

碳化硅集成光子学研究进展

王成立^{1,2}, 蔡佳辰^{1,2}, 周李平^{1,2}, 伊艾伦¹, 杨秉承^{1,2}, 秦源浩^{1,2}, 张加祥^{1,2*}, 欧欣^{1,2*}¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所集成电路材料全国重点实验室, 上海 200050;²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 凭借优异的材料与光学特性, 第三代半导体——碳化硅材料在集成光子学领域发展迅速并获得广泛关注。当前碳化硅材料正逐渐发展为可与 CMOS 工艺兼容的优异光子学材料平台。受益于高非线性系数和低光学损耗特性, 碳化硅材料已广泛应用于多种片上非线性光学效应的实现, 如高效二次谐波、快速电光调制和孤子光学频率梳产生等。同时与金刚石类似, 碳化硅材料具有性能优异的二能级固体自旋色心, 基于碳化硅色心与谐振腔的腔量子电动力学效应在近年来也得到广泛研究。综合近几年来国内外在碳化硅光子学上的研究现状, 介绍碳化硅在集成非线性光学和集成量子光学领域中的最新研究进展, 并就碳化硅光子学的未来发展趋势进行展望和讨论。

关键词 光子器件; 碳化硅; 非线性光子学; 量子光学; 集成光路

中图分类号 O437

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230960

1 引言

不断更新迭代的信息传输和处理技术是现代社会发展的重要驱动引擎。从 1966 年高锟提出超低损耗光纤的实现方案以来^[1], 高速、大带宽、大容量光纤通信技术在全球范围内飞速发展。当前, 依赖于微电子信息处理技术的集成电路产业已达到前所未有的速度和效率。然而, 随着大数据、云计算、人工智能和量子计算等新一代信息技术的兴起, 人们对信息传输和处理能力的要求在不断提升。目前仅依靠高密度集成和晶体管微缩来优化集成电路芯片信息处理速度的路径已经难以为继, 许多替代性方案被提出。

在“后摩尔时代”下的众多差异化发展路线中, 集成光子技术有望成为一种颠覆性技术。由于光子在质量和电荷等物理属性上的独特性, 以光子为信息处理载体的集成光子技术在通信容量、传输速度、计算功耗和抗干扰性方面具有更大的优势, 有望满足人们对下一代通信技术的性能要求。自 1969 年集成光学的相关概念提出以来, 集成光学已取得了长足的进步, 许多光子集成芯片相关的制造路线也被相继提出^[2-3]。集成光学技术与集成电路技术的发展具有显著的差异, 光子集成制造路线的实现材料平台特性有着更强的依赖性, 基于许多材料平台如硅^[3]、III-V 族化合物^[4]、二氧化硅^[5]和铌酸锂^[6]等的技术途径得到广泛研究, 表

1 列出了主要的几种光子平台的性能。

早期集成光子器件采用的材料平台是二氧化硅和 III-V 族化合物^[7]。二氧化硅集成光子器件继承了光纤的优良特性, 具有极低的光学损耗和良好的耦合特性^[5, 8]。但是在进一步的发展中, 二氧化硅材料因为折射率较低和多种光电特性缺失而逐步被认为不适用于大规模光子集成芯片的功能层中。当前, 利用材料的低折射率、低光学损耗和工艺兼容特性, 二氧化硅主要作为光学绝缘层用于集成光子器件中。III-V 族化合物为直接带隙半导体, 具有较高的电致发光效率, 故由 III-V 族化合物制备的半导体激光器在光子学领域发挥着不可替代的作用^[4, 9]。如表 1 所示, III-V 族化合物具有高折射率、大的二阶和三阶非线性等特点, 所以一直以来 III-V 族化合物作为集成光子平台备受科研界和产业界的关注。尽管 III-V 族半导体材料潜力巨大, 其光学传播损耗相对较大(来源于带隙跃迁或者材料的非线性吸收)、透明窗口较窄和对先进制程要求更高的特点也造成了在实际应用的一些挑战^[3]。

受益于集成电路中成熟的加工工艺, 基于硅材料的集成光子学在过去近三十年里已发展成为集成光子芯片的主要材料平台^[3, 10]。硅光子集成芯片主要通过绝缘体上硅(SOI)衬底来实现^[3], SOI 衬底可以在不增加额外成本的前提下兼容高度成熟的微电子制造工艺(即 CMOS 兼容性), 使得硅基光子学能够跟随集成

收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-06-18; 录用日期: 2023-06-27; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFA1404601)、国家自然科学基金(62293520, 62293521, 12074400, 62205363)、中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(YSTR-69)、上海市“科技创新行动计划”基础研究领域项目(20JC1416200, 22JC1403300)

通信作者: *ouxin@mail.sim.ac.cn; **jiexiang.zhang@mail.sim.ac.cn

表 1 典型光子集成平台的主要性能参数对比

Table 1 Comparison of main performance parameters between typical photonic integrated platforms

| Parameter | Si | SiN | LN | SiC | GaAs |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Transparent window / μm | 1.1-5.5 | 0.3-4.6 | 0.35-5.5 | 0.37-5.6 | 0.9-17.3 |
| Refractive index | 3.5 | 1.98 | 2.2 | 2.6 | 3.4 |
| $\chi^2 d_{ij} / (\text{pm}\cdot\text{V}^{-1})$ | N. A. | N. A. | $d_{33}=25.2$ | $d_{33}=-13--24$ | $d_{14}=105$ |
| Electro-optical effect / ($\text{pm}\cdot\text{V}^{-1}$) | Carrier plasma | N. A. | $r_{33}=30.8$, Pockels | $r_{33}=1.8$, Pockels | N. A. |
| $\chi^3 / (10^{-7} \text{cm}^2\cdot\text{GW}^{-1})$ | 450 | 24 | 18 | 60-80 | 1590 |
| Propagation loss / ($\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$) | 1 | 0.01 | 0.027 | 0.15 | 4 |
| Single photon source | Probabilistic $\chi^{(3)}$, RT | Probabilistic $\chi^{(3)}$, RT | Probabilistic $\chi^{(2)}$, RT | Color centers, RT | Quantum dot, cryogenic |

电路产业的脚步发展。现如今,硅基光子集成芯片已经具有完整的设计、代工和封测产业链。对于硅光子 SOI 材料,供应商主要为 Soitec 公司(法国)、新傲科技公司(中国)、信越公司(日本)等。对于硅基光电子芯片流片,国外厂商主要包括 IMEC 公司(比利时)、AMF 公司(新加坡)、AIM photonics 公司(美国)、VTT 公司(芬兰)、STMicroelectronics 公司(瑞士)等;国内起步相对较晚,目前中国科学院微电子研究所现已具备实现完整硅基光子集成芯片的流片能力,另外中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中芯国际等国内研究机构和企业仍在逐步进行硅光工艺线的搭建和完善。现在硅基光电子芯片市场内的产品研发主要布局在单片集成、光电模块封装和光耦合等方面,例如:思科旗下 Acacia 公司的可插拔光模块实现了除激光器以外的单片光子集成和高成品率的光电封装^[11-12]; Intel 公司利用键合技术而非复杂的封装工艺直接对激光器和硅光子芯片进行片上集成,并且实现了首个与以太网交换机共同封装的光模块^[13]。上述这类产品将在数据中心、激光雷达、光计算和传感领域有着重要的实际应用^[3]。尽管硅基光子学已经取得了显著的成功,但以硅材料为功能层的集成光子芯片仍然面临着一些来源于材料光电特性方面的困扰^[3],如硅无法发光、硅材料光学损耗较大、缺乏本征二阶非线性效应和 Pockels 效应等。

近年来,具有不同功能的光电材料平台被用于集成光子学研究,这些新兴材料包括具有优异电光效应的铁电晶体铌酸锂^[6]、具有低光学损耗的无定形介质氮化硅^[14]等。目前,绝缘体上铌酸锂(LNOI)被认为是最具有前景的集成光子平台之一,铌酸锂具有的丰富材料功能属性为 LNOI 在集成光子学中的应用提供了广阔的空间^[15-17]。然而,铌酸锂在集成光子学的实际应用中仍然存在一定的挑战,比如铌酸锂材料与 CMOS 工艺不兼容特性将导致光子芯片在大规模量产时成本较高^[18],且铌酸锂材料本身在功率耐受性、光折变方面的表现给较高功率下的应用场景带来了不稳

定性^[6,19]。氮化硅为片上实现超低损耗的集成光子学平台提供了一个极佳的方案。除了极低的光学损耗,氮化硅也具有许多优异的非线性光子学特性,目前芯片级的光学频率梳的研究主要是在氮化硅平台上发展而来的^[20-22]。但考虑到低损耗的氮化硅是非晶的介质薄膜,其在某些功能性上(如二阶非线性系数、光源特性、电学调控性能等)尚有不足,因而在许多应用场景下通常需要采用氮化硅与铌酸锂、氮化铝等材料异质集成的方案来获得快速可重构功能。

从上述对集成光子学的材料平台介绍可知,光子集成化的道路与微电子领域存在显著差异。光子集成平台所需要的材料光电性能更为丰富,即一个理想的光子集成平台必须具备多个关键特性,包括低损耗、可集成光源、电光效应、光电探测和大规模集成(与 CMOS 兼容)等,然而目前单一材料光子集成平台无法同时满足上述要求。对于集成光子学材料平台,窄带隙材料(通常为半导体,如硅、锗、III-V 族材料等)折射率较大,材料属性赋予其光生伏特、电致发光等丰富的光电效应,同时也产生了光学吸收损耗大、透明窗口窄的问题,而宽带隙材料(通常为绝缘体,如氮化硅、氧化硅等)虽然具有极低的光学损耗,但是难以体现出明显的光电特性。出于平衡的意义考虑,采用宽禁带的半导体材料作为集成光子学平台是一种更为综合的方案,相关的研究在近年来备受关注^[23]。作为宽禁带半导体中的代表性材料,碳化硅(SiC)长期以来在电力电子和射频功放等领域得到广泛使用,然而目前碳化硅集成光子学方面的研究及相关产业化应用尚处于起始阶段。

相比于先前介绍的光子学材料平台,碳化硅具有相对综合的光电特性。首先,碳化硅广泛应用于高功率电子行业,其大尺寸晶圆材料制备工艺已发展成熟。其次,碳化硅的带隙为 2.4~3.2 eV,对应于紫外到中红外光学宽透光窗口(0.37~5.6 μm)。其三,碳化硅具有较大的二阶非线性系数(30 pm/V)^[24],这使得在碳化硅平台上实现高效的频率转换和低损耗的电光调

制成为可能,另外碳化硅大的三阶非线性系数($10\sim 18\text{ m}^2/\text{W}$)也为片上光学频率梳的产生提供了基础。其四,碳化硅材料的微结构加工工艺可以与 CMOS 技术兼容,在降低加工成本的同时可以提升器件加工的效率 and 可靠性。其五,在量子光学领域,与金刚石的性质类似^[25],碳化硅中具有种类丰富的固态量子光源——色心,典型色心包括硅空位色心(单硅原子空位)、双空位色心(碳原子空位与硅原子空位)和氮替位硅空位色心(间隙式氮原子与硅原子空位)等,这些色心具有优异的自旋相干性质^[26-27],使得碳化硅能够成为未来实现片上量子信息处理的重要平台^[28]。上述非线性光学和量子光学性质使碳化硅材料已发展成为极具竞争性的集成光子学平台之一。目前,碳化硅的优异光电特性已经吸引了大量研究单位在碳化硅非线性光子学、碳化硅集成光量子学等领域开展丰富并系统的研究^[29]。

2 绝缘体上碳化硅薄膜制备及其光学损耗表征

碳化硅是一种丰富多晶型的宽禁带半导体。到目前为止,已发现碳化硅存在超过 250 种晶型,其中 3C-、4H-和 6H-碳化硅晶型因能够稳定生长而得到广泛使用。早期碳化硅光子学的研究集中在同质外延的 4H-碳化硅薄膜^[30]或异质外延的 3C-碳化硅薄膜^[31],在这两种平台中,由于碳化硅外延层通常生长在高折射率硅或者碳化硅材料上,光场的局域需要通过悬空工艺使得碳化硅与衬底层隔离,从而使得制备的集成光子器件可靠性和可集成性不足。解决这一问题的途径是发展类似 SOI 和 LNOI 的碳化硅薄膜光子学材料平台,即在氧化硅层上制备碳化硅,形成绝缘体上碳化硅(SiCOI)薄膜^[32-34]。由于氧化硅和碳化硅间存在较高折射率差(约 1.13),所以光场无需悬空工艺就可以被很好地约束在碳化硅层内。

2.1 硅基 3C-SiCOI 薄膜制备技术

3C-碳化硅具有立方晶向,可以通过异质外延的方法直接在硅衬底上生长。然而由于晶格常数失配,异质外延生长的 3C-碳化硅薄膜中尤其在界面处存在大量的晶格缺陷且无法形成绝缘体上薄膜的结构,因此具有较大的光学损耗。2018 年,美国佐治亚理工大学 Fan 等^[35]发展了一种结合异质外延、晶圆键合和研磨减薄的方法,将 3C-碳化硅薄膜制备在绝缘体衬底上,如图 1(a)所示。整个制备过程始于在 Si 基底上外延生长出 3C-碳化硅层;然后利用化学机械抛光(CMP)工艺对其进行抛光和减薄,以获得所需厚度的 3C-碳化硅薄膜;之后使用原子层沉积的方法在抛光的 3C-碳化硅薄膜上沉积厚度为 30 nm 的氧化硅层,以提供具有较低粗糙度和更高结合强度的亲水性结合界面;此外,利用湿氧化法在另外一片硅晶圆上生长了 4 μm 厚的氧化硅绝缘层,并利用低温(300 $^{\circ}\text{C}$)的亲水性晶

