

上海微系统所发表关于碳化硅单晶薄膜制备技术及集成光子应用的综述文章

近日,《应用物理评论》(Applied Physics Reviews)在线发表了中国科学院上海微系统所信息功能材料国家重点实验室欧欣团队撰写的综述文章(Silicon carbide for integrated photonics),并被编辑推荐为该期刊7月份“热点文章”(Featured Article)。该综述以薄膜制备到光子器件实现为主体,全方位回顾了碳化硅单晶薄膜制备及其在集成非光学、光量子学和应用物理学等领域中的发展历程和关键技术,并展望了未来的发展方向与技术挑战。

光子集成电路(Photonic Integrated Circuit, PIC)由密集的分立集成光学元器件构成,工作时以光子为信息载体,有望解决目前信息技术领域面临的信息传输带宽和处理速度的问题。通常情况下,光子集成电路以硅作为材料平台,但基于单一硅基光子集成电路无法同时实现光子芯片所需的各项性能,因而新平台不断发展如铌酸锂(LiNbO₃)、磷化铟(InP)、氮化硅(Si₃N₄)、碳化硅(SiC)等材料平台。其中,SiC集成光学因SiC具有的高折射率、宽透光窗口、高非线性系数、CMOS工艺兼容等特性成为颇具潜力的集成光子芯片发展方向。

光子集成电路的衬底需求高质量的薄膜材料,碳化硅光子学发展十余年以来,多种技术方案制备的碳化硅薄膜被用于光子器件的验证,例如,外延生长、化学气相沉积、离子束剥离与转移、精密研磨抛光等薄膜制备方法。虽然碳化硅薄膜和光学器件的实现方法多样,但近年来碳化硅光子学领域的进展主要基于一种被称为绝缘体上碳化硅(SiC-on-insulator, SiCOI)的薄膜材料。SiC薄膜的晶型也有多种如3C-SiC、 β -SiC、4H-SiC等,其中,只有4H晶型因最大的禁带宽度(3.2 eV),产业界日渐成熟的6寸4H-SiC晶圆生长技术以及丰富的量子光源被广泛研究,4H-SiCOI薄膜材料成为产业与科研界的重点关注方向。

近年来,得益于碳化硅晶圆键合、精密抛光和微纳器件加工等技术的趋于成熟,高性能的集成光子器件在碳化硅平台上得以实现。这些光器件包括高品质因子光学谐振腔、低损耗波导、电光调制器、光学微腔频率梳、可调控量子光源等。在光学频率梳方面(图1),2021年上海微系统所欧欣团队和华东师范大学程亚团队合作,验证了高品质因子的SiC微腔及相应的宽谱光频梳产生【Light Sci Appl 10, 139 (2021)】,同年美国斯坦福大学Jelena课题组利用低温技术实现了孤子微梳【Nat. Photon. 16, 52-58 (2022)】,2022年美国卡耐基梅隆大学李庆研究团队通过色散设计实现了150THz倍频程的光频梳【Photon. Res. 10, 870-876 (2022)】。在电光调制器方面,CMOS级电压驱动的微环电光调制也得到验证【Nat. Commun. 13, 1851 (2022)】,其调制带宽大于10GHz,由于SiC的高导热特性,由SiC制成的电光调制模块在高功率耐受性能上要显著优于铌酸锂电光调制器和硅等离子色散调制器。

SiC在集成光子芯片上研究也取得了重要进展。SiC中的固态自旋色心光源具有优异的自旋性质,近期,中国科学技术大学许金时团队利用离子注入制备的PL6色心在室外下具备与金刚石NV色心相媲美的亮度(150k/s)和对比特度(30%)【Natl. Sci. Rev. 9, 5, nwab122 (2021)】。在碳化硅色心与微腔耦合调控方面,美国斯坦福大学Jelena团队在薄膜中实现单个硅空位色心的定位与调谐,并验证与微腔共振的色心光源发射强度可提升120倍【Nat. Photonics 14, 330-334 (2020)】。单光子源与微纳结构集成是集成量子光学的主要技术途径,通常与微纳结构集成的碳化硅色心面临自旋性质的衰退(相比于体材料),而研究利用低能量的He离子制备了与体材料SiC中色心具有同等自旋性质的色心(图2),这为下一步构建基于碳化硅色心体系的集成光子网络奠定了基础【Nat. Mater. 21, 67-73 (2022)】。

