

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250289.

专题:纪念创刊50周年

李文宇,吴沂浙,郑施冠卿,等. 基于微转印的硅基光子异质集成技术研究进展[J]. 光通信研究, 2025(6): 250289.

Li W Y, Wu Y Z, Zheng S G Q, et al. Heterogeneous Integrations on the Silicon Photonics Platform by Using the Micro Transfer Printing Method [J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 250289.

基于微转印的硅基光子异质集成技术研究进展

李文宇,吴沂浙,郑施冠卿,吴俊衍,段浩,宋亦飞,张宇,胡虞琳,徐晨曦,叶楠,宋英雄

(上海大学 通信与信息工程学院 特种光纤与光接入网重点实验室,上海 101400)

摘要:近年来,硅光子异质集成技术不断推进得到迅速发展,为解决硅基材料本身的局限性,微转印技术作为一种新的异质集成方案,在提高产品良率的同时降低了集成成本,其高效率 and 低损耗等优势逐渐被研究人员重视。文章从转印过程所使用的源材料及预制器件的角度出发,对微转印集成技术应用于硅基光子异质集成领域的研究情况进行了系统性综述。文章还阐述了微转印技术的灵活性与工程适用性,为未来高性能、多功能光子集成器件的开发提供了理论依据与技术参考。

关键词:硅光子学;光电异质集成;微转印集成技术

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A

Heterogeneous Integrations on the Silicon Photonics Platform by Using the Micro Transfer Printing Method

LI Wenyu, WU Yizhe, ZHENG Shiguanqing, WU Junyan, DUAN Hao, SONG Yifei, ZHANG Yu, HU Yulin,

XU Chenxi, YE Nan, SONG Yingxiong

(Key Laboratory of Special Optical Fiber and Optical Access Network, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 101400, China)

Abstract: In recent years, the technology of silicon photonics heterogeneous integration has been continuously advanced and developed rapidly. To address the limitations inherent in silicon-based materials, micro transfer printing technology, as a novel hetero-integration approach, has received much attentions. This technology not only enhances product yield but also reduces the integration costs, offering advantages such as high efficiency and low loss. This review systematically examines the application of micro transfer printing integration technology on the heterogeneous integrations for the silicon photonics platform focusing on the classification of source material coupon and pre-fabricated devices used in the transfer process. Furthermore, it elucidates the inherent flexibility and engineering applicability of micro transfer printing method, providing both a theoretical support and technical references for the development of advanced and multifunctional photonics integrated devices.

Key words: silicon photonics; optoelectronic heterojunction intergration; micro transfer printing integration technology

0 引言

得益于器件性能的大幅提升和集成复杂度的突破性进展,硅光子技术的研究与商业化进程显著加速,现已广泛应用于数据中心互连通信及各类传感器领域,包括激光雷达、陀螺仪、生物传感器和光谱仪等。由于硅基无源平台(包括基于绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)和 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 波导平台)本身具有较高的波导-包层折射率对比度,所制备的光波导对光传播的限制能力也较强。因而,基于其制备的器件尺寸较为紧凑;基于该平台也易于实现大量光子器件的高密度集成。由于其具有加工工艺与现有微电芯片制备使用的硅基互补金属氧化

物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺部分兼容且均匀性优异的特性,其可实现大批量制备且有效降低集成光芯片的制造成本,为大规模光电集成提供了极具潜力的基础平台。特别是,该平台还便于与现有电子系统兼容,可实现光-电协同工作,推动光子技术在数据中心通信和高性能计算等领域的应用。在光计算和光互连领域,该技术已能够为光-电混合计算和低延迟互连等提供支持,满足未来高性能计算和数据中心内部的高速互连需求^[1-7]。

然而,受限于硅基材料(如:单晶硅, SiN_x)在 O/C 波段极低的发光/吸收效率、低非线性特性及低非互异特性的瓶颈,为实现多功能集成硅基无源

收稿日期:2025-09-01; 修回日期:2025-10-13; 纸质出版日期:2025-12-10

基金项目:科技部重点研发资助项目(2022YFB2804502)

作者简介:李文宇(1998-),男,吉林扶余人。博士,主要研究方向为异质集成光电芯片。

通信作者:叶楠,副教授。E-mail:aslanye@shu.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

平台还需要额外引入高发光/吸收效率、高非线性及高非互异特性的异质材料。这使得可以在单一芯片上集成多材料系统的异质集成技术成为帮助硅基平台实现高性能、高集成度和全功能型集成片上光子系统的关键技术。

以在硅基平台集成 III-V 族有源材料为例,现有的异质集成技术所使用的主要方法包括:外延生长^[8-10]、片间集成以及键合集成技术^[11-15]等。虽然,外延生长被认为是在硅衬底上集成 III-V 族半导体材料的最佳解决方案,但由于 III-V 族材料和 Si 材料的晶格失配较大,在 Si 衬底上生长出高质量和低位错密度的 III-V 族层结构仍具有挑战性^[16-19]。因而,将这一技术直接推向工业化批量制备仍面临较大的风险。而且,对于难以使用外延方法制备的异质材料,该技术在多材料体系共集成/兼容集成方面仍面临瓶颈。而片间集成方法本质上仍属于微封装技术。虽然业界所应用的工艺较为成熟可靠且其可使封装模块具备较好的散热特性,但其整体所占据的空间仍然较大,不利于进一步实现高密度集成。特别是,光器件间的对准场景仍需要极高的对准精度和对准稳定性(且可重复),这使得其对设备的性能要求极高且整体的实施效率较低。从所利用的有源材料的平面尺寸这一维度来看,键合技术可分为晶圆级键合、裸片级键合(包括倒装芯片键合)以及微转印技术 3 个主要类别。晶圆级键合的集成尺寸通常在厘米×厘米量级;裸片-晶圆键合则是在 III-V 族晶圆上切割出单个裸片再进行集成,其平面尺寸处于毫米×毫米或亚毫米×亚毫米级别^[20];而微转印技术进一步将有源材料集成的平面尺寸压缩至微米×微米量级,特别是,该技术基于柔性转移及键合原理,能够在实现多材料体系样片/预制器件微单元无损转移的同时保持较高的集成良率,从而在有效发挥集成芯片平台多功能特性的同时兼顾异质有源材料的利用效率,因此,该方法适用于大批量和低成本制造的应用场景。此外,微转印还可以对不同体系材料的加工工艺平台进行耦合桥接,使有源器件和无源器件依据最匹配的工艺流程进行并行加工,从而实现异质材料/器件在加工流程

上的彼此解耦而显著压缩工艺切换/统一的开发时间和损耗成本,以此进一步满足异质集成芯片制造高效率 and 低成本的需求。

借助上述优势,微转印技术通过将异质材料样片/预制器件从源基底转移到目标基底来实现异质材料/预制器件的高精度及高效率集成。该技术已在多种材料平台中获得了应用,包括:钢磷(InP)基 III-V 族材料、砷化镓(GaAs)基 III-V 族材料、铋化镓(GaSb)基 III-V 族材料、硅(Si)、铌酸锂(LiNbO₃)、磷化镓、掺铈钇铁石榴石以及单晶金刚石等。围绕该技术,本文旨在探讨其在硅基光子异质集成领域的具体应用。进一步分析该技术的原理、优势及面临的挑战,为未来硅光子学器件的大规模、多功能集成及其商业化应用提供理论支持和技术参考。

1 微转印技术的基本原理

美国伊利诺伊大学香槟分校 John. Rogers 教授团队和西北大学黄永刚教授团队提出并开发了一种新型异质集成技术——微转印技术^[21],该技术可将微米或纳米尺度的材料/元器件样片从供体基底上分离并高精度的转移集成到受体基底上。如图 1 所示,在集成过程中,该技术首先使用弹性印章(如:聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)印章)将微器件样片从供体基底上无损剥离并转移,再精确地打印到受体基底的标定区域上。该技术的核心优势在于可适用于多种材料和器件(如:半导体、金属、聚合物和生物材料等),可实现图案化转移且材料利用率及对准精度都可以保持在较高水平。以在硅基衬底上集成 III-V 族材料为例,表 1 将微转印技术与现有其他异质集成技术进行了简单的对比。

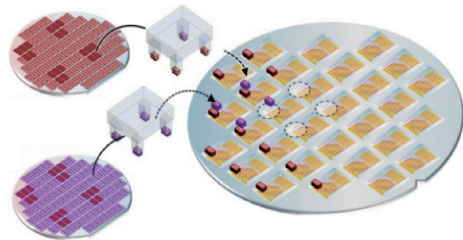


图 1 微转印过程示意图^[22]

Figure 1 Schematic diagram of micro transfer printing process^[22]