圆键合工艺对 3C-碳化硅和氧化硅进行键合;最后将键合结构顶部的硅和一部分 3C-碳化硅通过机械研磨的方式去除。图 1(a)显示了利用该方法制备的一片面积为 2 cm \times 2 cm 的 3C-SiCOI 薄膜。为解决在外延初始阶段晶格失配大量产生的问题,该方法巧妙地利用键合将外延初始界面的薄膜翻转至上层,再利用研磨减薄将其去除。图 1(b)和图 1(c)为扫描电子显微镜(EM)和透射电子显微镜(TEM)照片,展示了这种方法对晶格缺陷的有效控制效果。该方法制备的微环谐振腔的最高 Q 值为 2.42×10^5 ,该值还远未达到碳化硅的本征损耗值,故其损耗的进一步降低仍需依赖于对制备方法中晶格缺陷的控制^[30]。在该课题组后续的研究中,发现将图 1(a)制备流程中外延层厚度设置为 5 μm 以上即可得到极少外延缺陷的顶层碳化硅薄膜,但其光学损耗仍然有待验证。

2.2 基于离子注入剥离与转移的 4H-SiCOI 薄膜制备技术

相比于 3C-碳化硅,4H-碳化硅具有更大的折射率,并且 4H-碳化硅因更大的带隙而在功率电子领域被广泛采用,目前其具有非常成熟的晶圆生长和加工基础。然而需要注意的是,4H-碳化硅具有超高的生长温度(超过 1350 $^{\circ}\text{C}$),故难以在硅基底上直接外延生长 4H-碳化硅薄膜。目前,一种可行的制备硅基底上的 4H-碳化硅单晶薄膜材料方法是借鉴在 SOI 和 LNOI 制备中所采用的离子束剥离和衬底转移技术。

离子束剥离和衬底转移技术通常利用离子注入在晶格中形成的剥离缺陷层进行薄膜的转移,该方法可以将薄膜转移在多种衬底上,同时制备的薄膜具有高均匀性和低成本,故其已经在硅光子学和铌酸锂光子学中取得了巨大的成功。上海微系统与信息技术研究所和美国哥伦比亚大学的研究团队分别报道过采用该方法制备 4H-SiCOI 薄膜的工作^[32, 34, 37]。如图 2(a)所示,采用离子束剥离和衬底转移技术制备 4H-SiCOI 薄膜的基本物理原理是:在单晶 4H-碳化硅上直接注入 H/He 等轻元素离子,从而在 4H-碳化硅一定深度处埋入富含离子的气泡和孔洞,形成宏观的剥离缺陷层;之后再通过晶圆键合技术,将具有剥离缺陷层的 4H-碳化硅转移到硅基衬底(通常为 $\text{SiO}_2\text{-Si}$)上,并将 $\text{SiC-SiO}_2\text{-Si}$ 键合晶圆在一定温度下退火,此时聚集离子的膨胀作用将使表层 4H-碳化硅的薄膜转移到 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 衬底上,即形成了完整的 4H-SiCOI 结构的制备。由于经过离子注入的 4H-碳化硅薄膜存在一定的晶格损伤,转移之后的薄膜还需要进行 1100 $^{\circ}\text{C}$ 后退火处理,这种处理一方面可以增强键合强度,另一方面可以恢复材料晶格质量。此外,后处理工艺需要对碳化硅薄膜进行进一步的减薄和抛光,采用的减薄技术可以为氧化工艺和干法刻蚀工艺。2020 年,上海微系统与信息技术研究所的研究组采用离子束剥离和衬底转移技术制备的 4H-SiCOI 薄膜厚度偏差小于 0.2%,表面粗

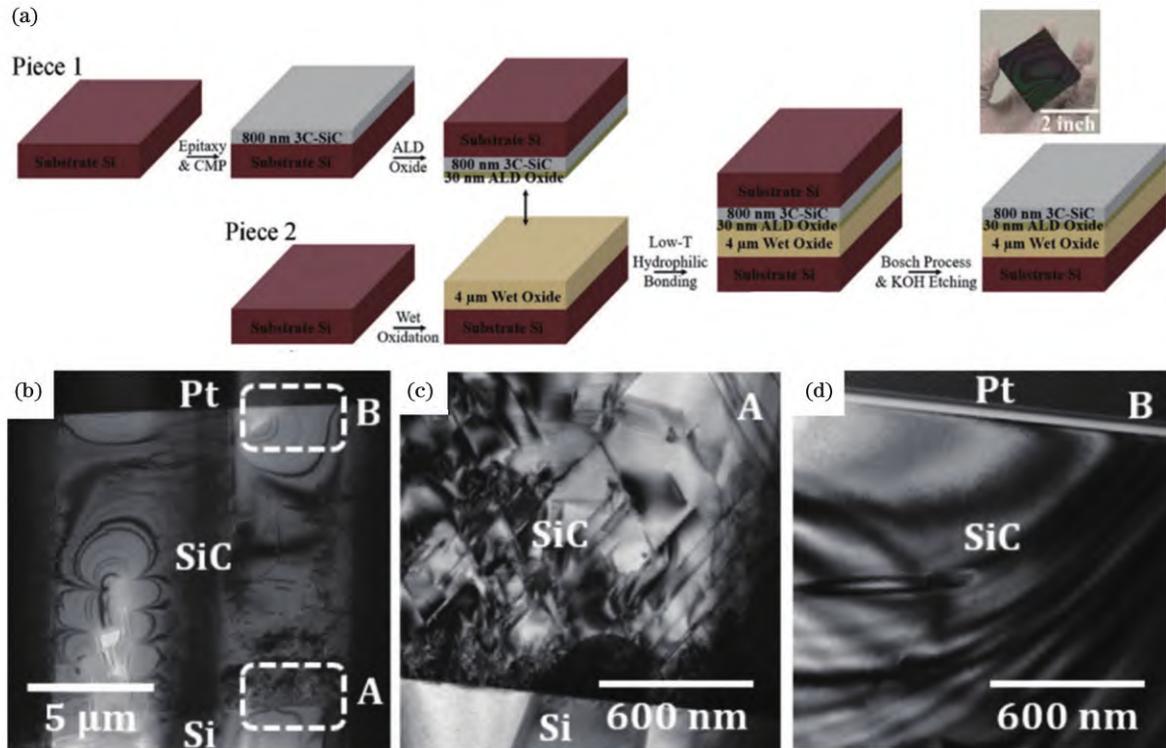


图 1 基于异质外延、晶圆键合和研磨减薄技术制备 3C-SiCOI^[35-36]。(a)制备流程;(b)3C-SiCOI各层的 SEM 图;(c)SEM 图中 A 区域的 TEM 图,在外延初始界面处显示有较多的晶格缺陷;(d)SEM 图中 B 区域的 TEM 图,在键合界面处显示晶格完好

Fig. 1 Fabrication of 3C-SiCOI based on heteroepitaxy, wafer bonding, and grinding thinning methods^[35-36]. (a) Preparation process; (b) SEM image of each layer of 3C-SiCOI; (c) TEM image of area A in the SEM image, showing more lattice defects at the initial epitaxial interface; (d) TEM image of region B in the SEM image, showing that the lattice is intact at the bonding interface

糙度小于 0.5 nm,转移面积可以高于 95%,X 射线衍射(XRD)的半峰全宽为 75.6",如图 2(c)和图 2(d)所示。该方法所制备的 16.5 μm 半径的碳化硅微环谐振器件的最高 Q 值为 7.3×10^4 。由于离子注入导致的本征材料吸收损耗难以被消除,基于离子注入剥离 4H-SiCOI 材料的微环谐振器性能的进一步提升存在较大挑战。

2.3 基于研磨减薄的 4H-SiCOI 薄膜制备技术

为了避免离子注入带来的光学损耗,一种采用直接键合体块碳化硅单晶后再进行机械研磨减薄碳化硅晶圆的方法(后文简称为“研磨减薄”方法)被提出^[38]。在半导体加工和封装领域,研磨减薄方法是获得晶体薄膜的常见工艺,如对硅晶圆的研磨减薄工艺已经发展为一种通用的工艺,在集成芯片封装等领域有着广泛的应用。然而,4H-碳化硅具有仅次于金刚石的莫氏硬度(4H-碳化硅为 9.2,金刚石为 10),如何对 4H-碳化硅进行高效的减薄以及在减薄过程中保持厚度的均匀性和薄膜的完整性是研磨减薄工艺流程的两大挑战。如图 3(a)所示,研磨减薄制备 4H-SiCOI 的流程始于在室温下直接键合 4H-碳化硅晶圆和氧化硅衬底。碳化硅晶圆初始厚度一般为 500 μm,然后利用研磨工艺将碳化硅晶圆厚度减薄至 10 μm 以下。由于研磨工艺对表面会造成 1 μm 左右的划痕,并且有可能使

晶圆发生解键合,因此需采用化学机械抛光工艺去除研磨的划痕,最终 4H-碳化硅层的精确厚度可以由干法刻蚀工艺和碳化硅的氧化工艺来确定。图 3(b)为研磨减薄工艺制备的 4H-SiCOI 单晶薄膜,碳化硅薄膜厚度分布如图 3(c)所示。通过对各个步骤的严格控制,整个 4H-SiCOI 晶圆大部分区域厚度不均匀性小于 1 μm。图 3(d)展示的是 1 cm×1.2 cm 大小的 4H-SiCOI 衬底材料,实验测量的平均厚度为 (800 ± 80) nm,该均匀性可满足大多数碳化硅集成光子学性能的实验室验证阶段的要求。对于需要更高均匀性的应用,如实现大量的光电器件晶圆级流片或者需求设计的高重复性,则需要进一步采用离子束研磨(ion beam trimming)工艺。

基于研磨减薄制备的 4H-SiCOI 薄膜保持了和利用升华法生长出的碳化硅体块单晶相同的晶体质量,而体块 4H-碳化硅单晶的本征吸收损耗在 1550 nm 通信波段约为 0.02 dB/cm^[40],所以该方法制备的 4H-SiCOI 薄膜具有极低的光学损耗。基于该方法,Song 等^[38]在 4H-SiCOI 上验证了 Q 值高达 6.3×10^5 的光子晶体微腔。在此之后,上海微系统与信息技术研究所课题组^[39]、美国卡耐基梅隆大学 Cai 等^[41]、斯坦福大学 Lukin 等^[42]在相似的薄膜制备技术路线上持续地将碳化硅光子学平台的光学损耗降低。2021 年,在研磨减

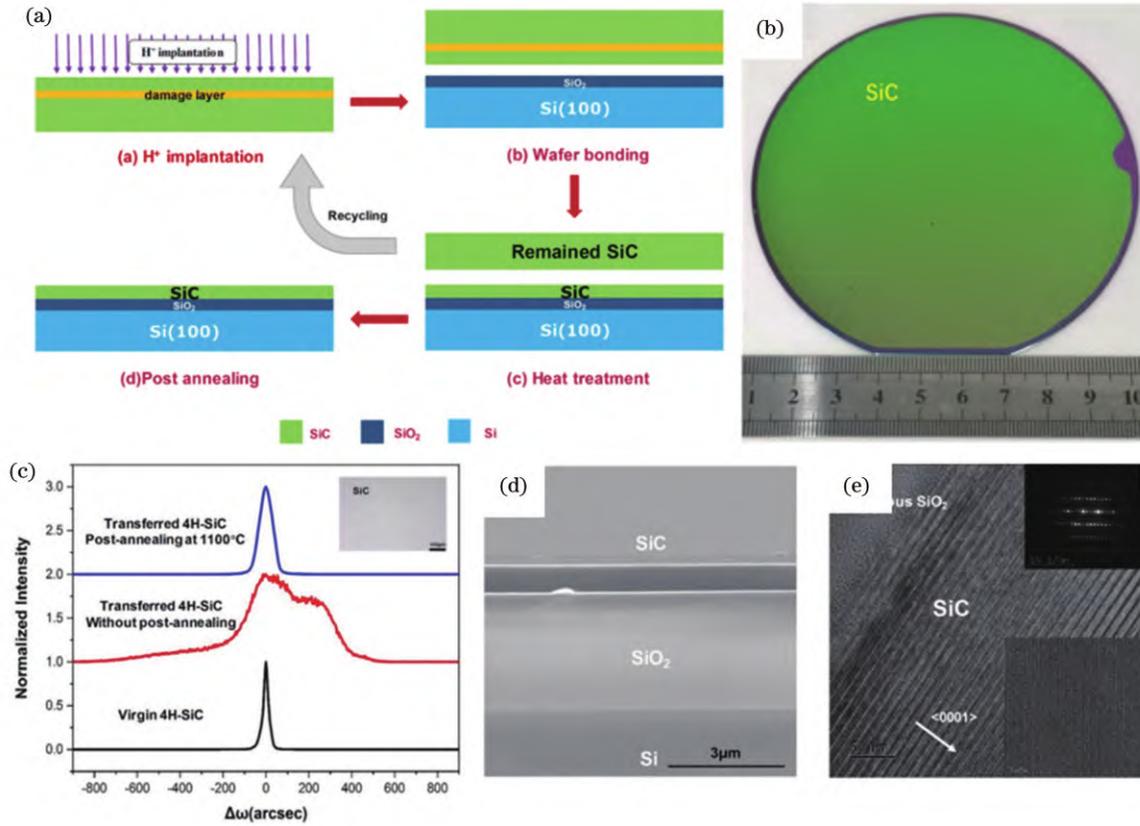


图 2 基于离子注入剥离与转移技术制备 4H-SiCOI^[37]。(a)制备流程;(b)所制备的 4H-SiCOI 的照片;(c)利用退火工艺对碳化硅层的晶格进行恢复的情况;(d)4H-SiCOI 各层的 SEM 图;(e)4H-SiCOI 的 TEM 图
 Fig. 2 Fabrication of 4H-SiCOI based on ion implantation and transfer method^[37]. (a) Preparation process; (b) photo of the prepared 4H-SiCOI; (c) lattice recovery of the SiC layer through the annealing process; (d) SEM image of each layer of 4H-SiCOI; (e) TEM image of 4H-SiCOI