目前,SiC集成光子学正处于快速发展阶段。更大规模的碳化硅薄膜集成光路拥有重大机遇,也面临着挑战。鉴于光子集成技术本身经过在硅、III-V族、铌酸锂平台上的长期积累,相关器件的设计和微纳加工已具有比较成熟的方案,因此未来更大规模、更高集成度、更高性能的碳化硅光路的挑战主要来自于高质量碳化硅薄膜的制备。

上海微系统所异质集成XOI课题组在晶圆级的高性能SiC单晶薄膜的制备上开展了长期的、系统的研究:2019年,制备出高均匀度、4英寸的碳化硅单晶薄膜(SiCOI)异质衬底,开发了SiC微纳光子结构加工工艺【Opt. Mater. 107, 109990 (2020)】,同时,通过离子注入在薄膜中发现了室温下可寻址、可相干操控的新型双空位自旋态【npj Quantum Inf. 6, 38 (2020)】;2021年,在进一步优化材料损耗、晶圆键合、微纳加工工艺基础上,制备出超低损耗的碳化硅薄膜,并将SiCOI微腔的Q值提升到 7.1×10^6 ,该值为目前SiC光子学领域内的最高值,高质量SiC单晶薄膜的制备将带来能耗更低、性能更高、尺寸更为紧凑的光子学芯片【Light Sci. Appl. 10, 139 (2021)】;2022年,通过设计双层垂直耦合器和1X2多模干涉仪,将自组装量子点确定性光源转移到4H-SiCOI光芯片上,实现了确定性单光子的高效路由和二阶关联函数片上实验测量(Laser Photonics Rev. 2022, 2200172)。

SiC材料是极具魅力的半导体光学平台,集多种优异特性于一身,继承了硅的优异性能,兼具与金刚石比拟的特性,结合目前在SiC非线性光学及SiC片上量子光学领域取得的进展,可以预见SiC在更大规模的非线性光学、集成光学、片上量子光学等光子学应用中的广阔前景。正如SOI、LNOI的发展一样,实现集成光子学相关应用的前提需要以高质量的SiCOI材料为基础,科研人员将继续致力于这一发展方向,探究低损耗、高均匀度的4H-SiCOI制备方法,优化SiC微纳加工工艺,探索SiC色心自旋量子特性,推动SiC在非线性光学、集成光学、片上量子光学等光子学领域的发展。同时,本团队开发的SiC单晶薄膜制备技术有望进一步应用于低成本SiC晶圆的开发,在SiC功率器件、SiC/GaN射频器件方面具有广阔的应用前景。

