。该平台由六方氮化硼薄板中的空气孔阵列构成，具体而言，是一个节距为 300 nm、空气孔半径为 100 nm 的六角晶格。为实现波导功能，我们去掉了一排孔。对于锥形波导，我们采用了带空气间隙的三角形耦合器，以使光子晶体波导内导波的横截面逐渐收窄。

使用 COMSOL Multiphysics 软件对光子晶体波导中的电磁场导光进行了数值模拟。导引波的电场分布

如图4b、c所示，其中在波导左侧输入了线性偏振电场（面外）。根据模拟结果，可在锥形和直波导结构中实现低损耗导波和传播。图4d展示了集成量子光子学电路的俯视扫描电子显微镜图像。图中展示了三个主要部分，分别是数据生成（红框）、操控（青色）和探测（绿色）。图4(e –g)展示了这些部分的高倍扫描电子显微镜图像。请注意，该集成量子光子学芯片并非针对任何特定操作而设计，而是展示了如何利用稳健的纳米加工方法，在单片悬空的六方氮化硼薄片中制造所有必需的组件，包括耦合器、波导、光子晶体腔、路由器、分束器和出耦合器。

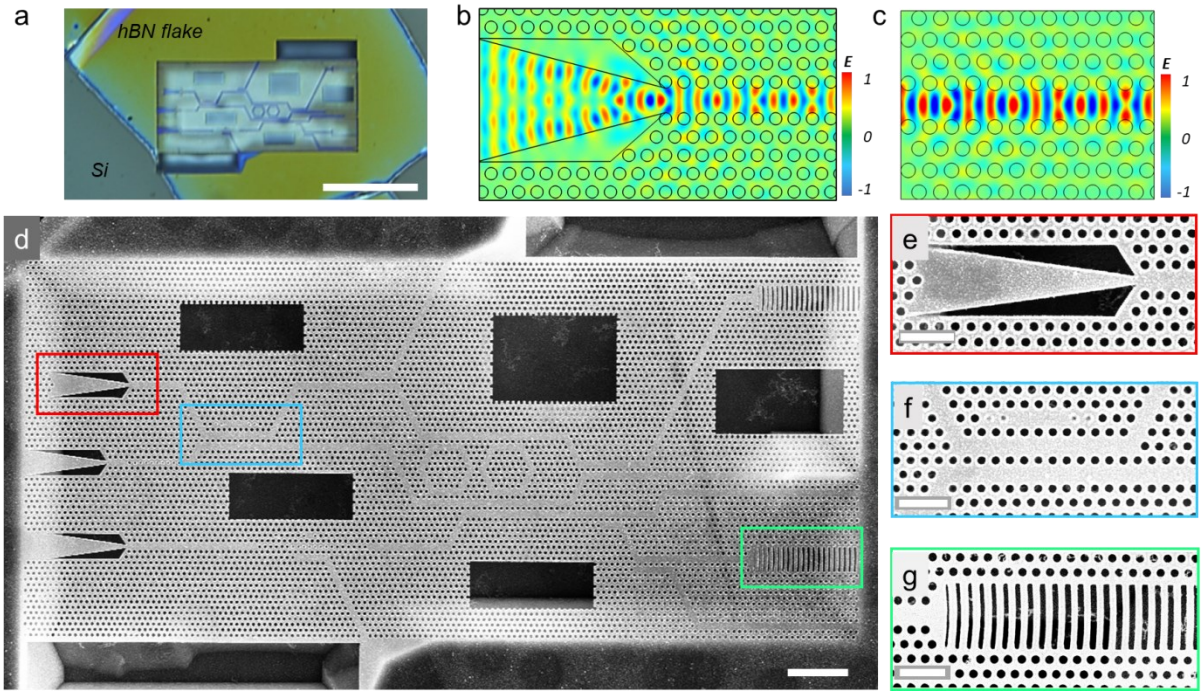

图***4***。 由单晶六方氮化硼制成的悬空片上集成量子光子学电路。（*a*）嵌入剥离六方氮化硼薄片中的悬空结构的光学图像。比例尺对应 *20 μm*。渐缩（*b*）和直线型（*c*）光子晶体波导的模拟电场分布。两种模拟中，平面外电场均以 *600 nm* 的波长从波导结构左侧入射。（*d*）电路的俯视扫描电子显微镜图像。比例尺对应 *3 μm*。红色、青色和绿色方框标出了三个元件，其放大图分别见（*e*）、（*f*）和（*g*），对应光子生成、操控和探测。（*e*）至（*g*）中的比例尺对应 *1 μm*。