表 1 不同硅基-III-V 族材料异质集成技术比较^[23]

Table 1 Comparison of different heterojunction integration technologies for silicon-based III-V materials^[23]

技术	集成密度	CMOS 兼容性	III-V 材料利用率	对准精度	转移效率	成本	成熟度
倒装芯片 (晶圆)键合	低	后端兼容	中等	中等	中等	低	成熟
外延生长	高	后端兼容	中等	高	高	中等	成熟
微转印	高	前端兼容	非常高	高	高	中等	研发
	高	后端兼容	高	中等	高	低	研发

目前,微转印技术的研究热点主要聚焦于转印材料选择、转印材料/器件样片的制备以及转印工艺的实施等方面。按照转印工序的不同,微转印技术可以大致分成纯增材微转印技术、局部减材微转印技术以及确定性微转印技术^[24-25],表2对3种微转印技术进行了对比。纯增材微转印技术更加注重材料的直接沉积及组装,避免了复杂的蚀刻和去除工艺,以此提高制造效率和材料利用率;局部减材微转

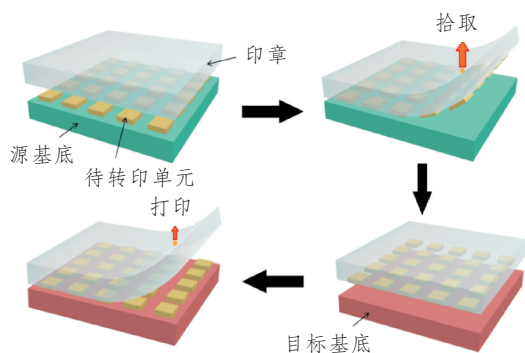
印技术旨在通过物理化学手段将局部材料去除,从而达到转印的目的,这种方法可以避免传统方法因接触应力而导致的材料损伤,尤其在脆弱的薄膜或纳米结构的转移方面较为常见;确定性微转印技术则使用弹性印章和高精度运动控制系统,有选择性地拾取微型器件/材料样片及阵列,并将其打印集成到目标基板上。

表2 微转印技术分类

Table 2 Classification of micro transfer printing

分类	核心原理	适用场景
纯增材微转印技术	整体转印,无损增材过程	并行制造
局部减材微转印技术	转印过程伴随蚀刻或去除	串行制造
确定性微转印技术	通过精准控制实现选择性转移	高精度、低缺陷的异质集成

截至目前,在基于微转印技术制备光电异质集成器件的过程中,常使用确定性微转印技术,即利用具有特定表面粘性的弹性印章或印模,通过精确控制界面黏附力,实现从供体基板到接收基板的高效、高精度转移(如图1所示)。而确定性微转印技术一般分为器件样片的提取和打印两个基本阶段。在器件样片的提取阶段,需要实现器件样片与原生衬底的分离。为了保护器件样片的内部结构以及辅助实现其与源基底的快速分离,通常还会在其上额外增加外包层结构。而器件样片的打印阶段则需要实现器件样片与目标衬底的稳定黏附。在该阶段通常会提前对目标基底进行处理来保证键合黏结过程的稳定实现。在提取/打印阶段,还要注意保证待转印材料样片及预制器件与源基体/印章成功实现分离。如图2所示,微转印过程一般利用印章将待转印的光电材料/器件样片从源基底上拾取,然后逐渐转移到目标基底上进行打印。

图2 确定微转印技术操作流程示意图^[26]Figure 2 Schematic diagram for determining the operation process of micro transfer printing technology^[26]

该技术成功实施的关键在于转移和打印过程中

印章、被转印单元和基底(包括源基底和目标基底)间各界面黏附力的调节与控制^[27]。而针对印章黏附力的控制主要是凭借经验与实验摸索的方法来完成。这些方法存在诸多不稳定因素,比如,实际操作中可能出现待转移器件样片与源基底黏连,或者无法将其完整、准确地转印到目标基底等情况^[28-31],因此,研究人员通过控制界面的能量释放率来控制界面分离行为,基于该原理,微转印技术可细分为以下几种类型:速度控制微转印^[32-33]、激光驱动微转印^[34-35]、胶带辅助微转印以及微结构印章辅助微转印^[36-37]。而转印集成作为多界面力的动态平衡过程,弹性PDMS印章在这一过程中起着重要的作用。在转印初始阶段,为了确保待转印样片能够稳定地附着在PDMS印章表面,通常要使印章与样片之间的黏附力大于样片与源基底之间的力。但值得注意的是,该黏附力对剥离速率具有较强的依赖性,即当我们快速剥离PDMS印章时,印章与样片间的黏附力较强,而当我们缓慢剥离PDMS印章时,印章与样片间的粘附力则较弱^[38]。因此,在转印时,常遵循快速拾取和慢速打印的原则。简单来说,PDMS印章与转印样片在垂直剥离时,能量释放率 $G(v)$ 与剥离速度 v 之间的函数关系为^[39]

$$G(v) = g_0 \left(1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^n \right), \quad (1)$$

式中: g_0 为速度为0时的临界能量释放速率; v_0 为临界能量释放速率加倍到 g_0 时的参考剥离速度; n 为一个实验过程中的缩放参数。

为了更好地描述微转印技术各个界面之间力的关系,建立了各力之间的定量关系。在器件样片

薄膜与基体之间形成的固-固界面中,其界面能量释放速率 G_F 本质上由材料的自身属性决定,该值一般为一个恒定的数值,不会随着剥离速度 v 的变化而变化。而 PDMS 印章与器件样片之间的能量释放速率 G_P 的值会受到 v 的影响。若想要成功转印,在器件样片的拾取过程中,则要求 PDMS 印章与器件样片界面的作用力 F_P 相较于器件样片与衬底间作用力 F_F 有如下关系:

$$F_P > F_F \quad (2)$$

对于剥离速度 v ,若令 v 为印章与器件样片薄膜之间的剥离速度, v_c 为器件样片薄膜与基底之间的剥离速度,则当 v 与 v_c 的关系发生变化时,即可实现拾取与打印。

2 基于源材料及预制器件分类的微转印集成研究进展

微转印集成技术正在为光电异质集成领域提供新的创新驱动动力,从消费电子领域的 micro-led(巨量转移)到片上量子技术的集成光源,其应用边界在不断扩展而推动光电芯片向更多功能和更低成本的方向发展。由于在转印的初始阶段需要考虑牺牲层刻蚀以及源材料样片及预制器件的保护和释放过程,而这又取决于所使用的源材料及预制器件的材料体系。因此,我们将基于不同源材料样片及预制器件对微转印技术在硅基光子异质集成领域的应用情况进行了分类阐述。

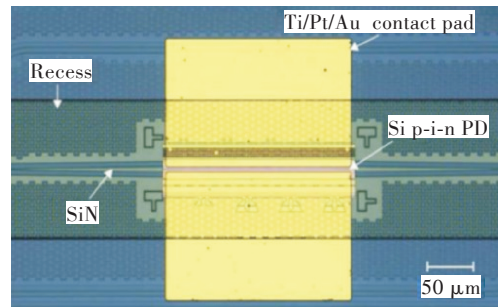
2.1 硅基薄膜材料样片及预制器件

硅基薄膜材料具有优异的机械硬度,借助高质量(高深宽比和低粗糙度)的刻蚀工艺,以及高精度图形定义能力(电子束曝光和深紫外曝光光刻),可基于其实现纳米量级高精度的微纳加工。特别是,在使用含氟的液体/气体作为腐蚀剂时,基于 SOI 平台的硅薄膜材料与作为牺牲层的埋氧 SiO_2 具有极高的刻蚀选择比而易于完成释放过程。在本节中,我们将对已发表的硅基薄膜材料样片和预制器件的微转印集成工作进行总结。具体如下。

2012年,Yang 等人^[40]提出了一种基于多层半导体纳米膜堆叠技术与印章辅助微转印工艺的硅基薄膜反射镜面发射激光器。通过将 III-V 族 In-GaAsP 量子阱增益介质夹置于两个硅基光子晶体法诺共振薄膜反射镜之间,实现了超薄(总厚度 $\leq 2 \mu\text{m}$)、高性能的激光器结构。该研究突破了传统分布式布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)的局限,利用单层光子晶体硅膜实现了 >