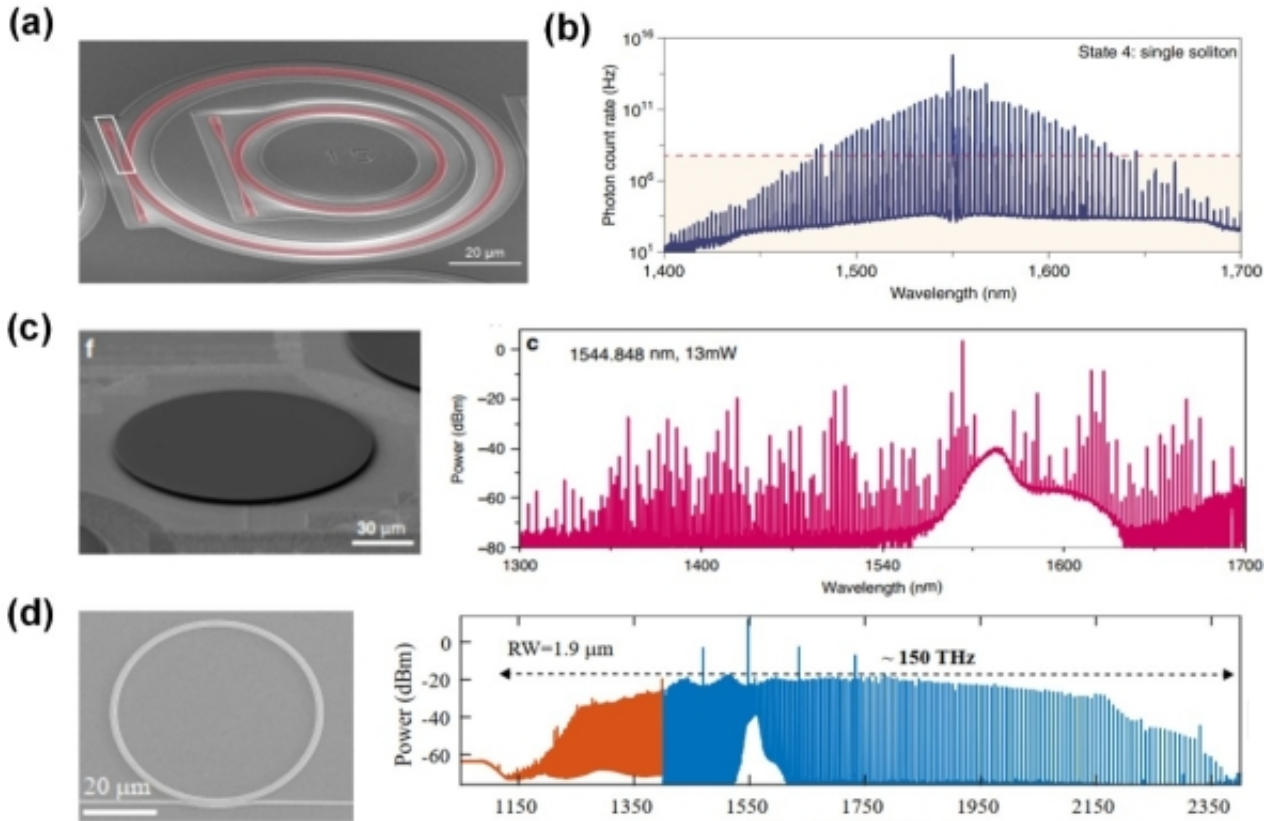


图1.碳化硅光学微腔中光学频率梳的产生

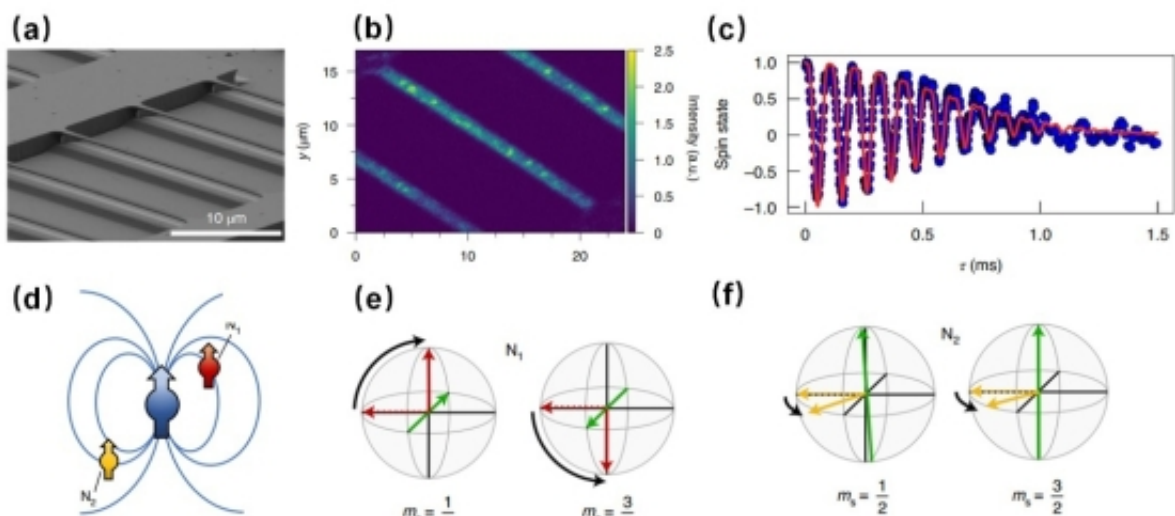


图2.与波导集成的碳化硅色心光源

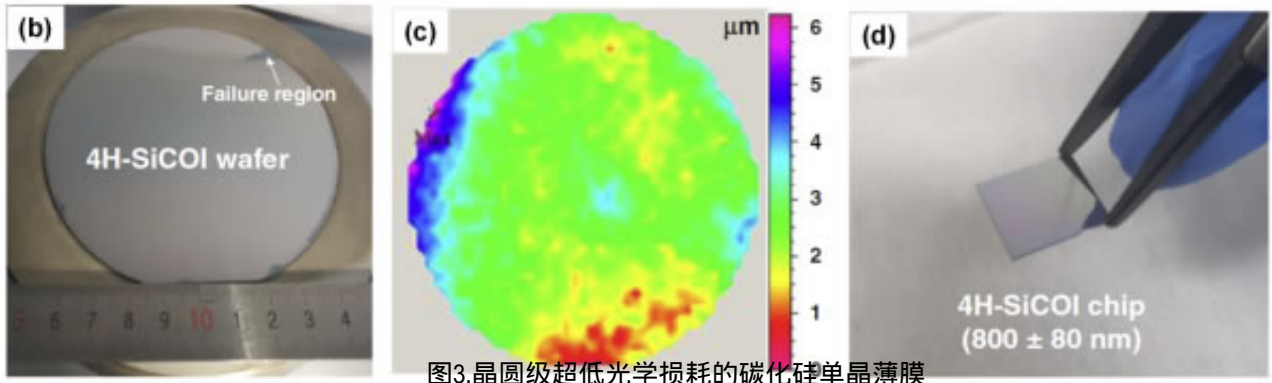