总而言之，我们开发出了一套可靠且稳健的工艺方案，用于以六方氮化硼构建量子光子学电路。具体而言，我们实现了微盘腔、一维和二维光子晶体腔，以及一整套由六方氮化硼制成的悬空单片式集成量子光子学芯片。悬空架构增强了光限制；测得的一维光子晶体腔Q因子超过 4000。我们的工作

标志着朝着在六方氮化硼中集成量子发射体和可扩展量子光子元件迈出了重要一步。该工作展示了一条实现先进自旋—光子接口的可行路径，并展现了六方氮化硼在量子光机学以及基于量子发射体与光子谐振器之间强耦合的应用中的潜力。借助片上低损耗波导和光学腔构成的系统，集成量子光子学可提供相干量子电路，执行量子态生成、操控和信息探测等核心量子任务。

致谢

本工作得到澳大利亚研究理事会（CE200100010、DE220101085、DP220102152）和海军研究局全球办公室（N62909-22-1-2028）的支持。

参考文献

1. Wang, J.; Sciarrino, F.; Laing, A.; Thompson, M. G. 集成光子量子技术。《自然·光子学》**2020年，**14, (5), 273-284. 2. Moody, G.; Sorger, V. J.; Blumenthal, D. J.; Juodawlkis, P. W.; Loh, W.; Sorace- Agaskar, C.; Jones, A. E.; Balram, K. C.; Matthews, J. C.; Laing, A. 2022年集成量子光子学路线图。《物理学杂志：光子学》**2022年，**4, (1), 012501. 3. Pelucchi, E.; Fagas, G.; Aharonovich, I.; Englund, D.; Figueroa, E.; Gong, Q.; Hannes, H.; Liu, J.; Lu, C.-Y.; Matsuda, N. 集成光子学在量子技术中的潜力与全球展望。《自然评论：物理学》**2022年，**4, (3), 194-208. 4. Kim, J.-H.; Aghaeimeibodi, S.; Carolan, J.; Englund, D.; Waks, E. 片上量子光子学的混合集成方法。《光学》**2020年，**7, (4), 291-308. 5. Wan, N. H.; Lu, T.-J.; Chen, K. C.; Walsh, M. P.; Trusheim, M. E.; De Santis, L.; Bersin, E. A.; Harris, I. B.; Mouradian, S. L.; Christen, I. R.; Bielejec, E. S.; Englund, D. 混合光子电路中人工原子的大规模集成。自然**2020年，**583, (7815), 226-231. 6. Rugar, A. E.; Aghaeimeibodi, S.; Riedel, D.; Dory, C.; Lu, H.; McQuade, P. J.; Shen, Z.-X.; Melosh, N. A.; Vučković, J. 金刚石中锡-空位中心的量子光子接口。《物理评论*X*》**2021,**11, (3), 031021. 7. Sipahigil, A.; Evans, R. E.; Sukachev, D. D.; Burek, M. J.; Borregaard, J.; Bhaskar, M. K.; Nguyen, C. T.; Pacheco, J. L.; Atikian, H. A.; Meuwly, C.; Camacho, R. M.; Jelezko, F.; Bielejec, E.; Park, H.; Loncar, M.; Lukin, M. D. 用于量子光学网络的集成金刚石纳米光子学平台。《科学》**2016年，**354, (6314), 847-850. 8. Bracher, D. O.; Zhang, X.; Hu, E. L. 碳化硅色心中两个紧密关联的零声子跃迁的选择性珀塞尔增强。《美国国家科学院院刊》**2017年，**114, (16), 4060-4065. 9. Rattenbacher, D.; Shkarin, A.; Renger, J.; Utikal, T.; Götzinger, S.; Sandoghdar, V. 单分子与片上环形谐振器的相干耦合。《新物理学杂志》**2019年，**21, (6), 062002. 10. Schöll, E.; Hanschke, L.; Schweickert, L.; Zeuner, K. D.; Reindl, M.; Covre da Silva, S. F.; Lettner, T.; Trotta, R.; Finley, J. J.; Müller, K.; Rastelli, A.; Zwiller, V.; Jöns, K. D. 光子不可区分性接近100%的砷化镓量子点共振荧光。《纳米快报》**2019年，**19, (4), 2404-2410. 11. Davanco, M.; Liu, J.; Sapienza, L.; Zhang, C.-Z.; De Miranda Cardoso, J. V.; Verma, V.; Mirin, R.; Nam, S. W.; Liu, L.; Srinivasan, K. 用于片上