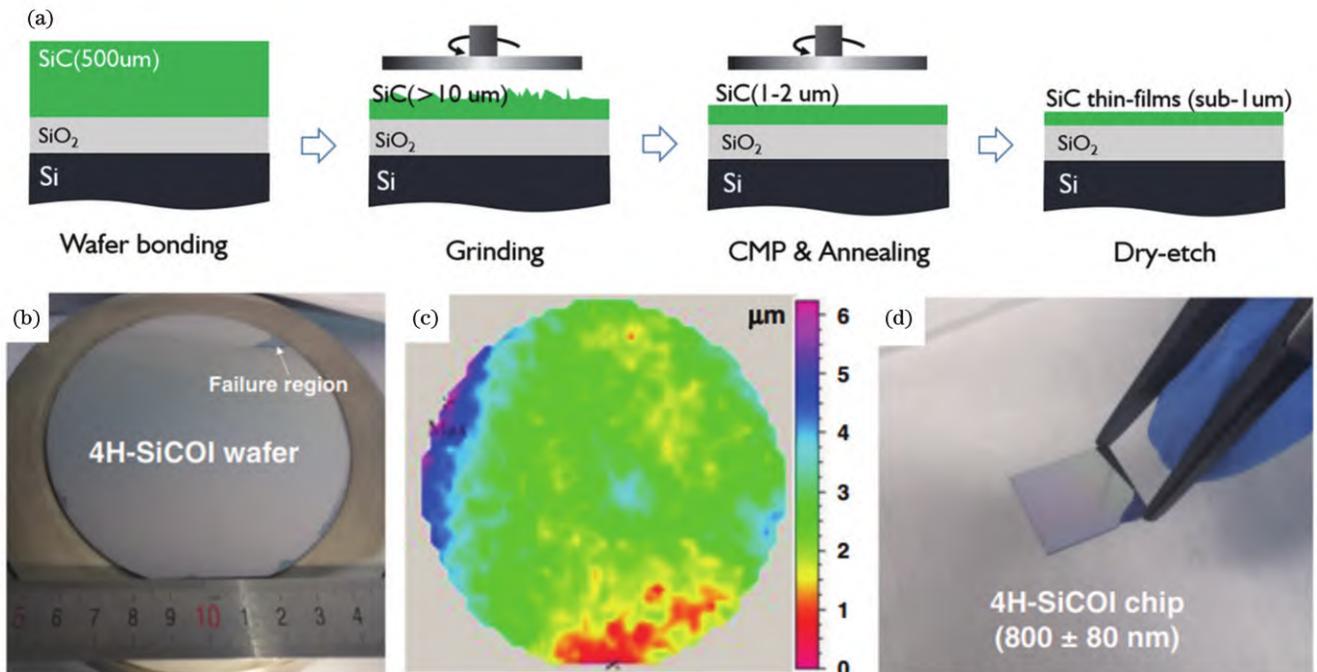


图 3 基于研磨减薄技术制备 4H-SiCOI^[39]。(a)制备流程;(b)所制备的 4H-SiCOI 的照片;(c)4H-SiCOI 薄膜均匀性表征;(d)所制备的面积为 10 mm×12 mm 的 4H-SiCOI 照片
 Fig. 3 Fabrication of 4H-SiCOI based on grinding and thinning method^[39]. (a) Preparation process; (b) photo of the prepared 4H-SiCOI; (c) uniformity characterization of the 4H-SiCOI film; (d) photo of the prepared 4H-SiCOI with an area of 10 mm×12 mm

薄制备的 4H-SiCOI 薄膜上验证的微盘谐振器最高 Q 值可达 7.1×10^6 , 该数值更进一步地接近体块 4H-碳化硅单晶所对应的本征吸收损耗^[39]。表 2 列出了所介

绍的主要几种 SiCOI 薄膜的光子器件的损耗对比, 可以看出, 研磨减薄制备的 4H-SiCOI 薄膜在制备极低损耗的光子器件方面具有显著的优越性。

表 2 几种 SiCOI 平台的光学损耗参数对比

Table 2 Optical loss comparison between several SiCOI photonic platform

| Material | Preparation method | Loss or Q | Reference |
|----------|--------------------------------|---|-----------|
| 4H-SiCOI | ion-cutting | 7 dB/cm (2360 nm) | [34] |
| 3C-SiCOI | epitaxy, bonding, and thinning | 1.42×10^5 (1561.3 nm) | [43] |
| 3C-SiCOI | epitaxy, bonding, and thinning | 1.39×10^5 (1561.3 nm) | [44] |
| 4H-SiCOI | ion-cutting | 7.3×10^4 (1549 nm) | [45] |
| 4H-SiCOI | bonding and thinning | 7.8×10^5 (1523 nm); 2.8×10^5 (924 nm) | [46-47] |
| 3C-SiCOI | epitaxy, bonding, and thinning | 2.42×10^5 (1550 nm); 1.12×10^5 (770 nm); 8.3×10^4 (650 nm) | [36] |
| 4H-SiCOI | bonding and thinning | 1.1×10^6 (1550 nm) | [48] |
| 4H-SiCOI | bonding and thinning | 5.61×10^6 (1550 nm) | [49] |
| 4H-SiCOI | bonding and thinning | 7.1×10^6 (1550 nm) | [39] |

3 碳化硅非线性光子学

碳化硅晶体具有很高的激光损伤阈值、较宽的透光范围、较大的二阶非线性光学系数、较大的折射率、高热导率及高化学稳定性等特点, 在输出高功率、高光束质量的中红外空间激光方面有着重要的应用价值。同时 SiCOI 为非线性光子学的研究和应用提供了良好的材料平台。在基于 SiCOI 的集成光子器件中, 光子波导^[32]、回音壁模微腔^[41-42]和光子晶体微腔^[42, 50-52]广泛用于非线性光子学研究。对于实现高效的非线性频率转换, 增强光与物质的相互作用至关重要, 故提高各类微腔的 Q 值是发展片上碳化硅集成非线性光子学的基础。如表 2 所示, 研磨减薄制备的 4H-SiCOI 薄膜在极低损耗的光子器件制备方面优越性显著, 使得许多高效的非线性频率转换 (如二阶非线性、三阶非线性和光学频率梳产生等) 在 SiCOI 平台上得以实现。

3.1 二次谐波频率转换

二次谐波产生是最经典的二阶非线性效应, 该过程的产生机理如下。两个频率为 ω 的光子在二阶非线性效应下会生成频率分量为 2ω 的二阶非线性极化强度, 其电磁理论的波动方程、二阶非线性极化强度表达式及相应的平面波非线性耦合波方程为

$$\nabla^2 E(\omega, z) + \mu_0 \omega^2 \epsilon E(\omega, z) = -\mu_0 \omega^2 P_{NL}(\omega, z), \quad (1)$$

$$P_{NL}^{(2)}(2\omega, z) = 2\epsilon_0 \chi^2(\omega, \omega): E(\omega, z) E^*(\omega, z), \quad (2)$$

$$\frac{dE(2\omega, z)}{dz} = 2 \frac{i\omega^2}{k_{2\omega} c^2} [\chi^2(\omega, \omega): a(2\omega) a(\omega) a(\omega)] E^2(\omega, z) e^{i\Delta k z}, \quad (3)$$

式中: χ^2 为二阶非线性系数; P_{NL} 为非线性极化强度; Δk 为相位失配量; a 为光场振动方向的单位矢量。可以看出二阶非线性极化强度能够进一步地产生频率为 2ω 的光子, 即二次谐波。根据这个原理, 碳化硅中心非对称的晶格结构赋予了碳化硅较大的 χ^2 (有效非线

性光学系数 $d_{33} = -13 \sim -24$ pm/V), 使其能被广泛地用于二次谐波的高效产生。最早关于碳化硅薄膜中二次谐波效应的研究是在 6H-SiCOI 中进行的, Yamada 等^[53]制备了 Q 值为 1×10^4 的 L3 型二维光子晶体微腔, 在最大输入功率为 0.17 mW 时, 二次谐波的转换效率估计为 0.15 W^{-1} 。该工作首次实现了在碳化硅微腔中的二次谐波产生, 但受限于 6H-SiCOI 薄膜中较大的光学吸收损耗, 所验证的二次谐波转换效率较低。2019 年, 同一课题组^[38]对碳化硅的材料平台和光子晶体的设计进行了改进, 得到了超高 Q 值 (6.3×10^5) 的光子晶体微腔。该方案的成功一方面来源于对材料制备方法的改进, 即采用了研磨减薄制备的 4H-SiCOI 薄膜 (见第 2 节的介绍), 另一方面来源于对光子晶体几何参数的设计优化。其中干法刻蚀碳化硅所形成的刻蚀侧壁角度约为 6° , 造成了光子晶体在垂直方向上的不对称性, 在薄膜厚度较大时, 这种不对称性使得准 TE 模式向准 TM 模式耦合 (TM 未进行禁带设计), 由此导致了所需要的准 TE 基模的 Q 值随着薄膜厚度的增加而降低, 而厚度太薄将导致光场的散射和泄露, 故光子晶体厚度的选择存在最佳值。另外, 小模式体积的获得对高效非线性转换的实现也是至关重要的。在取得超高 Q 值的同时, 由于碳化硅的高折射率特性, 该工作的光子晶体微腔还实现了很小的光场模式体积, 约为 $2.1(\lambda/n)^3$ 。利用光学显微镜可以直观地观察到碳化硅光子晶体中的二次谐波产生过程, 如图 4(b) 所示。图 4(c) 为光子晶体中产生的二次谐波功率与泵浦光功率的关系, 其显示的转换效率达 19 W^{-1} , 该值是单个微腔所实现的最高谐波转换效率。

波导或基于回音壁模式的光学谐振器可用于实现高效的非线性转换, 因器件结构的特殊性而具有更优良的可拓展性, 但与光子晶体微腔不同的是, 其高效非线性频率转换需满足相位匹配条件。对于大多数单晶材料, 由于材料固有的色散, 能量和动量之间的色散关

系呈现出非线性的特征,使得自然的相位匹配条件很难满足,通常通过对微腔几何结构进行调整(色散工程)来实现准相位匹配。Lukin 等^[42]在高 Q 值微环谐振器中通过对波导横截面尺寸进行调整,1555 nm 的准 TE 基模和 777.5 nm 的准三阶 TM 模具有相同的有效折射率,进而实现了准相位匹配,如图 4(e)所示。如图 4(d)所示,由于基模与高阶模对应的微腔耦合条件不同,该工作分别针对基模与高阶模设计了不同耦合间距的波导-微腔耦合器,并且利用逆向设计对不同波段下片上

到光纤的耦合进行了优化,最终实现了高达 3.6 W^{-1} 的二次谐波转换效率。这项工作还在同一 4H-SiCOI 平台展示了高亮度的单光子自旋色心,说明 SiCOI 平台兼具获得单光子发射源和实现单个光子高效非线性频率转换的潜力,这使得 4H-SiCOI 有望成为未来集成光量子学材料平台的主要候选者。此外通过进一步对二次谐波效率的优化,可以在碳化硅平台上进行单光子非线性转换实验的演示,这在最终实现量子光学和非线性光子学的单片集成应用方面是非常重要的。

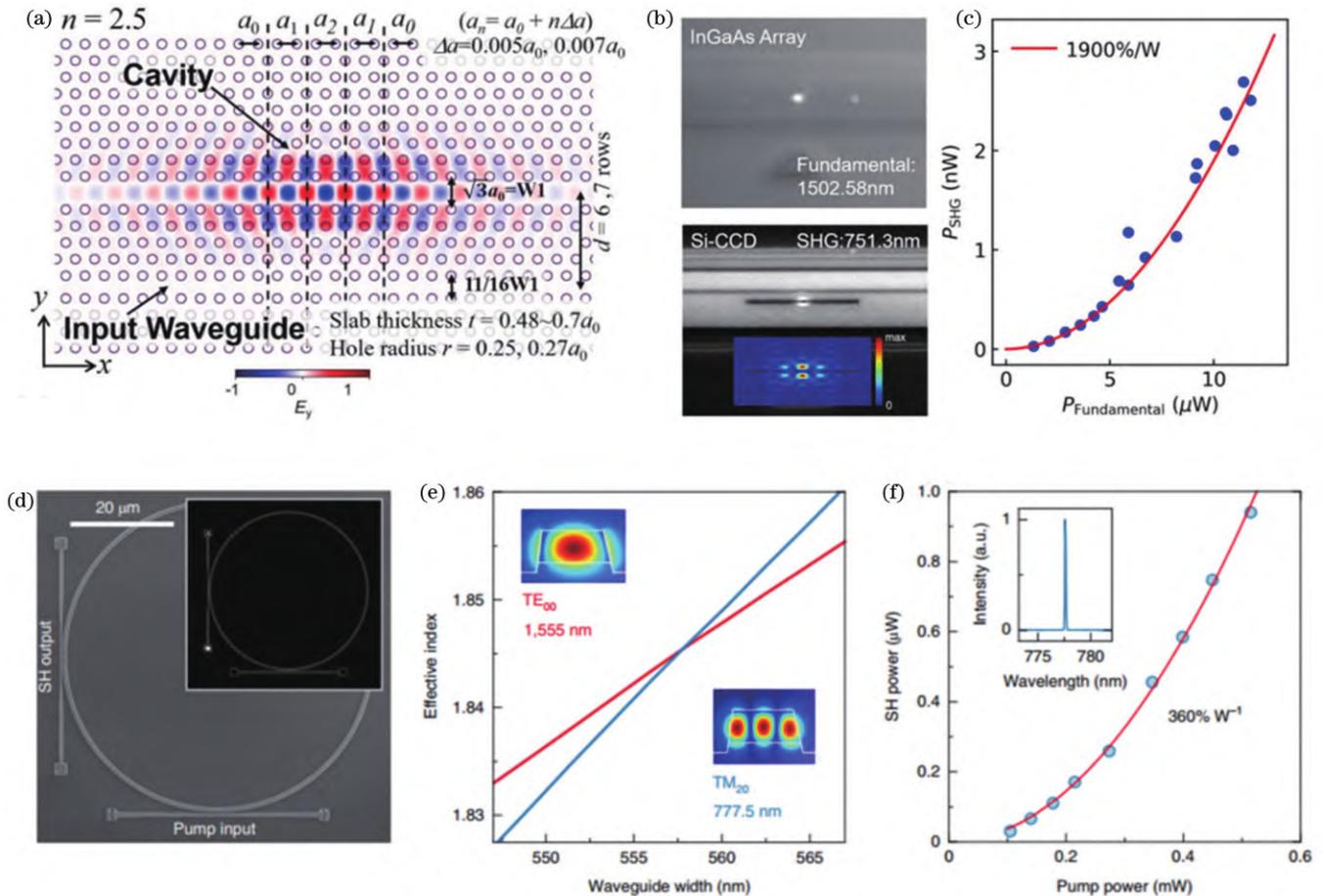


图 4 SiCOI 中的二次谐波产生^[38, 42]。(a)用于二次谐波产生的碳化硅二维光子晶体示意图;(b)光学显微镜拍摄的光子晶体,上图为 InGaAs 相机拍摄到的位于 1502.58 nm 的基模,下图为 Si CCD 拍摄到的位于 751.3 nm 的二次谐波产生;(c)光子晶体中输出二次谐波功率与泵浦光功率的关系;(d)碳化硅微环谐振腔的 SEM 图;(e)微环中的相位匹配设计;(f)微环谐振腔中输出二次谐波功率与泵浦光功率的关系