图3.晶圆级超低光学损耗的碳化硅单晶薄膜

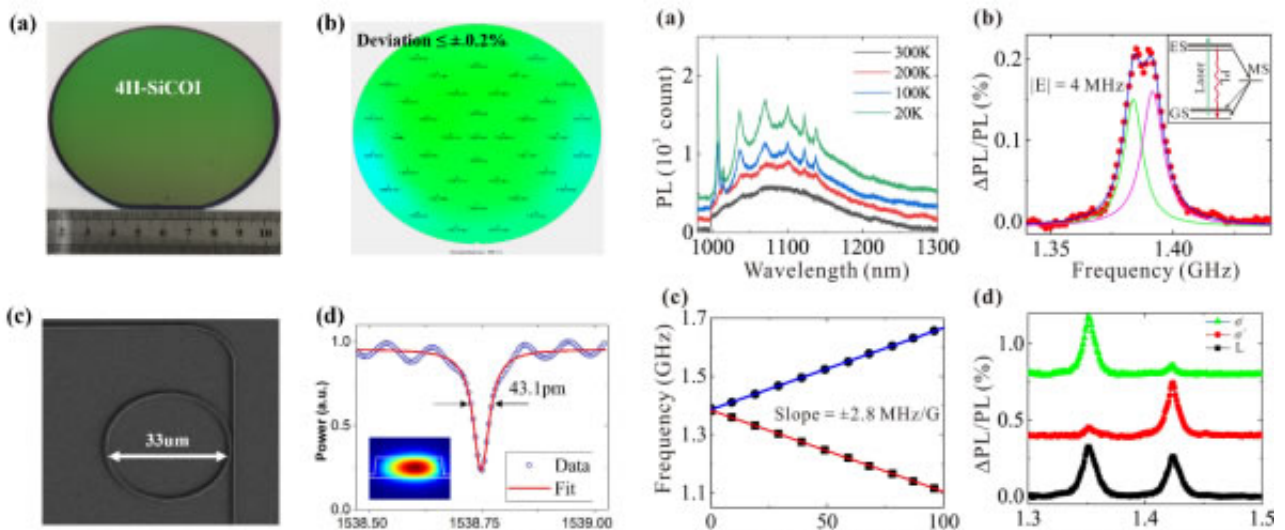


图4.4英寸晶圆级绝缘体上碳化硅薄膜及微环谐振腔；离子注入在4H-SiC中引入的新型发光缺陷PL81z

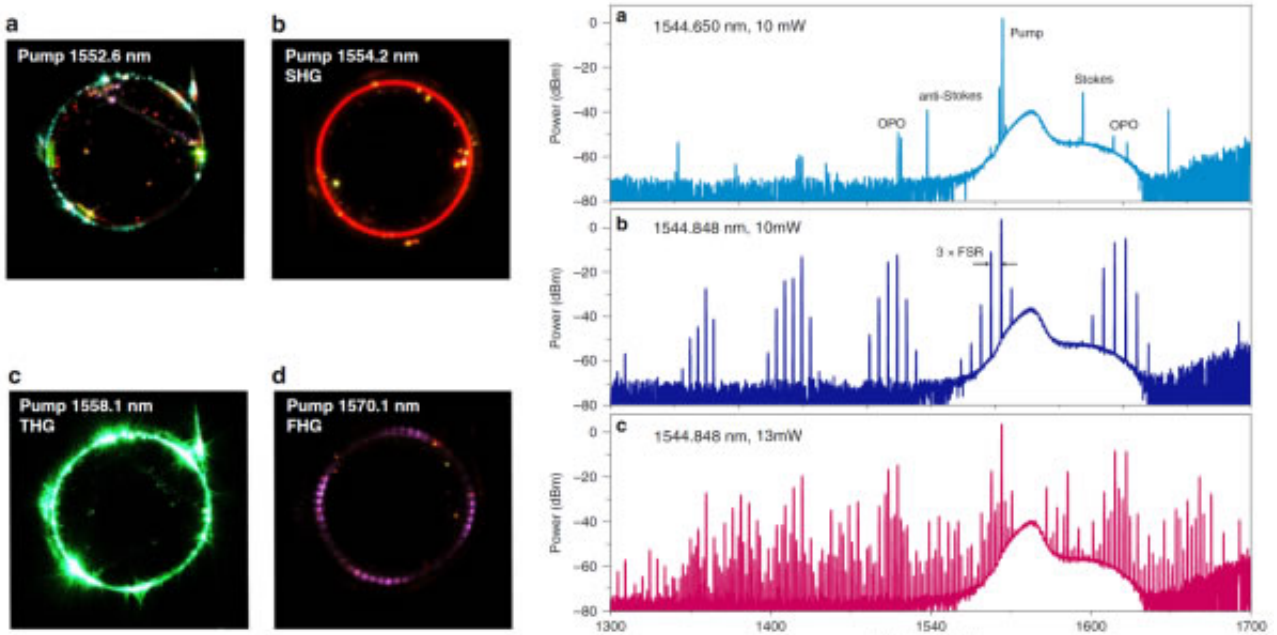