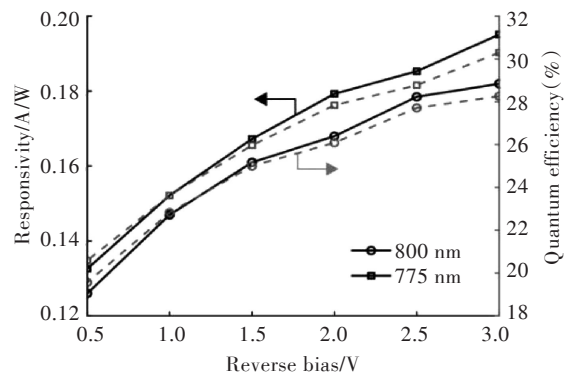
99% 的高反射率,并通过低温微转印工艺在硅衬底上实现了高精度垂直激光腔的堆叠式构建。

2022年,根特大学的 Cuyvers 等人^[41]首次利用微转印技术将硅基 p-i-n 光电二极管(Si p-i-n Photodiodes, Si p-i-n PD)集成于商用 SiN 波导平台如图 3 所示。研究团队开发了基于气相氢氟酸释放刻蚀的新型工艺流程,解决了传统液相刻蚀导致的器件塌陷问题,使微转印良率接近 100%。所制备的集成型 PD 其工作波长处于 775~800 nm 范围。在 -3 V 偏置电压下,其光响应度约为 0.19 A/W(量子效率约 30%)。



(a) 采用微转印技术在 SiN 目标衬底上集成并后加工的 Si p-i-n PD

(a) Si p-i-n PD integrated and post-processed on a SiN target substrate using micro transfer printing technology



(b) 集成 PD 的响应度和外量子效率

(b) Responsivity and external quantum efficiency of integrated PD

图 3 微转印集成并后加工的 Si-SiN PD^[41]

Figure 3 Si-SiN PD integrated with micro transfer printing and post-processing^[41]

2018年,斯特拉斯克莱德大学的 Mcphillimy 等人^[42]提出了一种集成单模薄膜硅光子器件的微转印技术。该团队通过使用高精度对准方案,实现了单模硅波导的垂直集成并获得了 $100 \pm 70 \text{ nm}$ 的平均放置精度。同年,根特大学的 Ye 等人^[43]展示了基于硅基绝热锥形耦合器的高精度转印实验。通过在目标靶基底与转印器件(绝热锥结构耦合器波导)上制作对准标记,再利用图像识别软件识别对准标

记结构,并将其几何中心进行对齐。最终,该方案有效降低了由于位移误差带来的耦合损耗。在 $1\ \mu\text{m}$ 的位移误差下,集成器件的耦合效率也能够优于 75%,对准后的绝热锥形耦合器在 $1\ 310\ \text{nm}$ 处实现了 $-1.5\pm 0.5\ \text{dB}$ 的耦合损耗,在 $1\ 600\ \text{nm}$ 处实现了 $-0.5\pm 0.5\ \text{dB}$ 的耦合损耗。器件的版图结构如图 4 所示。

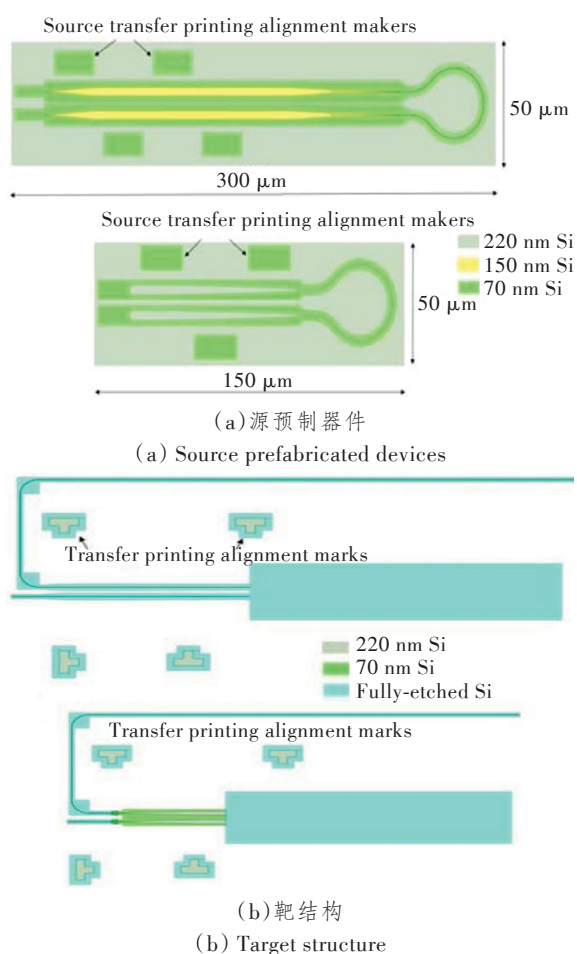


图 4 硅基无源预制器件及靶结构的版图设计^[43]
Figure 4 Layout design of silicon-based passive source-free prefabricated devices and target structures^[43]

2025 年,斯特拉斯克莱德大学的 Bommer 等人^[44]提出并验证了一种基于微转印的微米级光子晶体腔(Photonic Crystal Cavities, PhCC)像素化微组装方法,以克服纳米制造中几何误差导致的共振波长偏移问题。团队将 119 个硅基 PhCC 像素从其原生衬底中释放、测量、按共振波长分档,并通过高精度微转印系统重新组装成有序阵列。团队在实现了亚纳米级波长精度的同时也实时观察到了转移过程中腔体共振波长因应力引起的瞬态弹性漂移特性。该团队的这一实验证明该集成方案可在多次重复转移后保持腔体性能不变且支持高密度集成(最

小间距 $7\ \mu\text{m}$)。

上述方案中所处理的源材料样片的平面尺寸多位于 μm^2 量级。2024 年,上海大学通信与信息工程学院叶楠、宋英雄教授团队提出了一种面向更大面积薄膜材料的微转印方法,以此实现了 mm^2 裸片级硅薄膜材料样片在玻璃基板上的异质集成。该团队通过在硅薄膜样片内部引入孔阵列结构,使用带微结构的 PDMS 印章,最终在没有使用黏合剂的情况下借助范德华力完成了异质材料的直接键合。该方案成功地将面积为 $1.5\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$ 以及 $3.0\ \text{mm}\times 3.0\ \text{mm}$,厚度为 $220\ \text{nm}$ 的硅薄膜样片集成到了带有对准标记的玻璃基板上。

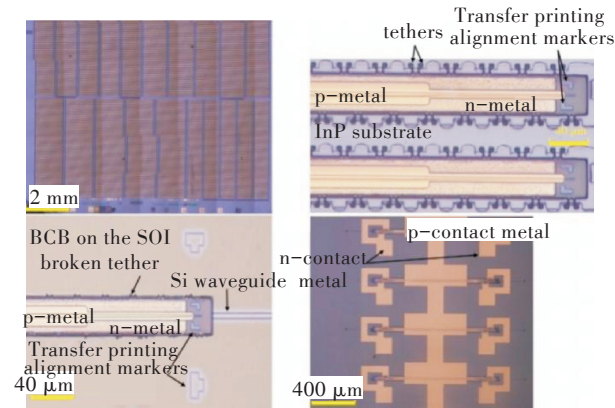
各类硅基薄膜材料在微转印技术中均展现出了独特潜力,其各有明确的优劣与适用场景。晶体硅凭借其高集成度、高带宽和与 CMOS 工艺的无缝兼容性,成为构建大规模光子集成电路最理想的主平台,尤其适用于数据中心光互连与光子计算;然而,其光源缺失和传输损耗问题需依赖其他材料弥补。SiN 则以超低损耗为核心优势,是低噪声和长距离传输应用(如延迟线与传感)的关键,但缺乏电光调制能力。

2.2 InP 基 III-V 族材料样片及预制器件

作为发光器件光源材料的 InP 基 III-V 族材料(如 InGaAsP、InGaAlAs)为直接带隙半导体,电子-空穴复合时辐射效率极高。通过调节组分调整带隙可使发射波长匹配光纤通信的 O 波段($1\ 260\sim 1\ 360\ \text{nm}$)和 C/L 波段($1\ 530\sim 1\ 625\ \text{nm}$)。不同组分材料组成的量子阱结构具备很高的载流子限制能力,这使得激光器的阈值电流密度高,工作温度范围宽。特别是,作为牺牲层的 InGaAs 材料或者铝镓砷(AlGaAs)材料与衬底及刻蚀阻挡层具有很高的选择刻蚀比,这使得其适合微转印工艺中有源结构的释放操作。接下来,我们将总结已发表的 InP 基 III-V 族光源材料/预制器件微转印工作。具体如下。