Fig. 4 Second harmonic generation in SiCOI^[38, 42]. (a) Schematic of a two-dimensional silicon carbide photonic crystal used for second harmonic generation; (b) photonic crystal taken by an optical microscope, the above picture is the fundamental mode at 1502.58 nm taken by an InGaAs camera, the below picture shows the second harmonic generation at 751.3 nm captured by Si CCD; (c) relationship between the output second harmonic power and the pump light power in the photonic crystal; (d) SEM image of silicon carbide microring resonant cavity; (e) phase matching design in the microring; (f) relationship between the output second harmonic power and the pump light power in the microring resonator

3.2 电光调制器

电光调制器是集成光子器件的重要构成之一,基于本征电光效应(Pockels 效应,一般译为普克尔斯效应)的电光调制器可以完成电信号与光信号的高速相互转换,在光通信、光子计算等领域发挥着重要的作

用。在无反演中心的晶体中,二阶非线性效应的存在使得外加直流电场可以产生额外的极化分量。根据电位移矢量定义 $D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 \epsilon_{\text{eff}} E$, 相对介电常数 ϵ_{eff} 在本征电光效应下发生变化,且变化量与外加电场呈线性关系。然而受到晶体中心对称性的影响,许多集成

光子学平台如非晶态材料氮化硅、二氧化硅,单元素材料硅、金刚石等均不具有本征电光效应,这时便需要采用异质集成或者其他非线性电光效应来补足所需的快速可重构电光调制功能。对于碳化硅晶体,其本征电光系数在不同的晶型下存在差异。对于属于 $\bar{4}3m$ 点群的 3C-碳化硅,其电光矩阵 r_{hk} 为

$$r_{hk} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{52} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} \quad (4)$$

由于晶体对称性原因,3C-碳化硅中 r_{41} 、 r_{52} 、 r_{63} 具有相同的数值,为 $1.5 \text{ pm/V}^{[54]}$,有研究也推测该值为 $2.6 \text{ pm/V}^{[55]}$,其值的不确定性可能是由于材料制备方法的差异。对于 4H-碳化硅,其电光矩阵 r_{hk} 为

$$r_{hk} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中: $r_{13} = r_{23}$, $r_{51} = r_{42}$ 。长期以来,4H-碳化硅的本征电光系数及相关应用未得到深入研究。近期,Wang 等^[56]利用高 Q 值的微环谐振腔对 4H-碳化硅的 r_{13} 和 r_{33} 进行了测定。如图 5(a)和图 5(b)所示,电极以接地-信号-接地(GSG)的形式放置于 4H-碳化硅波导的正上方,改变波导中光学模式的偏振可以直接对 r_{13} 和 r_{33} 进行测量。通过观测光学谐振峰随外加电场的调谐量,得到 r_{13} 和 r_{33} 在 $0.3 \sim 0.7 \text{ pm/V}$ 和 $0 \sim 0.03 \text{ pm/V}$ 的范围中,值的不确定性可归因于碳化硅厂商的不同。相比于铁电晶体,碳化硅的电光系数显然非常小,但是由于碳化硅具有高功率耐受性、CMOS 兼容性和高化学稳定性等优良特性^[57-58],在 SiCOI 上实现电光调控功能仍然具有重要的实用价值。

Fan 等^[55]在 3C-SiCOI 上制备了跑道型调制器,首次在 3C-碳化硅上验证了电光调制性能,实现了 $118 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 的调制效率。随后,可在 913 kW/mm^2 光功率下工作的 3C-碳化硅高速电光调制器得到制备^[54],其调制速率可达 15 Gbit/s 。该调制器的整体结构和电极结构如图 5(e)和图 5(f)所示,微环的 Q 值为 8.9×10^4 ,其中电极以 GSG 的形式放置于 3C-碳化硅波导的正上方,从而能够有效地利用 r_{41} 系数。通过对电场与光场间相互作用的优化,该工作实现了 0.11 pm/V 的调制效率,且驱动电压小于 2 V ,上述数值基本达到了可 CMOS 驱动的标准。另外,对高速电光响应的表征显示出该电光调制器的响应带宽可以达到 7.1 GHz ,并且在高速率的应用场景下 ($>5 \text{ Gbit/s}$),驱动电压在降低至 1.2 V 时调制器仍然

保持良好的误码率(眼图 Q 因子 >2.7)。在高功率应用场景下,基于铌酸锂的电光调制器虽然具有高效、快速的调制特性,但是铌酸锂材料本身的光折变效应会导致其功率耐受性不佳。与铌酸锂相比,CMOS 兼容的 3C-碳化硅调制器在高达 $913 \text{ kW} \cdot \text{mm}^{-2}$ 的光强度下依然可以保持与低功率下相当的调制特性,如图 5(f)所示,表明了碳化硅电光调制器的优异功率耐受性。此外,碳化硅还具有高的热导率、大的杨氏模量、高的莫氏硬度和高的击穿场强,因此碳化硅电光调制器在极端环境下的应用将具有更加明显的优势。CMOS 兼容电光调制器的成功验证在碳化硅光子学发展过程中具有重要的意义,这为基于碳化硅平台的非线性器件和量子器件提供了可重构功能。

3.3 光学频率梳

光学频率梳是一种在频率域上有着严格相等频率间隔的光源,因其光谱类似梳子而被称为“光频梳”。若光频梳内各个梳齿之间形成了相位锁定,那么光频梳在时域上则会呈现出在空间传播过程中波形不变的超短脉冲,其也被称为“孤子”。在精密测量、光谱学和量子传感等领域,光频梳技术已经成为了一项重要的工具^[59]。由于该技术的革命性影响,Hänsch 和 Hall 两位科学家因在光频梳技术发展中做出的重要贡献而分享了 2005 年的诺贝尔物理学奖^[60]。随着过去十几年间微纳加工技术的不断进步,研究人员已经成功地在芯片级的平台上实现了光频梳技术^[61-62],并且低损耗微腔内克尔孤子光频梳现已经成为了集成光子领域的一大研究热点,其基本原理可概括为三阶非线性效应下四波混频和光克尔效应的共同作用,即级联式的四波混频先在腔内产生频域宽谱光频梳,再利用光克尔效应产生的自相位调制来弥补群速度弥散导致的脉冲时域展宽,进而获得稳定形状的克尔孤子光频梳。这种基于微腔的孤子光频梳芯片不仅具有体积小、易集成的优势,而且还呈现出更低的功耗、更高的可靠性和更低的制造成本,这为光频梳技术在集成微波光子、多光源相干通信等片上集成系统的应用带来了巨大的机遇^[59, 63]。

随着高 Q 值(达到 10^6)碳化硅微腔的成功制备,在碳化硅光学平台上产生光学频率梳的研究得到更深入的展开。如图 6(a)和图 6(b)所示,Lukin 等^[42]在研磨减薄的 4H-碳化硅平台中陆续实现了参量振荡、宽谱光频梳^[40]和孤子光频梳^[49]的产生。由于碳化硅具有较大的热光效应 ($4.67 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$),该工作将碳化硅微腔放置于 4 K 低温中来提高平台的热稳定性,进而获得片上孤子光频梳。通过对刻蚀工艺的改进,该工作可实现一个半径为 $100 \mu\text{m}$ 、波导横截面为 $1850 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$ 的碳化硅微环腔,其 Q 值高达 5.6×10^6 。与此同时,参量振荡的阈值测量为 0.51 mW ,孤子产生的操作功率为 2.3 mW ,这两项数值与铝镓砷和氮化硅平台上所测得的相关值处于同一水平,侧面验证了碳

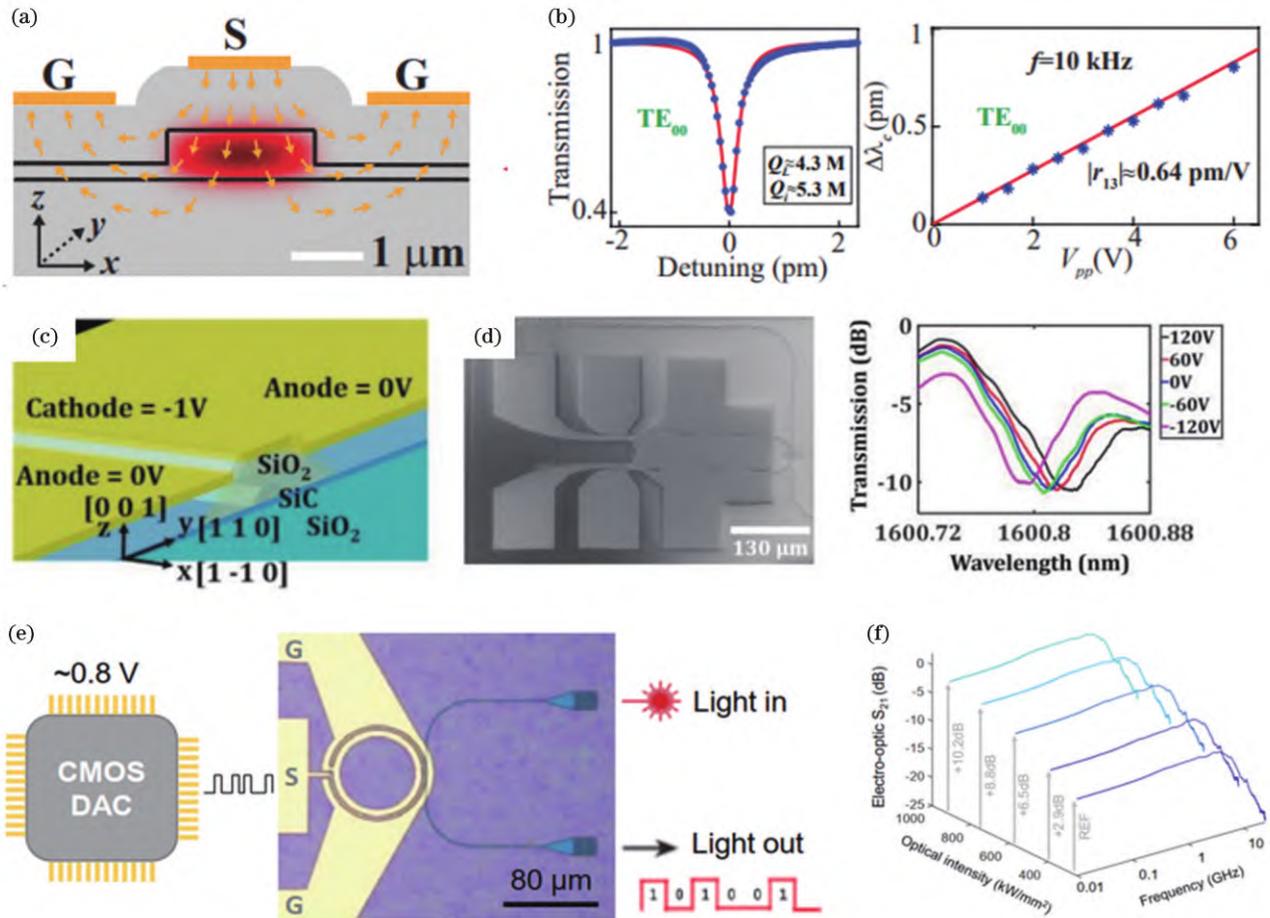


图 5 SiCOI 电光调制器研究^[54-56]。(a) 4H-SiCOI 电光调制器结构; (b) 微环腔的 Q 值和共振峰随施加电压的调谐变化; (c) 3H-SiCOI 电光调制器结构; (d) 跑道腔的 SEM 图和共振峰随施加电压的调谐变化; (e) 3C-SiCOI 电光调制器结构; (f) 3C-SiCOI 电光调制器在高光功率下的性能表征

Fig. 5 Integrated electro-optic modulator in SiCOI^[54-56]. (a) Schematic of the structure of 4H-SiCOI electro-optic modulator; (b) Q value of the microring cavity and the tuning change of the resonance peak with the applied voltage; (c) schematic of the structure of 3H-SiCOI electro-optic modulator; (d) SEM image of the racetrack cavity structure and the tuning variation of the resonance peak with the applied voltage; (e) 3C-SiCOI electro-optic modulator structure; (f) high power operation characterization of 3C-SiCOI electro-optic modulator

化硅平台在高效的光频梳产生方面的潜力。在高 Q 值碳化硅微盘腔中, Wang 等^[39, 64-65]在室温下利用双光束泵浦的方法成功地获得了碳化硅孤子光频梳, 如图 6 (c) 所示, 并且该工作中碳化硅孤子光频梳产生的动态过程及其噪声特性也被完整记录。另外, 实际应用场景下的芯片级孤子光频梳技术还需考虑频谱宽度。图 6 (d) 为在 4H-碳化硅中获得的倍频光频梳^[41], 其谱宽在高功率光(片上功率为 120 mW)的泵浦下可以达到 150 THz。其中, 通过对微环的几何结构进行控制, 该微盘腔能够在短波处实现色散波(集成色散值为 0)产生, 这对光频梳的展宽至关重要。然而该工作中倍频光频梳仍处于高噪声状态, 故无法实现稳定的孤子传输, 这可归因于高功率泵浦下的碳化硅微腔具有更强的热不稳定性。