图5.超高Q值的SiC微谐振腔中的多次谐波现象和克尔光频梳

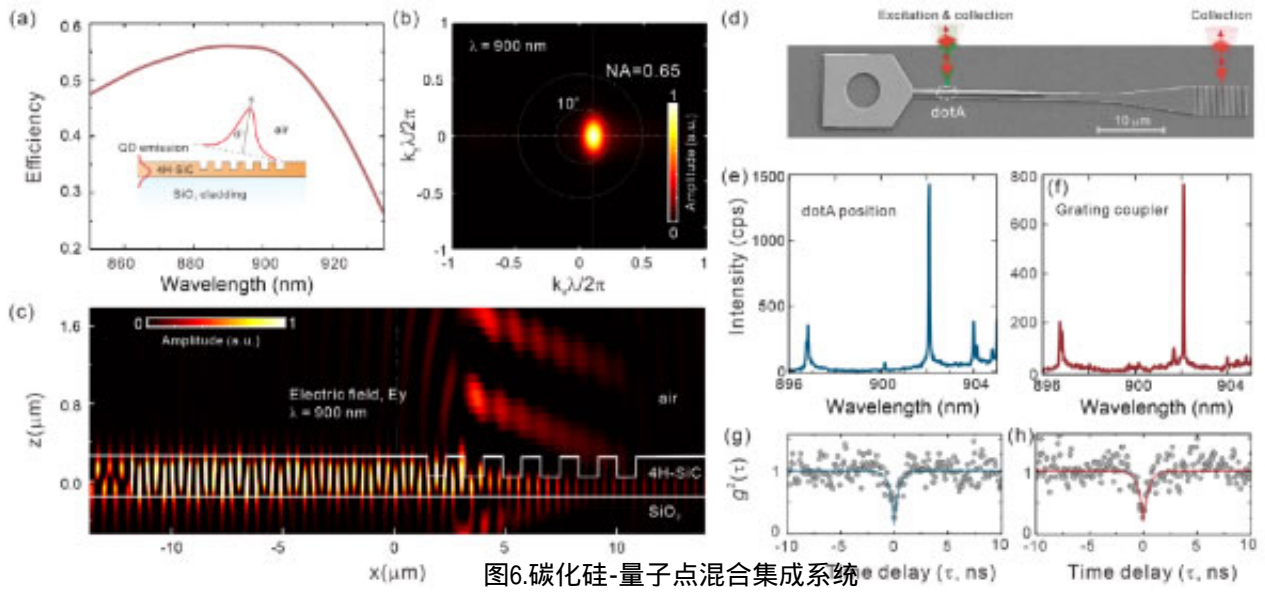


图6.碳化硅-量子点混合集成系统

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/185127.html>