2020 年,根特大学的 Haq 等人^[45]利用微转印技术将在 InP 源晶片上制造的半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)试样集成到硅光子回路上,进而制造出了工作于 C 波段的单模硅基分布式反馈激光器(Distributed Feedback Lasers, DFB)。在 $20\ ^\circ\text{C}$ 时,该器件可获得 $80\ \text{mA}$ 阈值电流和高于 $6.9\ \text{mW}$ 的最大单侧波导耦合输出功率。基于微转印的异构集成方案有望在不改变代工工艺流程的情况下,在复杂的硅光子集成平台上实现先进激光源的晶圆级集成;2020 年,根特大学

的 Haq 等人^[46]发表了通过微转印技术将预制的 C 波段 SOA 集成到硅波导光路上的研究成果。其中,SOA 的总长度为 1.35 mm、宽度为 40 μm 。基于该方案可以在 InP 源晶圆上制备密集的 III-V 族 SOA 阵列,然后大规模并行转印到目标 SOI 光子光路上。而且,该方案能在同一 SOI 波导光路上集成不同的外延层结构,如图 5 所示。结合所设计的锥形结构来辅助对准,该器件在转印过程中可以实现 1.0~1.5 μm 的对准精度。



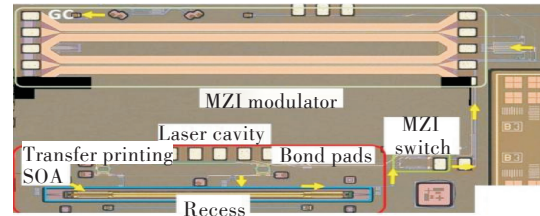
注:BCB 为苯并环丁烯;p-metal、n-metal 为两个电极;p-contact metal 和 n-contact metal 分别为 p 和 n 型接触电极。

图 5 C 波段硅基异质集成光放大器及 DFB 芯片^[46]

Figure 5 C-band heterogeneously integrated Silicon-based optical amplifiers and DFB Chips^[46]

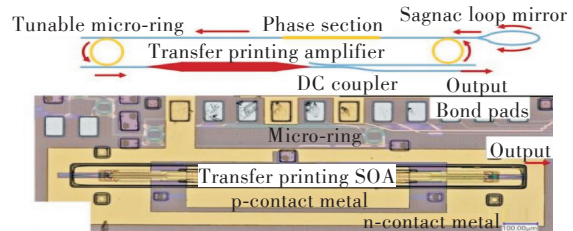
2022 年,Zhang 等人^[47]使用微转印技术实现了宽可调 III-V-on-Si 激光器与马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)的共集成。该集成型发射器的光学显微示意图如图 6(a)和图 6(b)所示。紧接着,2023 年该团队又利用微转印技术实现了含有共集成光功率放大器的 C 波段 III-V-on-Si DFB^[48],如图 6(c)和图 6(d)所示,图中, I 为电流。该器件在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下于 1 540 nm 处表现出单模工作的特性。通过同时驱动 DFB 和共集成光功率放大器,在 270 mA 的总偏置电流下,器件实现了高达 14 dBm 的波导耦合输出功率和超过 28 dB 的侧模抑制比。

2023 年,根特大学的 Pan 等人^[49]采用微转印技术在 200 mm SiN 平台上实现了一种异质集成型窄线宽可调激光器。该实验中利用非晶态 Si 充当 SiN₂ 波导和 InP 有源层之间的桥接层,从而实现了两者之间的高效耦合。如图 6(e)和图 6(f)所示,该激光器在 124 mA 偏置电流下可以提供 0.36 mW 的光纤耦合输出功率,相当于 1.5 mW 的波导耦合



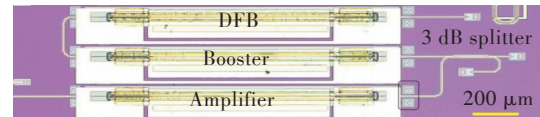
注:MZI 为马赫-曾德尔干涉仪
(a)片上激光腔的版图设计示意图

(a) Schematic diagram of the layout design of the on-chip laser cavity



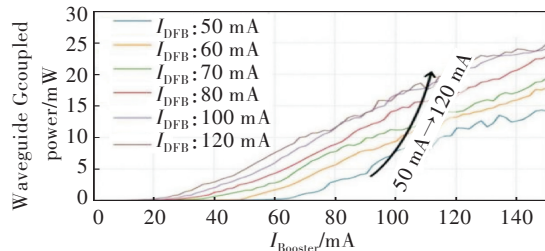
(b)具有转印集成 III-V 族有源放大区(未进行 SOA 金属化工序)的宽可调激光器的显微图像

(b) Microscopic image of a tunable laser with a transferred integrated III-V active amplification region (without undergoing the SOA metallization process)



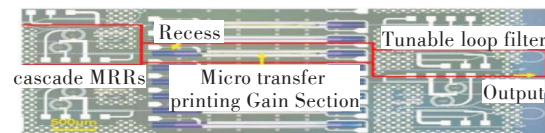
(c)共集成光功率放大器的 C 波段 III-V-on-Si DFB

(c) C-band III-V-on-Si DFB with co-integrated optical power amplifier



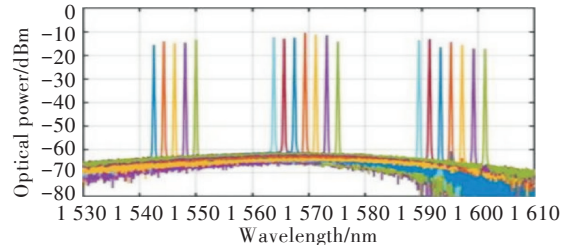
(d)DFB 测试结果

(d) Test results of DFB



注:MRR 为微环谐振器。
(e)集成于 SiN 平台上的可调谐窄线宽激光器

(e) Tunable narrow linewidth laser integrated on SiN platform



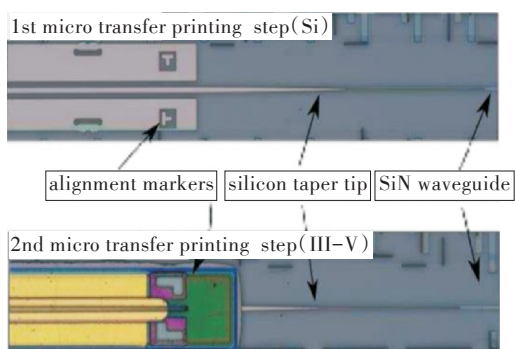
(f)可调谐窄线宽激光器测试结果

(f) Test results of tunable narrow linewidth laser

图 6 微转印硅基异质集成激光器的光学显微镜观察示意图及表征结果^[47-49]

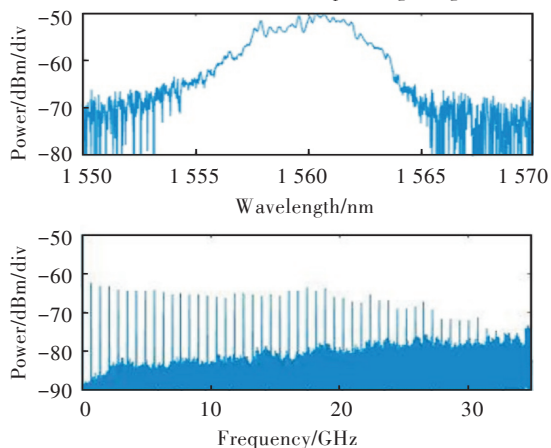
Figure 6 Schematic diagram of optical microscope observation and characterization results of micro transfer printing silicon-based heterostructure integrated laser^[47-49]

输出功率。该激光器展现出了优异的波长调谐特性,在 60 nm 连续调谐范围内始终保持稳定的单模工作状态。器件的输出边模抑制比始终优于 40 dB 且保持低至约 3 kHz 的输出线宽。2024 年,该团队基于微转印技术在 imec 的 200 mm 低损耗 SiN 平台上制备了一种 InP-Si₃N₄ 可调谐激光器^[50]。该器件在 C+L 波段的波长调谐范围为 54 nm,输出边模抑制比超过 40 dB。2023 年, Poelman 等人^[51]在通用的商用低损耗无源光子平台上展示了一种重复率为 710 MHz 的异质集成 III-V-on-SiN 锁模激光器,如图 7 所示。该器件采用两步微转印的方法实现了高耦合效率,可在凹槽中实现异质集成。这种制造方法为在多种集成光子平台(如薄膜铌酸锂(Thin-Film Lithium Niobate, TFLN)或 SiN)上构建更先进的激光光源铺平了道路。



(a) 第 1 次微转印集成后的硅耦合器及第 2 次微转印集成后的 InP 基 SOA 的光学显微图像

(a) Optical microscope images of the silicon coupler after the first micro transfer printing integration and the InP-based SOA after the second micro transfer printing integration