与产生光频梳的主流氮化硅平台相比, 4H-碳化硅同时具有很强的二阶和三阶非线性效应, 该特性使

得研究人员可以在碳化硅微腔中采用更加多样的设计, 实现高效的非线性频率转换, 如可见光频梳的产生。目前, 可见光波段的频率梳是将频率梳技术应用在光学时钟、生物医学成像和光谱学等领域的关键, 然而在可集成材料平台上实现可见光频梳极具挑战性。Wang 等^[64]利用二次谐波效应, 将 1550 nm 近红外波段的宽谱光学频率梳转换到可见光波段, 形成可见光频梳, 其原理和转换过程如图 7 所示。首先, 频率为 f_p 的近红外泵浦激光通过基于三阶 χ^3 的参量振荡过程在微腔中产生以 f_p 为中心的频率边带。当红外光频梳的功率足够强时, 通过二阶 χ^2 的二次谐波和差频过程可生成频率为 $2f_p$ 附近的可见光频梳。与传统二次谐波实验一致, 转换效率依赖于红外波段和可见光波段内谐振模式之间的相位匹配和模式匹配, 这类转换过程也使得红外光频梳和可见光频梳都具有相同的光谱间距 δ [即自由光谱范围(FSR)]。图 7 (c) 和图 7 (d) 为红外

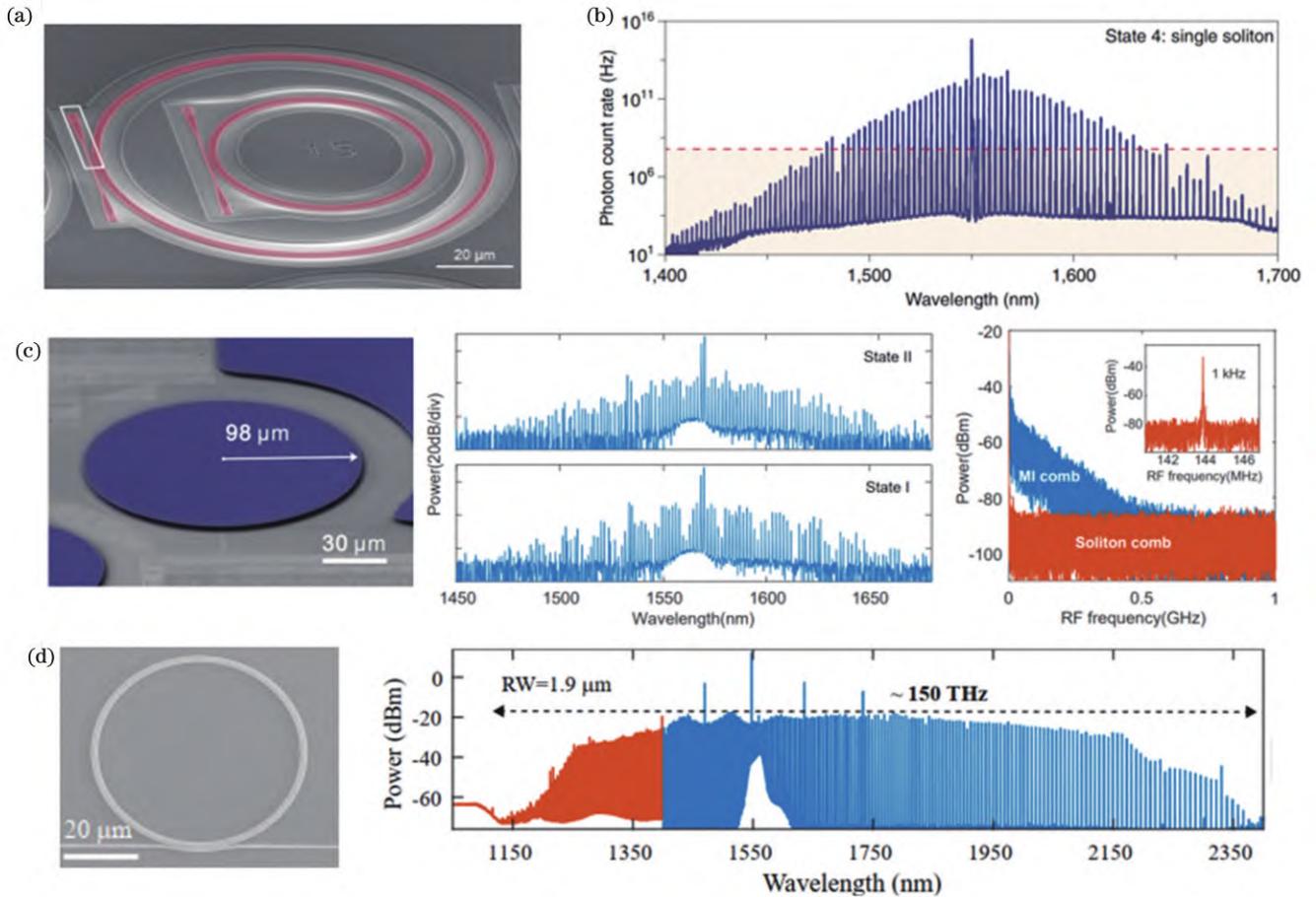


图 6 4H-SiCOI 中光学频率梳的产生^[39, 41-42, 49]。(a) 4H-SiCOI 微环腔 SEM 图；(b) 碳化硅孤子光频梳的产生，其频谱对应于单孤子；(c) 4H-SiCOI 微盘腔 SEM 图，双孤子和单孤子频谱，及其噪声特性分析；(d) 用于倍频光学频率梳产生的 4H-SiCOI 微环腔 SEM 图和倍频光学频率梳光谱

Fig. 6 Generation of optical frequency combs in 4H-SiCOI^[39, 41-42, 49]. (a) SEM image of 4H-SiCOI microring cavity; (b) generation of silicon carbide soliton optical frequency comb, whose spectrum corresponds to single soliton; (c) SEM image of 4H-SiCOI micro-disk cavity, double soliton and single soliton spectra, and analysis of its noise characteristics; (d) SEM image of 4H-SiCOI microring cavity used for frequency doubling optical frequency comb generation and spectrum of frequency doubling optical frequency comb

光频梳向可见光频梳频率转换的具体过程。当初级梳状线出现在近红外区时，在可见光区域会同时出现 4 个梳齿，各个梳齿具有相同的频率间距 (11-FSR, 2.29 THz)。之后将泵浦激光进一步调谐至谐振模式时会产生更多的梳齿并且主梳之间的间隙会逐渐得到填充，其频率间距为 1 个 FSR，最终密集的光频梳会在近红外波段和可见光波段中产生。该工作实现的可见光梳转换效率为 $3.3 \times 10^{-4} \%$ ，其比先前 AlN 微环谐振器的数值大 1 个数量级^[66-67]。

4 碳化硅集成量子光子学

量子色心由半导体内部的原子级、深能级结构的晶格缺陷构成，能级的跃迁使得色心能够实现单光子发射，是目前有望用于大规模片上量子网络的主要光源之一。除单光子发射特性外，某些应用场景还要求量子色心内部缺陷的能级间可自旋操控，例如在二能

级系统中施加特定频率的微波实现拉比振荡进而对电子自旋态进行操控。因此，具备这类能级结构的色心也被称为可相干操纵自旋色心。碳化硅是未来实现片上量子信息处理的重要平台。与金刚石的性质类似，碳化硅中具有种类众多的固态量子光源，其中许多色心的辐射波段位于近红外波段，具有长自旋相干时间、高精细度的优势^[68]，结合其易于微纳加工和可大规模集成的特性，碳化硅在可集成光量子领域具有重要的研究价值^[28, 69]。

碳化硅中硅空位色心 (V_{Si})、双空位色心 (DV) 和氮替位硅空位色心 (NV) 因性质优异而得到广泛研究，图 8 为这 3 种色心的原子结构示意图，其中标注了发光峰位在光谱中的大概位置。除这 3 种色心外，其他类型的色心如钒替位色心 (V^{4+})、碳替位硅空位色心 (CAV) 等也得到深入研究。上述色心的性质各异，表 3 列出了这些色心的主要性质。十多年前，人们就通

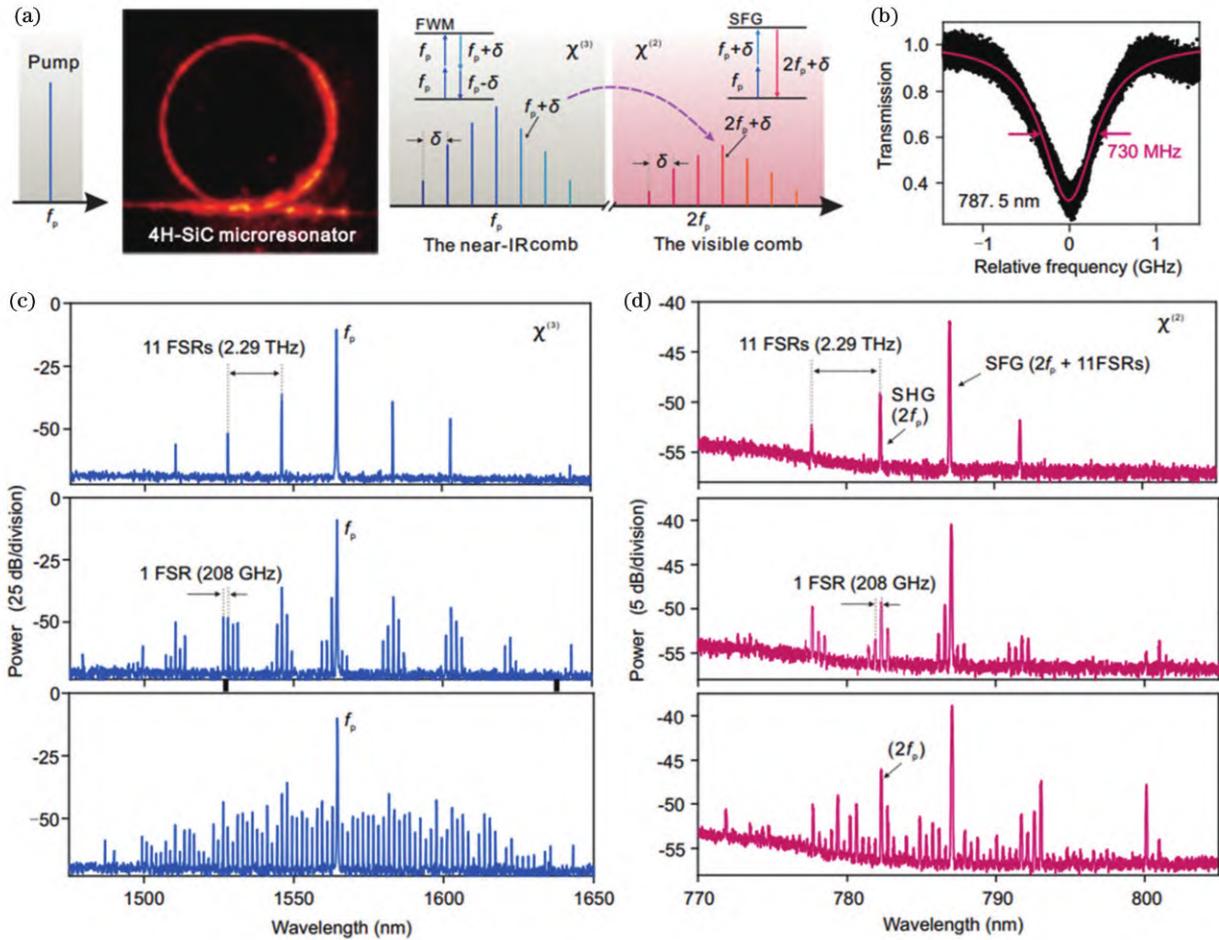


图 7 4H-SiCOI 中红外光频梳到可见光频梳频率转换^[39, 64-65]。(a) 可见光频梳产生时的光学显微镜照片及转换原理示意图；(b) 碳化硅可见光波段的 Q 值分析；(c) 红外光频梳到可见光频梳频率转换的具体过程

Fig. 7 Frequency conversion in 4H-SiCOI mid-infrared frequency comb to visible light frequency comb^[39, 64-65]. (a) Optical microscope photo and schematic of the conversion principle when the visible light frequency comb is generated; (b) Q value analysis of silicon carbide in the visible light band; (c) specific process of frequency conversion from infrared frequency comb to visible light frequency comb

过光致发光和电子顺磁共振等手段发现了碳化硅中的各种缺陷发光^[26], 而近年来对碳化硅中量子色心的研

究主要集中在获取色心的单点发射和利用腔量子耦合效应调控色心发光的性质两个方面。

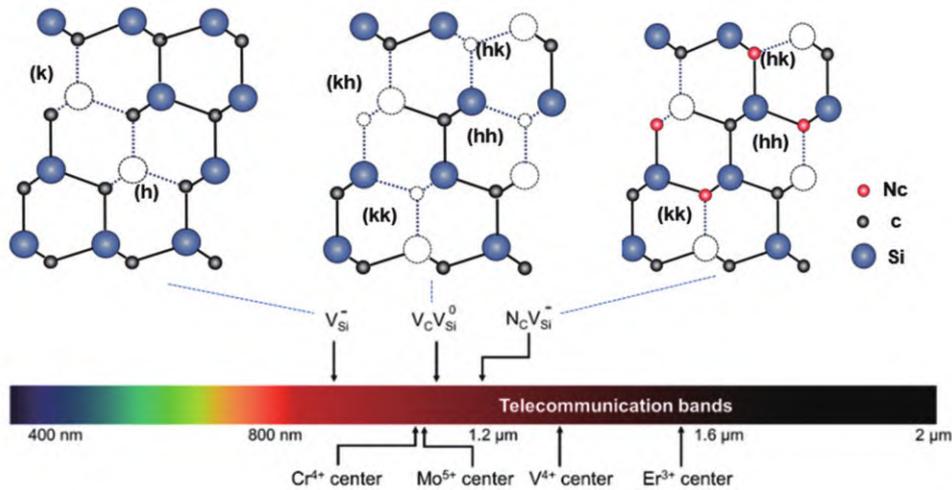


图 8 4H-SiC 中 V_{Si}、DV、NV 色心的原子结构示意图^[29]