量子光子电路的单量子点器件异质集成。《自然·通讯》2017, 8, (1), 889. 12. Schrinner, P. P. J.; Olthaus, J.; Reiter, D. E.; Schuck, C. 基于金刚石的量子发射体与纳米光子电路的集成。纳米快报 2020, 20, (11), 8170-8177. 13. Toninelli, C.; Gerhardt, I.; Clark, A. S.; Reserbat-Plantey, A.; Gotzinger, S.; Ristanovic, Z.; Colautti, M.; Lombardi, P.; Major, K. D.; Deperasinska, I.; Pernice, W. H.; Koppens, F. H. L.; Kozankiewicz, B.; Gourdon, A.; Sandoghdar, V.; Orrit, M. 用于光子量子技术的单个有机分子。自然·材料 2021, 20, (12), 1615-1628. 14. Javadi, A.; Ding, D.; Appel, M. H.; Mahmoodian, S.; Löbl, M. C.; Söllner, I.; Schott, R.; Papon, C.; Pregnolato, T.; Stobbe, S. 纳米梁波导中的自旋–光子接口与自旋控制的光子切换。自然·纳米技术 2018, 13, (5), 398-403. 15. Zasedatelev, A. V.; Baranikov, A. V.; Sannikov, D.; Urbonas, D.; Sc afirimuto, F.; Shishkov, V. Y.; Andrianov, E. S.; Lozovik, Y. E.; Scherf, U.; Stöferle, T. 室温下的单光子非线性。自然 2021, 597, (7877), 493-497. 16. Dietrich, C. P.; Fiore, A.; Thompson, M. G.; Kamp, M.; Höfling, S. 砷化镓集成量子光子学：迈向紧凑且多功能的量子光子集成电路。激光与光子学评论 2016, 10, (6), 870-894. 17. Radulaski, M.; Zhang, J. L.; Tzeng, Y. K.; Lagoudakis, K. G.; Ishiwata, H.; Dory, C.; Fischer, K. A.; Kelaita, Y. A.; Sun, S.; Maurer, P. C. 纳米金刚石与光子器件的集成。激光与光子学评论 2019, 13, (8), 1800316. 18. Martínez, J. A.; Parker, R. A.; Chen, K. C.; Purser, C. M.; Li, L.; Michaels, C. P.; Stramma, A. M.; Debroux, R.; Harris, I. B.; Appel, M. H. 纳米结构金刚石中锡-空位中心的光子不可区分性。《物理评论快报》2022, 129, (17), 173603. 19. Stas, P. J.; Huan, Y. Q.; Machielse, B.; Knall, E. N.; Suleymanzade, A.; Pingault, B.; Sutula, M.; Ding, S. W.; Knaut, C. M.; Assumpcao, D. R.; Wei, Y. C.; Bhaskar, M. K.; Riedinger, R.; Sukachev, D. D.; Park, H.; Loncar, M.; Levonian, D. S.; Lukin, M. D. 具有集成式错误检测功能的稳健多量子比特量子网络节点。《科学》2022, 378, (6619), 557-560. 20. Boissier, S.; Schofield, R. C.; Jin, L.; Ovvyan, A.; Nur, S.; Koppens, F. H. L.; Toninelli, C.; Pernice, W. H. P.; Major, K. D.; Hinds, E. A.; Clark, A. S. 光子黑箱中单分子的相干表征。自然·通讯 2021, 12, (1), 706. 21. Iff, O.; Buchinger, Q.; Moczała-Dusanowska, M.; Kamp, M.; Betzold, S.; Davanco, M.; Srinivasan, K.; Tongay, S.; Antón-Solanas, C.; Höfling, S.; Schneider, C. 基于确定性放置于圆形布拉格光栅腔中的二硒化钨单层量子点的Purcell增强单光子源。纳米快报 2021, 21, (11), 4715-4720. 22. Li, L.; Schröder, T.; Chen, E. H.; Walsh, M.; Bayn, I.; Goldstein, J.; Gaathon, O.; Trusheim, M. E.; Lu, M.; Mower, J.; Cotlet, M.; Markham, M. L.; Twitchen, D. J.; Englund, D. 金刚石中纳米腔增强量子比特的相干自旋控制。自然·通讯 2015, 6, (1), 6173. 23. Caldwell, J. D.; Aharonovich, I.; Cassabois, G.; Edgar, J. H.; Gil, B.; Basov, D. N. 六方氮化硼光子学。自然·材料评论 2019, 4, (8), 552-567. 24. Kim, S.; Froch, J. E.; Christian, J.; Straw, M.; Bishop, J.; Totonjian, D.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Toth, M.; Aharonovich, I. 六方氮化硼光子晶体腔。自然·通讯 2018, 9, (1), 2623. 25. Fröch, J. E.; Hwang, Y.; Kim, S.; Aharonovich, I.; Toth, M. 六方氮化硼光子纳米结构。先进光学材料 2019, 7, (4), 1801344. 26. Li, C.; Froch, J. E.; Nonahal, M.; Tran, T. N.; Toth, M.; Kim, S.; Aharonovich, I. 六方氮化硼量子发射体在单片制造波导中的集成。美国化学会光子学 2021, 8, (10), 2966-2972. 27. Ren, T.; Song, P.; Chen, J.; Loh, K. P. 单层二硫化钨-六方氮化硼光学腔中的回音壁模式。美国化学会光子学 2018, 5, (2), 353-358. 28. Froch, J. E.; Li, C.; Chen, Y.; Toth, M.; Kianinia, M.; Kim, S.; Aharonovich, I. 六方氮化硼中腔耦合发射体的珀塞尔增强。小型 2022, 18, (2), e2104805. 29. Liu, C.-H.; Zheng, J.; Colburn, S.; Fryett, T. K.; Chen, Y.; Xu, X.; Majumdar, A. 超薄范德华超透镜。纳米快报 2018, 18, (11), 6961-6966.