(b) 锁模激光器时相应的光学和电光谱

(b) Corresponding optical and electrical spectra of a mode-locked laser

图 7 基于两次微转印的 III-V-on-SiN 硅基异质集成锁模激光器^[51]

Figure 7 III-V-on-SiN silicon-based heterostructure integrated mode-locked laser based on secondary micro transfer printing^[51]

2024 年,日本 NTT 实验室的 Maeda 等人^[52]展示了一种使用微转印技术实现薄膜型直接调制激光器(Directly Modulated Lasers, DML)与聚合物波导共集成的新方案。该团队制备的集成型 DML 器件实现了毫瓦级别的光纤耦合输出光功率。基于该器件,该团队还调制产生了 50 Gbit/s 的非归零编码(Non-Return-to-Zero, NRZ)和 100 Gbit/s 的四电平脉冲幅度调制(4-Level Pulse Amplitude Modulation, PAM4)信号。同年,爱尔兰达尔国家研究所的 Ghosh 等人^[53]采用微转印技术将基于 InP 的 O 波段边缘发射型激光器集成到硅光子回路上,将尺寸为 1 000 μm \times 60 μm 的无图案化 InP 增益材料块转移到 400 nm 厚的硅脊波导上,接着在目标晶圆上执行制造步骤以实现完整的激光器结构,该方法为在 300 mm 直径硅晶片上推进激光器、调制器和检测器等有源器件的共集成提供了一条可行的新途径。2025 年,根特大学的 Guo 等人^[54]利用微转印技术将 SOA 转移印刷至硅基光路上,最终,在 200 mm SOI 晶圆上实现了集成型短波红外波段可调谐激光器,器件以 InP 基 SOA 为增益介质,两端设绝热 taper 结构与硅波导耦合,采用两个不同半径的热调谐微环谐振器构成游标滤波器实现波长选择与调谐。该激光器的阈值电流约 75 mA,在 120 mA 注入电流时的最大输出功率为 2.2 mW。器件可在 1 643~1 707 nm 范围内实现调谐且支持 0.5 nm 步长的精细调谐。

作为有源吸收材料的 InP 基 III-V 族材料(如: InGaAs),具有 O/C 波段高吸收系数且与衬底晶格匹配而具有很低的缺陷密度。这使得基于该材料体系制备的光电探测器具有低暗电流、低噪声、高量子效率及高响应度的特性。特别是材料自身的载流子饱和漂移速度高,使得所制备的探测器件具有超快的响应速度(3 dB 带宽可突破 100 GHz)。接下来,我们将总结已发表的 InP III-V 族光探测材料/预制器件的微转印工作。具体如下。

2017 年,根特大学的 Zhang 等人^[55]首次实现了预制 InP 基光电探测器器件的集成。转印集成的 O 波段探测器的有源区厚度约为 2 μm ,面积约为 30 μm \times 40 μm 。在拾取时,通过 PDMS 薄膜图章的快速抬起使拴绳断裂;在打印时,通过施加的剪切力使器件与图章分离。在目标 SOI 器件表面预先涂覆有 BCB 粘接层。器件被打印至目标位置后,需要使用反应离子束刻蚀去除表面的光刻胶封装结构。随后,将 BCB 粘接层完全固化,使器件与 SOI

芯片上的光栅构成耦合光路。集成后的探测器响应度约为 $0.39\sim 0.49$ A/W, 在 -3 V 偏压下具有 11.5 GHz 的 3 dB 带宽。

2023年,弗吉尼亚大学的 Yu 等人^[56]介绍了一种通过微转印技术在 SiN/Si 平台上集成的改进型单行载流子波导 PD,如图 8 所示。该器件采用含短 InGaAsP 波导的结构,通过对接耦合与 Si₃N₄ 波导连接。经微转印实现集成之后,该集成器件在 -3 V 偏压下暗电流低于 30 nA;在 1310 nm 波长下响应度达 0.42 A/W;工作带宽达 54 GHz;在 50 GHz 时射频输出功率高达 $+7$ dBm;带宽-饱和电流乘积为 1188 GHz·mA。该团队首次实现了该类高功率高速器件在 Si₃N₄/Si 平台上的有效集成。

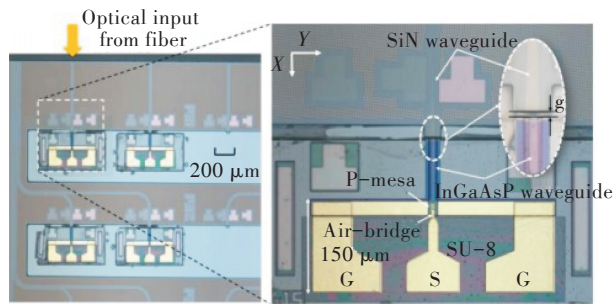


图 8 转印集成波导型 PD 的光学显微镜观察图^[56]

Figure 8 Optical microscopic observation image of transferred integrated waveguide PD^[56]

2022年,南京大学的 Wang 等人^[57]提出并制备了一种基于微转印工艺的带有背反射器的面入射型 InP/InGaAs p-i-n 光电探测器。在该器件的制备过程中,采用 SiN 材料替代光刻胶来制备拴绳结构。最终,将预制探测器件从 InP 衬底转移至带金属背反射器的 Si 衬底上。进一步,利用二次及多次反射光来提升吸收效率,从而实现了 0.78 A/W 的高光学响应度(较非集成器件提升 77%)以及 54 GHz 的 3 dB 带宽。

2024年,爱尔兰丁达尔实验室的 Arafat 等人^[58]采用微转印技术将 $2\ \mu\text{m}$ 波段的 InGaAs PD 集成到 SOI 波导光路上,该 PD 采用含 25 个应变平衡 InGaAs 多量子阱的 p-i-n 结构,经微转印集成后,器件的输出暗电流低于 15 nA;在 2 V 反向偏压下器件输出响应度达 0.45 A/W,该器件所展现出的优异性能使其在短波红外传感领域具有应用潜力;同年,上海大学叶楠、宋英雄教授团队^[59]基于微转印方法实现了 III-V-on-SOI 异质集成雪崩光电探测器(Avalanche Photodiode, APD),该团队使用直接接触界面间的范德华力作为衬底/器件间的黏

附力,通过控制图章/器件分离速度对界面间黏附力的强度进行有效调节,最终实现了 III-V 族 APD 器件与 SOI 片上耦合光栅结构的有效集成,与其他微转印方法相比,该方法保留了有源器件的衬底,通过自然解理实现芯粒级器件的分离,从而有效避免了保护层制备、拴绳加工以及牺牲层湿法腐蚀等复杂工艺,集成器件的 3 dB 响应带宽约为 4 GHz,暗电流达到 13 nA,与集成前样片性能基本一致,受到光纤-光栅耦合损耗及光栅 InP 衬底耦合损耗的影响,集成后器件的响应度为 7.3×10^{-3} A/W,波导到 III-V 族 APD 的响应度约为 1.8×10^{-2} A/W,值得注意的是,该团队已从单纯的材料样片及预制器件的转印集成,转向基于完整器件的整体解决方案,具体而言,他们成功地将功能器件以芯粒的形式与硅基光子回路在片上进行了异质异构集成。

综上,InP 基 III-V 族光电材料样片及预制器件的微转印集成已经取得了显著的进展。采用微转印技术不仅降低了这一材料体系中有源材料的消耗程度,还实现了基于晶圆级硅基无源平台的大面积集成。这为光通信、传感和显示等领域的集成光芯片应用提供了一种高效的异质集成解决方案。

在硅光异质集成技术中,InP 等 III-V 族材料通过微转印实现的定位极为独特且不可替代。其核心优势在作为高性能有源器件的解决方案中有体现,特别是在解决硅基材料不足的问题方面。在集成密度上,尽管 III-V 器件本身尺寸限制了单片集成度,但微转印技术实现了在微小面积上的高密度和选择性异质集成,优于传统混合集成方法;在耦合效率方面,转印的 III-V 激光器或放大器可与硅波导实现超高效率的端面或垂直光耦合,这是实现低功耗片上光互连的关键;在带宽与性能上,III-V 材料本身具备较高的调制与探测响应速度,能满足从数据中心互连到相干通信的苛刻带宽需求。然而,其工艺复杂度最高,III-V 材料与硅 CMOS 工艺线不兼容,其外延、制备及微转印过程中的键合与对准精度要求都极为苛刻,导致成本高昂。此外,作为有源器件,其传输损耗通常不是首要考量因素,器件的量子效率、输出功率与线性度更为关键。综上所述,InP 基 III-V 材料的微转印技术弥补了硅基光子在“光源”与“高性能有源功能”上的短板,适用于对激光器、放大器 and 高速调制/探测器有迫切需求的场景,是实现完整且强大光电集成系统的关键技术。