Fig. 8 Schematic of the atomic structure of V_{Si}, DV, and NV color centers in 4H-SiC^[29]

单点的色心发光可以表现出单声子发射特性,在高精密磁力仪、量子通信与基础物理探索方面有着巨大的应用潜力。在碳化硅中第一个被观察到单点色心发光的是 4H-碳化硅中的 CAV^[70],通过调节电子辐照剂量和优化辐照后的退火温度可以控制 CAV 形成的密度,最终获得空间上单个 CAV 色心。如表 3 所示,室温下,CAV 在 700 nm 附近具有很强的发光亮度,其单个色心的饱和光学计数为 $2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$,但是对于目前 CAV 的自旋态,仍然无法实现有效的光学探测磁共振(ODMR)测量,这极大地限制了 CAV 在固体自旋电子学中的应用。在可见光泵浦磁探测的色心中, V_{Si} 和 DV 是研究得最为深入的色心种类^[27, 68]。2011 年,Awschalom 课题组^[71]报道了 4H-碳

化硅中的 DV 在室温下可以进行与金刚石中 NV 色心相类似的自旋相干操控的内容,几年后 DV 和 V_{Si} 均被隔离成单个色心并进行 ODMR 测量。 V_{Si} 为碳化硅晶格中一个 Si 原子丢失而形成的点缺陷,在其他晶型如 6H-、15R-碳化硅中很常见,但在 3C 晶型中还未见报道。如图 8 所示, V_{Si} 在 4H-碳化硅中存在两种化学环境不同的 k 和 h 格位,形成的带负电的 V_{Si} ZPL 位于 862 nm(V_1)和 917 nm(V_2)。根据 ODMR 测量, V_1 的零场分裂在 4 MHz, V_2 的零场分裂在 70 MHz,其中 V_2 色心具有超高 20 ms 的自旋相干时间,饱和光学计数为 $1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。迄今为止,国际上已经有大量关于碳化硅中色心的量子性质及其相干操控的综述文章^[27, 68]。

表 3 4H-碳化硅中几种色心的主要性能对比

Table 3 Main performance comparison of several color centers in 4H-SiC

| Defect | ZPL /nm | Max. counts for SPS /(10^3 s^{-1}) | Spin | Spin coherence time T2 /ms | DWF /% |
|-----------------|-------------|--|------|----------------------------|--------|
| V_{Si} | 858-917 | 10 | 3/2 | 0.6-20 | 40 |
| DV | 1078-1130 | 150 | 1 | 1 | 5 |
| CAV | 648.7-676.5 | 2000 | 1/2 | N. A. | N. A. |
| NV | 1180-1240 | 17.4 | 1 | 0.017 | N. A. |
| V^{4+} | 1279, 1335 | N. A. | 1/2 | 0.0002 | <50 |

Notes: ZPL is zero-phonon line; DWF is Debye-Waller factor.

在量子光学领域,将量子光源(如固体色心、量子点等)与微腔集成可以极大增强光子与物质的相互作用,从而对单个原子或光子状态进行高效调控,进而实现量子信息的传递和存储^[72]。腔量子电动力学中衡量微腔中光场与物质增强作用的量为 Purcell 因子,相关的 Purcell 效应已经广泛地应用于色心-微腔体系的研究中^[73]。2017 年,哈佛大学的 Hu 研究组^[30]将碳化硅中的 V_1 与一维光子晶体集成,实现了 ZPL 的 22 倍增强。随后,斯坦福大学的研究者^[42]在更高 Q 值的纳米谐振腔内进一步地将硅色心 V_1 ZPL 增强了 120 倍。如图 9(a)和图 9(b)所示,通过电子辐照能够在—维光子晶体中产生单个 V_{Si} ,同时利用氮气冷凝的方式将腔模逐渐调谐至 V_{Si} 的 ZPL 处,此时可以观察到色心发光的增强效应,其发光寿命也被调控。图 9(d)~(f)展示了与之类似的工作,其中碳化硅中的双空位 DV 被集成到光子晶体微腔中^[50],实现了 50 倍的 Purcell 增强,其光子计数达到 $4.60 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$,并且 ZPL 与声子边带的比例由约 5% 提高到了约 75%。另外,对位于光子晶体微腔中 DV 进行 ODMR 测试的结果表明退相干时间为 400 ns,该值相比于体块碳化硅中的 DV 色心有所减小。

在利用微腔对色心光源进行耦合与操纵的实验中,保持色心光源的自旋相关性是一个极大的挑战,该挑战一方面来源于处于微腔中的色心的自旋环境相比于处于体块晶格中的色心环境有所劣化,另一方面源于在微腔内产生色心常常需要高能量的粒子进

行轰击,这导致了晶格质量受损,进而减短其内部色心的相干操纵时间。为解决后者存在的问题,Babin 等^[74]利用低能量(6 keV)的氦离子,以 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 的剂量在碳化硅悬空波导中产生 V_{Si} ,其自旋相干特性可以被较好地保持,具体细节如图 10(a)~(c)所示,其中处于波导腔中的 V_{Si} 的自旋相干时间约为 1 ms。另外,该工作还实现了 V_{Si} 电子自旋与两个核自旋的偶极耦合,如图 10(d)~(f)所示,其中核自旋对电子自旋产生的调制与共振测试一般使用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)自旋序列。通过改变用于探测 V_{Si} 电子自旋的微波序列中聚焦脉冲的数量,可以控制波导内单个 V_{Si} 电子自旋的两个核的自旋旋转,最终实现核自旋的特定旋转(三个量子门),保真度高达 98%。

将碳化硅色心应用在集成量子光学中的另一个难点是色心的定位问题。目前大多数色心是由一定能量、一定剂量的粒子大面积辐照碳化硅表面产生的,分布具有随机性^[27, 50, 68]。基于色心与微腔相集成的应用对色心的空间位置更为严格,其本质原因是需要让腔模与色心发光实现良好的重叠。出于上述目的,聚集粒子束(如质子、硅离子等)和飞秒激光^[75]被用于产生碳化硅色心的研究,该方法可以得到 V_{Si} 。用于产生色心的飞秒激光处于红外波段,能量为 8.2~230 nJ,因此在产生色心的同时将伴随着较为严重的晶格损伤,进而使得 V_{Si} 发光携带背景荧光^[75]。近期,哈佛大学的 Hu 研究组^[76]利用紫外波段的纳米激光脉冲在碳化硅

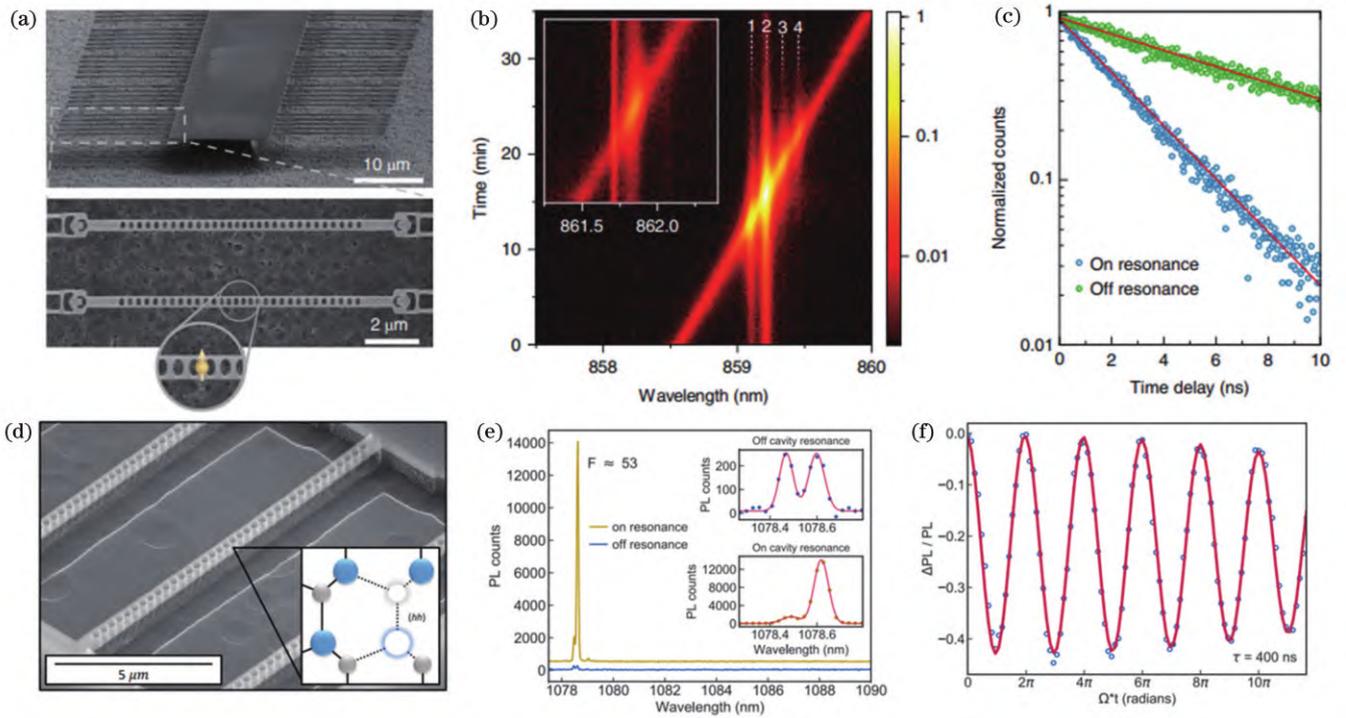


图 9 4H-碳化硅中色心与微腔的集成^[42, 50]。(a)4H-碳化硅一维光子晶体 SEM 图；(b)利用氮气冷凝对腔模进行调谐的过程；(c) V_{Si} 色心发光处于腔模中的寿命测试；(d)4H-碳化硅一维光子晶体 SEM 图及其 DV 色心示意图；(e)DV 发光与腔模耦合与未发生耦合的光谱对比；(f)DV 色心处于微腔中的 ODMR 测量, 图为拉比振荡中的退相干过程

Fig. 9 Integration of color centers and microcavities in 4H-SiC^[42, 50]. (a) SEM image of 4H-SiC one-dimensional photonic crystal; (b) tuning process of cavity mode by nitrogen condensation; (c) life test of V_{Si} color center luminescence in cavity mode; (d) SEM image of 4H-SiC one-dimensional photonic crystal and schematic of its DV color center; (e) spectral comparison between DV luminescence and cavity mode coupling and no coupling; (f) ODMR measurement of DV color center in the microcavity, the picture shows the degeneration in the Rabi oscillation coherent process

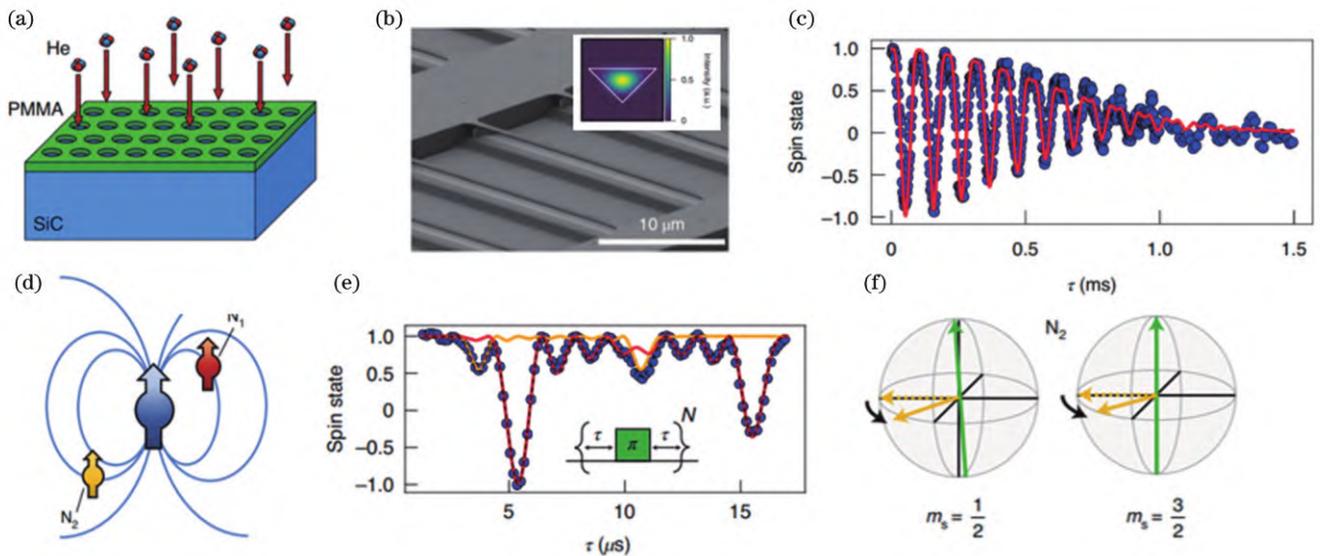


图 10 4H-碳化硅波导中 V_{Si} 的相干操控及其核自旋共振操纵实验^[74]。(a)He 离子注入产生色心示意图；(b)4H-碳化硅悬空波导的 SEM 图, 插图为波导的模式分布仿真结果；(c)波导中植入的 V_{Si} 的自旋相干性；(d)波导中耦合电子-核自旋三重态的示意图；(e)CPMG 序列测试核自旋对电子自旋产生的调制与共振作用；(f)Bloch 球中核自旋 N_2 的操控演示