30. Proscia, N. V.; Jayakumar, H.; Ge, X.; Lopez-Morales, G.; Shotan, Z.; Zhou, W.; Meriles, C. A.; Menon, V. M. 六方氮化硼中的微腔耦合发射体。**2020年，** 9, (9), 2937-2944. 31. Qian, C.; Villafañe, V.; Schalk, M.; Astakhov, G. V.; Kentsch, U.; Helm, M.; Soubelet, P.; Wilson, N. P.; Rizzato, R.; Mohr, S.; Holleitner, A. W.; Bucher, D. B.; Stier, A. V.; Finley, J. J. 通过腔增强发射揭示硼空位中心的零声子线。《纳米快报》**2022年，** 22, (13), 5137-5142. 32. Harris, N. C.; Bunandar, D.; Pant, M.; Steinbrecher, G. R.; Mower, J.; Prabhu, M.; Baehr-Jones, T.; Hochberg, M.; Englund, D. 硅基大规模量子光子电路。《纳米光子学》**2016年，** 5, (3), 456-468. 33. Kühner, L.; Sortino, L.; Tilmann, B.; Weber, T.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Maier, S. A.; Tittl. 六方氮化硼超表面助力实现覆盖整个可见光谱的高Q值纳米光子学。*arXiv*预印本 *arXiv:2210.11314* **2022**年。34. Crook, A. L.; Anderson, C. P.; Miao, K. C.; Bourassa, A.; Lee, H.; Bayliss, S. L.; Bracher, D. O.; Zhang, X.; Abe, H.; Ohshima, T. 相干自旋控制下单个碳化硅色心的珀塞尔增强。《纳米快报》**2020年，** 20, (5), 3427-3434. 35. Sun, S.; Zhang, J. L.; Fischer, K. A.; Burek, M. J.; Dory, C.; Lagoudakis, K. G.; Tzeng, Y.-K.; Radulaski, M.; Kelaita, Y.; Safavi-Naeini, A. 固体中单个色心的腔增强拉曼发射。《物理评论快报》**2018年，** 121, (8), 083601.