2.3 GaAs 基 III-V 族材料样片及预制器件

基于 GaAs 材料的系统的光-电/电-光特性也

可以通过调整相关元素或外延结构的组分来进行调整,非常适用于开发高性能激光器、PD 以及非线性半导体光子器件^[60-62]。

2012年,爱尔兰科克大学的 Justice 等人^[63]提出了一种通过转印外延层在硅衬底上实现 III-V 族激光器晶圆级集成的方案,即利用弹性印章选择性释放并转移 GaAs 外延芯片,通过晶圆级加工工艺在硅衬底上制备出 III-V 族激光器,这些法布里-珀罗脊形波导激光器可在 824 nm 波长处实现低阈值连续波激射,工作温度可达 100 °C。单横模和多横模器件的输出总光功率均超过 60 mW,调制带宽超过 3 GHz。

特别是,基于 InAs/GaAs 量子点(Quantum Dot, QD)结构制备的激光光源具有极低的阈值电流,可实现室温连续激射、宽温区工作以及宽波长扩展能力,且其输出波长可扩展至 1 300 nm 附近的光纤通信窗口波段。接下来,我们将总结已发表 GaAs 基光源材料/预制器件的微转印工作。具体如下:

2019年,东京大学的 Katsumi 等人^[64]展示了一

种采用微转印技术将 InAs/GaAs QD 单光子源集成到 CMOS 工艺制备的硅光子波导上的异质单光子源集成方案,该方案将 QD 嵌入一维光子晶体纳米梁腔以实现高效光耦合;通过 PDMS 印章的“拾取-放置”来完成材料转移,其工艺完全兼容 CMOS 的后端流程。该团队进一步通过实验验证了集成器件中 QD 的单光子发射特性($g^{(2)}(0) = 0.30$);测得腔-波导耦合效率为 90%,QD-腔耦合效率约为 75%,总耦合效率约为 70%。该团队的这项作为大规模量子光子集成的实现提供了一种可行的路径。

2023年,科克大学的 Uzun 等人^[65]基于微转印技术采用边缘耦合方案实现了 GaAs QD 激光器与不同硅光子平台(220 nm 薄膜硅波导、3 μm 厚硅波导以及 SiN 波导)的异质集成,如图 9 所示。对于长度达 2.4 mm 的样品,使用超薄 BCB 胶粘剂获得了高达 90% 的转印良率。所有方案均可实现低横向偏移(<500 nm)量的高精度集成,且所制备的器件的阈值电流可以控制在 20~30 mA 范围内。除微转印技术之外,该团队还展现了边缘耦合方案在

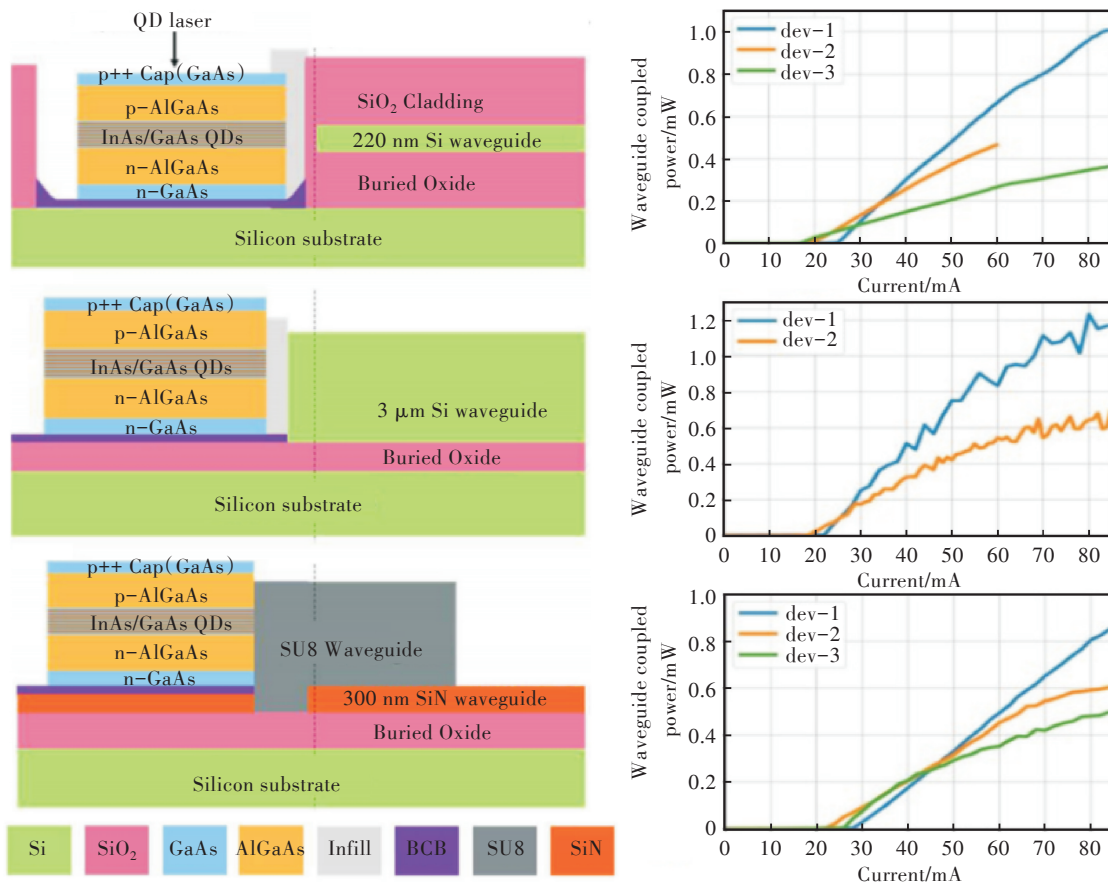


图 9 基于微转印技术实现的边发射硅基-GaAs QD 激光器^[65]

Figure 9 Edge-emitting silicon-based GaAs QD laser realized based on micro transfer printing technology^[65]

多平台兼容性和工艺简化上的优势。但也发现其耦合效率仍需通过优化波导间隙及结构设计来获得进一步的提升。

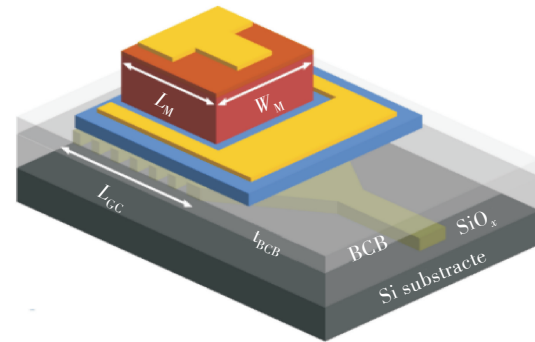
2025年,根特大学的 Liu 等人^[66]通过微转印集成技术将标准化的 InAs/GaAs QD 有源器件集成到硅光子集成光路上,成功实现了高性能片上光源及光放大器。该团队在硅光子芯片上集成了 O 波段 SOA、DFB 和宽可调激光器(Tunable Lasers, TL)。其中,SOA 在 1 299 nm 波长处实现了 7.5 dB 的片上增益,并在宽输入功率范围内表现稳定;DFB 的波导耦合输出功率高达 19.7 mW,边模抑制比为 33.3 dB,且具备优异的光反馈鲁棒性。该器件无需光隔离器即可支持 30 Gbit/s 无差错数据传输;TL 的波长调谐范围超过 35 nm,波导耦合输出功率 > 3 mW。

2025年,中国科学院上海微系统与信息技术研究所的 Zhu 等人^[67]发表了采用微转印技术将含有 InGaAs QD 的 GaAs 纳米波导集成到 CMOS 兼容的 4H-SiC 跑道型 MRR 上以形成单光子源。其中,混合微环谐振器(Hybrid Micro-Ring Resonator, HMRR)支持品质因数达 7.8×10^3 的回音壁模式,而且通过其附近的 TiN 微加热器可进一步实现约 4 nm 的局部动态波长调谐(调谐速率 0.13 ± 0.03 nm/mW)。以此,团队可以精确地控制 QDs 与腔模共振,使其单光子发射的珀塞尔因子达 4.9。而且团队还进行了二阶关联函数的测量,结果显示该器件可以获得极高纯度($g^{(2)}(0)=0.008 \pm 0.004$)的单光子输出。