Fig. 10 Properties of V_{Si} centers and control over nuclear spin qubits in 4H-SiC triangle waveguide^[74]. (a) Schematic of color center produced by He-ion implantation; (b) SEM image of 4H-SiC suspended waveguide, the inset shows the simulation result of the mode distribution of the waveguide; (c) spin coherence of V_{Si} implanted in the waveguide; (d) schematic of coupled electron-nuclear spin triplet state in the waveguide; (e) CPMG sequence testing the modulation and resonance effect of nuclear spin on electron spin; (f) manipulation demonstration of nuclear spin N_2 in Bloch sphere

光子晶体中写入了单点 V_{Si} 色心, 其对应的激光脉冲波长为 337.1 nm, 脉冲长度为 4 ns, 单个脉冲能量为 0.4~0.9 μ J。与对晶格轰击电离产生色心的方式不同, 紫外脉冲能量能够跨越碳化硅的禁带, 在晶格中提供电子-空穴对, 从而产生空位缺陷色心。图 11(a) 为紫外脉冲作用于碳化硅光子晶体微腔的示意图和辐照前后的光谱图, 可以观察到经过脉冲辐照后的光谱产生了清晰的 V_{Si} 的 h 格位发光, 并且仍然存在品质因子

保持不变的腔模, 证明了辐照下光子晶体的晶格损伤较小。图 11(b) 为辐照产生的色心空间强度分布, V_{Si} 发光在腔模峰值处也达到最强, 说明这类表面辐照产生了在腔模中心的色心, 之后进一步增加激光脉冲辐照密度和脉冲数会导致 V_{Si} 发光寿命的增加和光谱线宽的展宽。综上, 紫外纳秒脉冲能够原位、可寻址地产生高质量色心, 这为未来构建基于碳化硅的片上集成光量子网络奠定了基础。

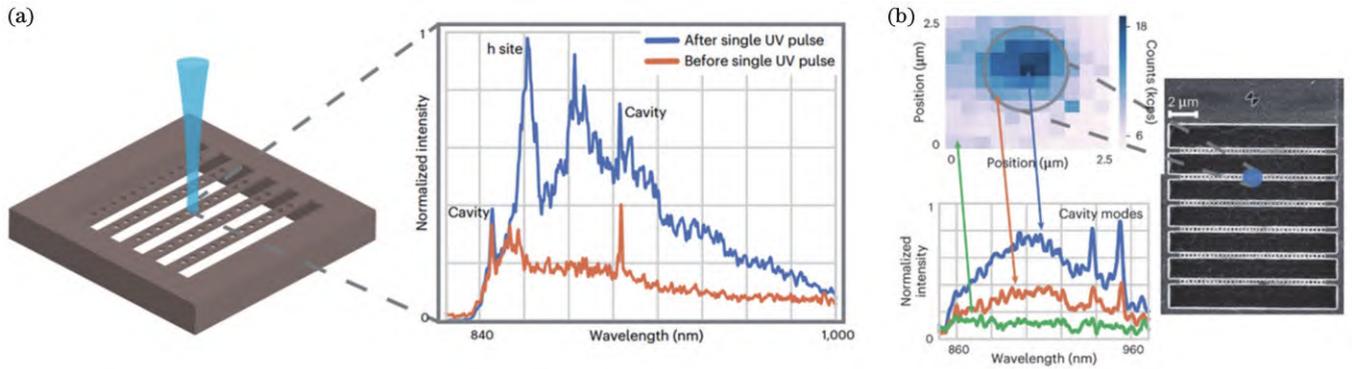


图 11 紫外脉冲在碳化硅微腔中定点形成色心^[76]。(a) 光子晶体微腔的示意图和紫外脉冲辐照前后的光谱图; (b) 辐照产生色心的空间强度分布

Fig. 11 Color centers of UV pulse laser in silicon carbide nanophotonic cavities^[76]. (a) Schematic of photonic crystal microcavity and spectra before and after UV pulse irradiation; (b) spatial intensity distribution of color centers produced by irradiation

5 总结与展望

碳化硅正在逐步成为极具竞争力的光子学平台, 对碳化硅薄膜的制备技术、碳化硅在集成非线性光学和量子光学上的最新进展进行了介绍。在 SiCOI 制备工艺中, 研磨减薄方法制备的 4H-SiCOI 具有更低的损耗, 但是仍未满足大规模集成光子芯片的制备过程中对均匀性的需求, 因此未来能否进一步提高 SiCOI 的均匀性是碳化硅光子学走向实际应用的一个关键因素。碳化硅的优势在于其很强的二阶和三阶非线性效应, 这为实现微腔内高效率宽频谱的非线性频率转换提供了更加多样的设计方案, 其中包括近期被验证的

碳化硅孤子光学频率梳。碳化硅的另一个核心优势在于其同时具有性能优异的固体自旋色心和可大规模集成的潜力, 但是目前碳化硅集成量子光学的研究尚处于对色心自旋性质的优化表征和对色心-微腔耦合的验证阶段。参考量子点、金刚石 NV 色心的发展历程, 构建基于碳化硅色心自旋体系的固体量子存储与可拓展的量子网络是碳化硅集成量子光学的未来发展方向。图 12 为对 SiCOI 在集成非线性光学和量子光学上的应用展望, 其中光子晶体微腔和波导用于调控和优化色心的光学跃迁并进行自旋相干操纵, 微环谐振腔利用碳化硅的强二阶非线性对光源进行快速的片上调制和频率转换以对光源进行编码, 并进一步地参与

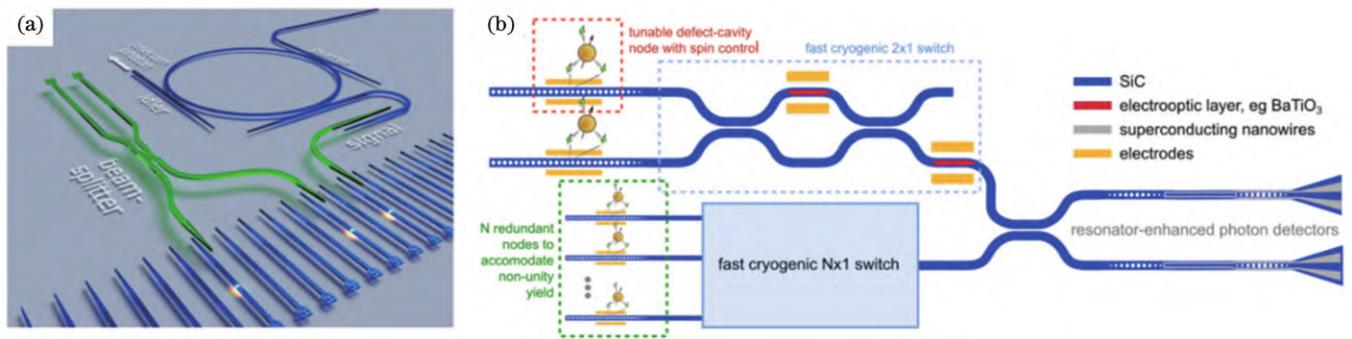


图 12 SiCOI 在集成非线性与量子光学上的应用展望^[42, 69, 77]。(a) 利用多个色心光源进行量子态测量, 利用微环谐振器对色心光源进行频率转换与调控; (b) 基于碳化硅的单片光子网络实现方案

Fig. 12 Prospects for the application of SiCOI in integrated nonlinear and quantum photonics^[42, 69, 77]. (a) Using multiple color center light sources for quantum state measurement, and using microring resonators for frequency conversion and regulation of color center light sources; (b) single-chip photonic network implementation scheme based on silicon carbide

到远程通信协议中。对于需要快速可重构功能的应用场景,碳化硅光子平台也可以与其他功能薄膜(如铌酸锂、钛酸钡等)进行异质集成,以实现对片上量子态演化的快速调控。近年来,基于氮化铌材料的超导单光子探测器成功集成到片上平台,相关集成技术与 SiCOI 相兼容。沿用上述思路, SiCOI 平台可以单片式地集成片上光源、频率转换元件、量子态调控元件和光子探测元件,如图 12(b)所示,故可以预见未来 SiCOI 平台将在集成光子芯片的研究和应用中发挥重要作用。

综上所述,碳化硅光学的发展充满了机遇和挑战,其中诸如碳化硅非线性光学、碳化硅量子光学等领域仍存在着巨大的发展空间。另外碳化硅作为一种半导体材料,将基于碳化硅的 CMOS 电子器件与光子器件结合也是实现光电融合的一条可行路径,因此碳化硅在未来很可能成为电子学、经典光子学和量子光学相互交叉耦合的实现平台。

参 考 文 献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [2] Won R. Integrating silicon photonics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 498-499.
- [3] Thomson D, Zilkie A, Bowers J E, et al. Roadmap on silicon photonics[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(7): 073003.
- [4] Pu M H, Ottaviano L, Semenova E, et al. Efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator[J]. *Optica*, 2016, 3(8): 823-826.
- [5] Yi X, Yang Q F, Yang K Y, et al. Soliton frequency comb at microwave rates in a high-Q silica microresonator[J]. *Optica*, 2015, 2(12): 1078-1085.
- [6] Boes A, Chang L, Langrock C, et al. Lithium niobate photonics: unlocking the electromagnetic spectrum[J]. *Science*, 2023, 379(6627): eabj4396.
- [7] Kogelnik H. Theory of optical waveguides[J]. *Guided-Wave Optoelectronics*, 1988: 7-88.
- [8] 庄瑞,洪晶晶,刘爱萍,等. 三维集成光学芯片中波导之间的耦合研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1923001.
- [9] Zhuang R, Hong J J, Liu A P, et al. Coupling between waveguides in three-dimensional integrated optical chip[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1923001.
- [9] 梁虹,魏芳,孙延光,等. 基于光纤光栅的 1310 nm 波段窄线宽混合集成外腔半导体激光器[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2001002.
- [9] Liang H, Wei F, Sun Y G, et al. A 1310 nm band narrow linewidth hybrid integrated external cavity semiconductor laser based on fiber Bragg gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2001002.
- [10] Jalali B, Fathpour S. Silicon photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [11] Doerr C, Chen L, Vermeulen D, et al. Single-chip silicon photonics 100-Gb/s coherent transceiver[C]//*Optical Fiber Communication Conference: Postdeadline Papers*, March 9-13, 2014, San Francisco, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2014: Th5C.1.
- [12] Doerr C, Heanue J, Chen L, et al. Silicon photonics coherent transceiver in a ball-grid array package[C]//*Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers*, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, D. C.: Optica

- Publishing Group, 2017: Th5D.5.
- [13] Fatholoulumi S, Hui D, Jadhav S, et al. 1.6 Tbps silicon photonics integrated circuit and 800 gbps photonic engine for switch co-packaging demonstration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(4): 1155-1161.
- [14] Liu J Q, Huang G H, Wang R N, et al. High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2236.
- [15] 乔玲玲,汪旻,伍荣波,等. 超低损耗铌酸锂光子学[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823012.
- [15] Qiao L L, Wang M, Wu R B, et al. Ultra-low loss lithium niobate photonics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823012.
- [16] 刘时杰,郑远林,陈险峰. 铌酸锂薄膜上的非线性频率变换[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823013.
- [16] Liu S J, Zheng Y L, Chen X F. Nonlinear frequency conversion in lithium niobate thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823013.
- [17] 刘宇,邓宜,卫航,等. 基于薄膜铌酸锂光波导的平坦光频率梳的设计[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1301001.
- [17] Liu Y, Deng Y, Wei H, et al. Design of flat optical frequency comb based on lithium niobate optical waveguide[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1301001.
- [18] Foty D, Gildenblat G. CMOS scaling theory - why our "theory of everything" still works, and what that means for the future [C]//*12th International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications*, November 8-9, 2004, Kruger National Park, South Africa. New York: IEEE Press, 2005: 27-38.
- [19] Lin Z X, Kang Z, Xu P P, et al. Turnkey generation of Kerr soliton microcombs on thin-film lithium niobate on insulator microresonators powered by the photorefractive effect[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 42932-42944.
- [20] Kippenberg T J, Gaeta A L, Lipson M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators[J]. *Science*, 2018, 361(6402): eaan8083.
- [21] Brasch V, Geiselmann M, Herr T, et al. Photonic chip-based optical frequency comb using soliton Cherenkov radiation[J]. *Science*, 2016, 351(6271): 357-360.
- [22] Del'Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator[J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214-1217.
- [23] Vico Triviño N, Dharanipathy U, Carlin J F, et al. Integrated photonics on silicon with wide bandgap GaN semiconductor[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(8): 081120.
- [24] Sato H, Abe M, Shoji I, et al. Accurate measurements of second-order nonlinear optical coefficients of 6H and 4H silicon carbide[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(10): 1892-1896.
- [25] 章建帅,张红军,孙辉. 量子相干调控金刚石锡空位色心光学双稳研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1219001.
- [25] Zhang J S, Zhang H J, Sun H. Controlling optical bistability through quantum coherence in tin-vacancy color centers in diamond[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1219001.
- [26] Castelletto S, Boretti A. Silicon carbide color centers for quantum applications[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2020, 2(2): 022001.
- [27] Lohrmann A, Johnson B C, McCallum J C, et al. A review on single photon sources in silicon carbide[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2017, 80(3): 034502.
- [28] Son N T, Anderson C P, Bourassa A, et al. Developing silicon carbide for quantum spintronics[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(19): 190501.
- [29] Yi A L, Wang C L, Zhou L P, et al. Silicon carbide for integrated photonics[J]. *Applied Physics Reviews*, 2022, 9(3): 031302.
- [30] Bracher D O, Zhang X Y, Hu E L. Selective Purcell enhancement of two closely linked zero-phonon transitions of a