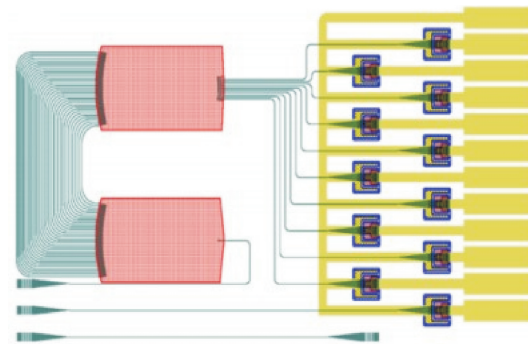
基于 GaAs 基体材料制备的光电探测器件,其吸收波段可覆盖 900 nm 左右的近红外区域,且具有超低暗电流和高响应速度的优势,可以支持数据中心内部短距高速光互联通信的应用场景。接下来,我们将总结已发表的 GaAs 基光探测材料/预制器件的微转印工作。具体如下。

2020年,根特大学的 Goyvaerts 等人^[62]设计了一种 GaAs p-i-n PD,其结构包含 2.5 μm 厚的 GaAs 本征吸收层、300 nm 厚的 p 型掺杂 GaAs 顶接触层以及 600 nm 厚的 n 型掺杂 AlGaAs 接触层(带隙设计为 760 nm 以减少 n 接触区的额外损耗)。如图 10 所示,团队通过精准对准将该型 PD 集成至 SiN 光子集成平台中的光栅耦合器上。这些光栅耦合器与阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)的输出端口相连。测试表明,集成后的 PD 在图中为 -2 V 反向偏压下暗电流为 15 pA,

860 nm 波长处的响应度可达 0.3 A/W。如图 10(c)所示,所有器件的输出光电流均能准确复现 AWG 的滤波响应,验证了通过微转印将此类 PD 集成至 SiN 光子平台的可行性。该研究成功地通过微转印技术实现了 GaAs p-i-n PD 与 SiN 波导的高效集成,拓展了该平台在近红外领域(如生物传感、光通信和光谱分析)的应用。

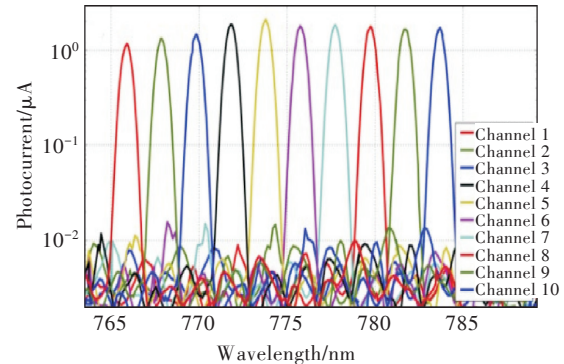


(a) p-i-n PD



(b) GDSII 芯片光谱仪的原理图

(b) Schematic diagram of GDSII chip spectrometer



(c) -2 V 反向偏置下的每个通道输出光栅耦合器顶部转印 PD 的光电流

(c) The photocurrent of each channel output grating coupler top transfer PD under -2 V reverse bias

图 10 基于微转印技术集成在 SiN 波导光路上的 GaAs p-i-n PD^[62]Figure 10 GaAs p-i-n PD integrated on SiN waveguide optical path based on micro transfer printing technology^[62]

AlGaAs 材料具有强光学非线性特性和低损耗的优点,这使其成为构建高效集成型非线性光子器

件的理想材料。同时,基于该材料制备的 MRR 可以支持多阶空间模式。通过调整与硅波导的横向偏移还可进一步实现模式的选择性耦合。2020 年,格拉斯哥大学的 McPhillimy 等人^[68]利用微转印技术将 AlGaAs 微盘谐振器转移至 SOI 波导平台上。该集成谐振器表现出了高达 4×10^4 的加载 Q 因子,同时,测试发现其非线性系数为 $\gamma = 325 \text{ (Wm)}^{-1}$,器件表现出极小的双光子吸收损耗及自由载流子吸收损耗。该团队的工作为在硅基光子芯片上实现低功耗非线性光学处理(如全光开关和频率转换)提供了一种可行的方案。

GaAs 基 III-V 族材料与同为 III-V 族的 InP 材料相比,优势在于其优异的光电特性与多样的功能实现。在集成密度上,GaAs 基器件(如激光器和光电探测器)通过微转印同样能以高密度和选区方式集成在硅衬底上,实现小型化;在耦合效率方面,通过精准转印,GaAs 器件与硅波导可实现高效率耦合;在带宽上,GaAs 基器件具备高速调制能力,尤其适用于近红外波段(如 850 nm)的高速短距数据通信与传感。然而,其工艺复杂度同样很高,GaAs 与硅的热膨胀系数差异及晶格失配带来了应力管理与键合可靠性的挑战,因此工艺难度与成本较高。总体而言,GaAs 基 III-V 材料的微转印技术主要适用于可见光至近红外波段的光子器件,是实现多功能和高性能硅基光电集成系统的重要材料。

2.4 其他材料样片及预制器件

硅基无源平台缺乏高速普克尔斯电-光特性以及强二阶非线性电光效应,而 LiNbO₃ 材料具有强电-光相互作用特性,这些恰好可以与前者形成互补^[69]。因而,在硅基无源平台转印集成大平面尺寸的 LiNbO₃ 薄膜材料成为近些年的研究热点之一。2023 年,根特大学的 Vandekerckhove 等人^[70]通过在源晶圆(SiO₂ 衬底)上制备光刻胶支柱支撑薄膜和优化 tether 设计(加入裂纹屏障)、控制支柱间距及粗糙度等方法,实现了薄膜底面均方根粗糙度仅 0.22 nm、尺寸为 60 $\mu\text{m} \times 1 \text{ mm}$ 、120 $\mu\text{m} \times 1 \text{ mm}$ 的 LiNbO₃ 薄膜可靠转移;2024 年,根特大学的 Tan 等人^[71]首次通过微转印技术成功将 TFLN 调制器集成于硅光子平台上,实现了高性能的 TFLN-on-Si 微环调制器。该器件在 1 550 nm 波段表现出了低插入损耗(约 1.5 dB)、高消光比(最高 37 dB)和优异的电光性能;其 3 dB 电光带宽达到 16 GHz 并支持高达 45 Gbit/s 的数据传输速率。

2025 年,Su 等人^[72]首次通过微转印技术将薄

膜钽酸锂异质集成在 SiN 波导平台上实现了高速 MZM。该器件在保持 SiN 平台超低传输损耗优势的同时,成功引入钽酸锂的线性电光效应,实现了兼具低插入损耗(约 0.82 dB)、高电光带宽(>67 GHz)与高速调制能力(最高达 250 Gbit/s PAM4)的综合优异性能。

铈掺杂钇铁石榴石(Ce:YIG)材料具备优异的磁光特性,其在 1 500 nm 波长处的法拉第旋转系数高达 $-4 500 \text{ deg/cm}$ 。基于该材料制备的光隔离器可以通过磁光效应产生显著的非互易相移,同时在近红外区域保持较低的光学损耗。2023 年,日本东京工业大学的 Minemura 等人^[73]提出了一种利用微转印技术获得的基于 MZI 结构的紧凑型磁光隔离器方案。该方案首先在源晶圆制备 Ce:YIG/SGGG 薄膜并加工成样片单元,然后通过 PDMS 印章转移键合到硅波导上,最后经减薄和刻蚀完成器件制备。最终,该器件在 1 567.1 nm 处实现了 14 dB 的最大隔离比。相比传统直接键合方法,该方案可以大幅减小器件的体积与厚度。

作为一种单晶材料,金刚石能够实现对光场的强限制从而有效增强光与物质的相互作用强度。这可使这种材料应用于集成型光谐振器。2020 年,斯特拉斯克莱德大学的 Hill 等人^[74]介绍了一种通过微转印技术将金刚石微盘谐振器集成到 SOI 波导的方法,该方法先在源衬底制备单晶金刚石薄膜,经光刻和电感耦合等离子体刻蚀制成半径为 12.5 μm 、厚度为 1.8 μm 的微盘谐振器,利用 PDMS 印章将其转移到带有 SiO₂ 上包层的硅基波导上。基于该方案制备的集成谐振器平均加载品质因数可达 3.1×10^4 ,最高加载 Q 值更达到 1.05×10^5 。同时,团队利用谐振器与硅基波导之间 SiO₂ 界面的高热阻抗特性,有效抑制了热量向衬底的扩散。最终,通过 4.25 mW 的低功率光泵浦成功实现了 450 pm 范围的谐振波长连续调谐。这既体现了器件在低功耗调控方面的优势,也为其在波长可调谐光子器件领域的应用奠定了基础。