- silicon carbide color center[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(16): 4060-4065.
- [31] Lu X Y, Lee J Y, Feng P X L, et al. High Q silicon carbide microdisk resonator[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(18): 181103.
- [32] Zheng Y, Pu M H, Yi A L, et al. 4H-SiC microring resonators for nonlinear integrated photonics[J]. Optics Letters, 2019, 44(23): 5784-5787.
- [33] Zheng Y, Yi A, Ye C, et al. Efficient second-harmonic generation in silicon carbide nanowaveguides[C]//2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 15-20, 2022, San Jose, California, United States. Washington: Optica, 2022.
- [34] Cardenas J, Yu M J, Okawachi Y, et al. Optical nonlinearities in high-confinement silicon carbide waveguides[J]. Optics Letters, 2015, 40(17): 4138-4141.
- [35] Fan T R, Moradinejad H, Wu X, et al. High-Q integrated photonic microresonators on 3C-SiC-on-insulator (SiCOI) platform[J]. Optics Express, 2018, 26(20): 25814-25826.
- [36] Fan T R, Wu X, Eftekhari A A, et al. High-quality integrated microdisk resonators in the visible-to-near-infrared wavelength range on a 3C-silicon carbide-on-insulator platform[J]. Optics Letters, 2019, 45(1): 153-156.
- [37] Yi A L, Zheng Y, Huang H, et al. Wafer-scale 4H-silicon carbide-on-insulator (4H-SiCOI) platform for nonlinear integrated optical devices[J]. Optical Materials, 2020, 107: 109990.
- [38] Song B S, Asano T, Jeon S, et al. Ultrahigh-Q photonic crystal nanocavities based on 4H silicon carbide[J]. Optica, 2019, 6(8): 991-995.
- [39] Wang C L, Fang Z W, Yi A L, et al. High-Q microresonators on 4H-silicon-carbide-on-insulator platform for nonlinear photonics[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 139.
- [40] Guidry M A, Yang K Y, Lukin D M, et al. Optical parametric oscillation in silicon carbide nanophotonics[J]. Optica, 2020, 7(9): 1139-1142.
- [41] Cai L T, Li J W, Wang R X, et al. Octave-spanning microcomb generation in 4H-silicon-carbide-on-insulator photonics platform[J]. Photonics Research, 2022, 10(4): 870-876.
- [42] Lukin D M, Dory C, Guidry M A, et al. 4H-silicon-carbide-on-insulator for integrated quantum and nonlinear photonics[J]. Nature Photonics, 2020, 14(5): 330-334.
- [43] Fan T, Moradinejad H, Wu X, et al. High Q Integrated Photonic Microresonators on 3C SiC-on-Insulator Platform[C]//2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 13-18, 2018, San Jose, California, United States. Washington: OSA, 2018.
- [44] Wu X, Fan T R, Eftekhari A A, et al. High-Q microresonators integrated with microheaters on a 3C-SiC-on-insulator platform [J]. Optics Letters, 2019, 44(20): 4941-4944.
- [45] Zheng Y, Pu M H, Yi A L, et al. High-quality factor, high-confinement microring resonators in 4H-silicon carbide-on-insulator[J]. Optics Express, 2019, 27(9): 13053-13060.
- [46] Lukin D, Dory C, Radulaski M, et al. 4H-SiC-on-insulator platform for quantum photonics[C]//CLEO: Science and Innovations, May 5-10, 2019, San Jose, California, United States. Washington: OSA, 2019: SM2F. 6.
- [47] Vuckovic J. Connecting quantum systems through optimized photonics (Conference Presentation)[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11091: 1109104.
- [48] Lukin D M, Guidry M A, Vučković J. Silicon carbide: from abrasives to quantum photonics[J]. Optics and Photonics News, 2021, 32(3): 34-41.
- [49] Guidry M A, Lukin D M, Yang K Y, et al. Quantum optics of soliton microcombs[J]. Nature Photonics, 2022, 16(1): 52-58.
- [50] Crook A L, Anderson C P, Miao K C, et al. Purcell enhancement of a single silicon carbide color center with coherent spin control[J]. Nano Letters, 2020, 20(5): 3427-3434.
- [51] Wang C L, Shen C, Yi A L, et al. Visible and near-infrared microdisk resonators on a 4H-silicon-carbide-on-insulator platform[J]. Optics Letters, 2021, 46(12): 2952-2955.
- [52] Zhou L P, Wang C L, Yi A L, et al. Photonic crystal nanobeam cavities based on 4H-silicon carbide on insulator[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(3): 031302.
- [53] Yamada S, Song B S, Asano T, et al. Silicon carbide-based photonic crystal nanocavities for ultra-broadband operation from infrared to visible wavelengths[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(20): 201102.
- [54] Powell K, Li L W, Shams-Ansari A, et al. Integrated silicon carbide electro-optic modulator[J]. Nature Communications, 2022, 13: 1851.
- [55] Fan T R, Wu X, Vangapandu S R M, et al. Racetrack microresonator based electro-optic phase shifters on a 3C silicon-carbide-on-insulator platform[J]. Optics Letters, 2021, 46(9): 2135-2158.
- [56] Wang R X, Li J W, Cai L T, et al. Investigation of the electro-optic effect in high-Q 4H-SiC microresonators[J]. Optics Letters, 2023, 48(6): 1482-1485.
- [57] Wang C L, Yi A L, Zheng P C, et al. High yield preparation of flexible single-crystalline 4H-silicon carbide nanomembranes via buried micro-trenches[J]. Optical Materials, 2021, 115: 111068.
- [58] Melzak J M. Silicon carbide for RF MEMS[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, June 8-13, 2003, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press, 2003: 1629-1632.
- [59] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy[J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 146-157.
- [60] Trubetskov A. Nobel Prize 2005: Glauber, Hall and Hänsch[J]. Nature Physics, 2005, 1(2): 930-930.
- [61] Chang L, Liu S T, Bowers J E. Integrated optical frequency comb technologies[J]. Nature Photonics, 2022, 16(2): 95-108.
- [62] Papp S B, Beha K, Del'Haye P, et al. Microresonator frequency comb optical clock[J]. Optica, 2014, 1(1): 10-14.
- [63] 高军萍, 赵盟盟, 卢嘉, 等. 基于单个强度调制器产生宽光学频率梳系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0913001.
- Gao J P, Zhao M M, Lu J, et al. Wide optical frequency comb system based on single intensity modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0913001.
- [64] Wang C L, Li J, Yi A L, et al. Soliton formation and spectral translation into visible on CMOS-compatible 4H-silicon-carbide-on-insulator platform[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 341.
- [65] Wang C L, Li J, Yi A L, et al. Soliton microcombs in silicon-carbide microresonators[C]//2022 IEEE Region 10 Conference (TENCON), November 1-4, 2022, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2022.
- [66] Jung H, Stoll R, Guo X, et al. Green, red, and IR frequency comb line generation from single IR pump in AlN microring resonator[J]. Optica, 2014, 1(6): 396-399.
- [67] Liu X W, Sun C Z, Xiong B, et al. Generation of multiple near-visible comb lines in an AlN microring via $\chi^{(2)}$ and $\chi^{(3)}$ optical nonlinearities[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(17): 171106.
- [68] Castelletto S. Silicon carbide single-photon sources: challenges and prospects[J]. Materials for Quantum Technology, 2021, 1(2): 023001.
- [69] Wang J W, Sciarrino F, Laing A, et al. Integrated photonic quantum technologies[J]. Nature Photonics, 2020, 14(5): 273-284.
- [70] Castelletto S, Johnson B C, Ivády V, et al. A silicon carbide room-temperature single-photon source[J]. Nature Materials,

- 2014, 13(2): 151-156.
- [71] Koehl W F, Buckley B B, Heremans F J, et al. Room temperature coherent control of defect spin qubits in silicon carbide[J]. *Nature*, 2011, 479(7371): 84-87.
- [72] Feynman R P, Zee A. QED: the strange theory of light and matter[M]. Princeton: Princeton University Press, 2006.
- [73] Jacob Z, Smolyaninov I I, Narimanov E E. Broadband Purcell effect: radiative decay engineering with metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(18): 181105.
- [74] Babin C, Stöhr R, Morioka N, et al. Fabrication and nanophotonic waveguide integration of silicon carbide colour centres with preserved spin-optical coherence[J]. *Nature Materials*, 2022, 21(1): 67-73.
- [75] Chen Y C, Salter P S, Niethammer M, et al. Laser writing of scalable single color centers in silicon carbide[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(4): 2377-2383.
- [76] Day A M, Dietz J R, Sutula M, et al. Laser writing of spin defects in nanophotonic cavities[J]. *Nature Materials*, 2023, 22(6): 696-702.
- [77] Lukin D M, Guidry M A, Vučković J. Integrated quantum photonics with silicon carbide: challenges and prospects[J]. *PRX Quantum*, 2020, 1(2): 020102.

Progress of Silicon Carbide Integrated Photonics

Wang Chengli^{1,2}, Cai Jiachen^{1,2}, Zhou Liping^{1,2}, Yi Ailun¹, Yang Bingcheng^{1,2},
Qin Yuanhao^{1,2}, Zhang Jiaxiang^{1,2**}, Ou Xin^{1,2*}

¹National Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Significance The industrialization in the fields of telecommunications, artificial intelligence, and the Internet of Things has steadily progressed. With the increasing demand for information transmission and data processing in these fields, it is not sustainable anymore to optimize processing speed only via increase in integration density and miniaturization of transistors, which are limited by the laws of physics, design complexity, and cost. Therefore, complementing the current lack of processing speed by other novel technologies is being widely discussed. Integrated photonics, which uses photons as information carriers, can be an alternative to meet the aforementioned requirements. Compared with traditional electrical circuits, photon integrated circuits leverage micro and nanoscale optical components to realize light transmission, which offer several prominent features such as high bandwidth, low power consumption, and ultrahigh transmission speed. Specifically, on-chip photonic systems can be used to host high-Q resonant cavities for enhancing light-matter interaction owing to the unique physical characteristics of photons and advanced manufacturing techniques. This in turn paves the way for applications in nonlinear photonics and quantum photonics.

Thus far, many manufacturing processes have been established for integrated photonics on various material platforms such as silica, III - V compound semiconductors, silicon, silicon nitride, and lithium niobate. Of these platforms, silicon-integrated photonics has remarkably progressed owing to mature manufacturing techniques for Si-based integrated circuits, whereas the absence of photoelectric characteristics and the high propagation loss are not beneficial for establishment of configurable photonic systems. Lithium niobate, which is considered a promising platform for integrated photonics, has been applied in ultrafast optical modulation and microwave photonics because of its remarkable attributes of second- and third-order nonlinearities and low optical loss; however, one must consider that its incompatibility with complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) and its photorefractive effect impede the commercialization of lithium niobate photonics. As direct bandgap semiconductors, the high-efficiency electroluminescence of III - V materials makes on-chip laser a plausible technique for large-scale photonic circuits; however, the relatively high propagation loss and narrow transparency window are still detrimental factors.

The development of silicon carbide-integrated photonics is in its infancy stage. Silicon carbide has attracted considerable research interest in the recent years owing to its remarkable material and optical properties, and it has gradually emerged as a candidate for industrialization of integrated photonics on account of its CMOS compatibility. Benefiting from the high nonlinear coefficients and low optical loss, silicon carbide has been extensively used to realize many nonlinear optical effects for fabrication of compact and scalable integrated photonic circuits. These effects include efficient second-harmonic generation, rapid electro-optical modulation, and silicon optical frequency comb generation, among others. Meanwhile, similar to diamond, there exist numerous spin defects in silicon carbide materials, and they have been proven to be impressive quantum light sources in optical resonators for study of cavity quantum electrodynamics

effects.

Currently, novel research works have confirmed the potential of silicon carbide photonics as an ideal candidate, but they are still plagued by several problems related to micromachining limitation and inefficient modulation. To further explore the industrial feasibility of photonics chips, the extra innovations in fabrication and device design are still required to attain a monolithic photonic system based on silicon carbide with linear modulating methods and configurable nonlinear effects. Therefore, one must comprehensively present the latest research progress on silicon carbide-integrated photonics, while relevant prominent performance should be indicated to emphasize the prospective of silicon carbide as a universal platform for integrated photonics.

Progress For achieving sufficient reliability and high density of integration, silicon-carbide-on-insulator (SiCOI) structures can be used to confine a light field within the functional layer without suspension. Preparations, including thin film preparation for 3C-SiCOI (see Fig. 1), smart-cut technology (see Fig. 2), and grinding thinning (see Fig. 3) for 4H-SiCOI, are introduced with specific process flow and material characterization. Among them, the research groups from Columbia University, Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, Stanford University, respectively, have prepared SiCOI with low surface roughness and low cost. The SiCOI platforms prepared using the aforementioned methods exhibit relatively low optical loss (see Table 2), which enable different nonlinear frequency conversions to be implemented on high-Q microcavities based on SiCOI. In terms of second-harmonic generation (see Fig. 4) and electro-optical modulation (Fig. 5), various devices such as waveguides, photonic crystals, and microrings in SiCOIs, as well as their fundamental principles and performance merits, are listed. Considering the generation of wide optical frequency combs, a comb spectrum with stable silicon states based on high-Q microcavities has been yielded in 4H-SiCOI (see Fig. 6); additionally, second-harmonic generation is favorable for broadening the comb spectrum by accomplishing the frequency conversion between the midinfrared and visible bands (see Fig. 7). Abundant color centers with attractive properties in silicon carbide allow for integration of color centers and microcavities (see Fig. 9) and coherent manipulation over nuclear spin qubits (see Fig. 10). Additionally, issues regarding precisely locating the color centers in 4H-SiCOI are considered vis-a-vis some recent studies (see Fig. 11). The challenges and prospects of silicon carbide photonics are discussed, including its commercialization requirements, application in quantum networks, heterogeneous integration for monolithic all-optical systems, and on-chip multiphysical field coupling.

Conclusions and Prospects Silicon carbide-integrated photonics has attracted considerable research interest in the recent years. On account of its salient nonlinearity and CMOS compatibility, silicon carbide has gradually emerged as a candidate material for integrated photonic circuits. With a view to fully benefiting from the impressive material and optical properties of silicon carbide, advanced fabrication methods and on-chip device designs must be explored for large-scale application of integrated photonics based on SiCOI. Moreover, in conjunction with CMOS electronic devices and acoustic devices, integrated photonics based on SiCOI will be capable of making silicon carbide as a promising material platform for achieving multiphysical field coupling in monolithically integrated photonics.

Key words photonic device; silicon carbide; nonlinear photonics; quantum photonics; integrated optical circuit