GaSb 基材料具有窄直接带隙($\sim 0.726 \text{ eV}$)特性,这使其成为制备工作于近红外至中红外波段(2~5 μm)光电器件的理想材料平台。该材料体系可与 AlSb 和 InAs 形成晶格匹配的多元合金和独特的 Type-II 超晶格结构,能通过能带工程在极大范围内(可达 30 μm)精确剪裁其光学响应。2025 年,芬兰 Tampere 大学的 Tuorila 等人^[75]首次使用微转印技术成功实现了 GaSb 光电子芯片与硅光子平

台的集成。该团队展示了 GaSb 样品的释放过程及其转移过程,最终基于此实现了工作于 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 中红外波段的 GaSb/硅片上混合外腔激光器。

在硅基光电异质集成技术中,还有一些除 InP、GaAs 外的其他材料,其在硅光子异质集成中同样发挥着不可替代的作用,补充了常见的硅基、III-V 族化合物材料在研究上的空白,凭借优异的光电性能占据着一席之地。如以金刚石材料为基底转印的

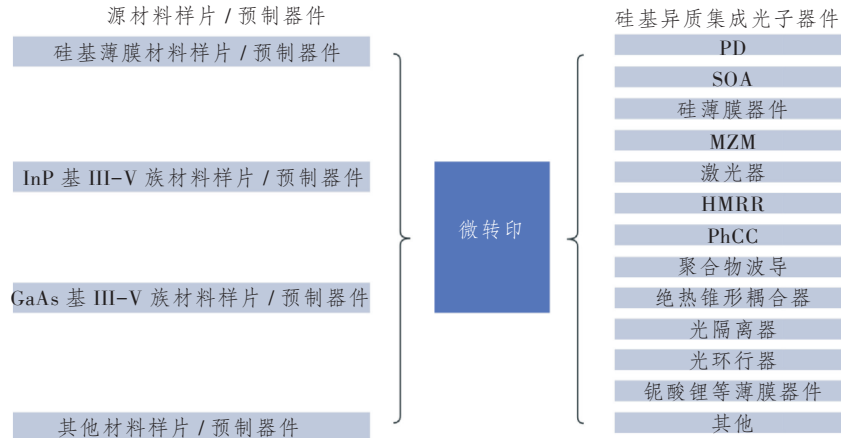


图 11 基于不同材料样片/预制器件转印并制备的硅基异质集成光电器件

Figure 11 Silicon-based heterostructured optoelectronic devices transferred and fabricated based on different material samples/prefabricated devices

3 结束语

转印/微转印是实现先进片上光子微系统的一种跨尺寸(涵盖裸片级 mm^2 以及样片级 μm^2)的异质集成技术,利用弹性印章体的可控黏附性实现材料样片/预制器件的吸附与剥离,继而实现光电材料/预制器件在同一衬底平台的高良率集成。借助其高精度和高灵活性的优点,该技术可以高效地在同一材料基底上整合不同物化性质的材料以实现灵活的多功能集成与应用。基于该技术已在硅光子集成回路(Photonic Integrated Circuit based on Silicon, Si PICs)上成功实现了 InP 基、GaAs 基、GaSb 基、LiNbO₃、Si 基以及 Ce:YIG 等材料的有效集成。

本文系统性阐释了微转印技术在硅基光子异质集成方面的基本原理与工艺加工流程,基于不同的源材料及预制器件(硅基、III-V 族化合物和 TFLN),分类梳理了其在该领域的最新进展。通过对各材料体系下微转印技术应用的比较分析,总结了技术发展现状,希望为硅基光子异质集成技术的进一步发展提供重要参考。

目前,微转印技术正逐渐成熟并开始从实验室走向产业化制备。然而,要推动该技术走向成熟应

器件通过 4.25 mW 的低功率光泵浦成功实现了 450 pm 范围的谐振波长连续调谐。

微转印集成技术以其独特的异质材料兼容性与高精度集成能力,已成为推动光电芯片迈向多功能和低成本的关键使能技术。如图 11 所示,本文总结了基于不同材料样片/预制器件转印并制备的硅基异质集成光电器件。

用,仍需攻克诸多关键技术问题。在工艺方面,拾取与释放过程中的黏附力精确控制需要实现快速拾取与缓慢释放的平衡,这对范德华力的操控提出了极高要求;亚微米级的高精度对准受限于印章形变和视觉系统精度;以及牺牲层刻蚀等关键步骤的工艺积累不足。在材料与界面层面,金属电极与衬底间的强黏附可能导致器件损伤,而不同材料间的热膨胀系数失配会引入应力,影响可靠性等。

首先,在工艺环节层面,微转印过程涉及多种关键因素,包括高精度对准技术、印章设计与调控、界面相互作用调节以及残余应力的处理等。这些因素对最终的转印良率与集成器件性能具有直接影响。因此,需在印章材料选择与结构设计、释放过程的控制方法和自动化对准系统的精度优化等方面开展系统研究与技术攻关,以推动工艺向高精度、高效率及高兼容性方向发展。

其次,在材料层面,无论是 III-V 族半导体、硅材料、LiNbO₃ 还是其他新型功能材料,现有转印工艺在效率、良率及工艺适用性等方面仍存在明显不足。这一问题不仅需要依赖大量的工艺优化实验与系统性数据积累,还需建立符合不同材料特性的转印机理模型,从而在保证器件性能的前提下提升工

艺的可控性与一致性。

此外,可靠性验证是实现产业化的核心环节之一。未来需开展长期且系统的可靠性评估,涵盖工艺稳定性和器件运行稳定性等多个维度。这也可为后续的大规模批量化生产与商业化应用提供坚实的技术支撑。

综上所述,微转印技术的进一步发展有赖于材料工艺优化、核心装备研制、可靠性评估与标准化体系构建等多方面的协同推进,借此来推动微转印技术实现从实验室研究向大规模产业化应用的技术跨越。

参考文献:

- [1] Khang D Y, Jiang H, Huang Y, et al. A Stretchable Form of Single-Crystal Silicon for High-Performance Electronics on Rubber Substrates [J]. *Science*, 2006, 311(5758): 208–212.
- [2] 欧祥鹏, 杨在利, 唐波, 等. 2.5D/3D硅基光电子集成技术及应用[J]. *光通信研究*, 2023(1): 1–16.
Ou X P, Yang Z L, Tang B, et al. Silicon Photonic 2.5D/3D Integration Technology and Its Applications[J]. *Study on Optical Communications*, 2023(1): 1–16.
- [3] 王子昊, 王霆, 张建军. 硅基光电异质集成的发展与思考[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(3): 360–367.
Wang Z H, Wang T, Zhang J J. Development and Thinking of Silicon Photonics Heterogeneous Integration [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(3): 360–367.
- [4] Mekawey H, Elsayed M, Ismail Y, et al. Optical Interconnects Finally Seeing the Light in Silicon Photonics: Past the Hype [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(3): 485.
- [5] Margalit N, Xiang C, Bowers S M, et al. Perspective on the Future of Silicon Photonics and Electronics [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(22): 220501.
- [6] Blumenthal D J, Heideman R, Geuzebroek D, et al. Silicon Nitride in Silicon Photonics [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(12): 2209–2231.
- [7] 张明新, 刘小亚, 周嘉成, 等. 微转印技术在光子器件异质集成中的应用(特邀) [J]. *红外与激光工程*, 2025, 54(7): 256–268.
Zhang M X, Liu X Y, Zhou J C, et al. Micro-Transfer Printing for Heterogeneous Integration of Photonic Devices (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(7): 256–268.
- [8] Hu Y, Liang D, Mukherjee K, et al. III/V-on-Si MQW Lasers by Using a Novel Photonic Integration Method of Regrowth on a Bonding Template [J]. *Light, Science & Applications*, 2019, 8: 93.
- [9] Norman J, Kennedy M J, Selvidge J, et al. Electrically Pumped Continuous Wave Quantum Dot Lasers Epitaxially Grown on Patterned, On-axis (001) Si [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3927.
- [10] Kunert B, Guo W, Mols Y, et al. III/V Nano Ridge Structures for Optical Applications on Patterned 300 mm Silicon Substrate [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(9): 091101.
- [11] Lin S, Zheng X, Yao J, et al. Efficient, Tunable Flip-Chip-Integrated III-V/Si Hybrid External-Cavity Laser Array [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21454–21462.
- [12] Matsumoto T, Kurahashi T, Konoike R, et al. Hybrid-Integration of SOA on Silicon Photonics Platform based on Flip-Chip Bonding [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 307–313.
- [13] Vaskasi J R, Singh N, Van Kerrebrouck J, et al. High Wall-Plug Efficiency and Narrow Linewidth III-V-on-Silicon C-Band DFB Laser Diodes [J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 27983–27992.
- [14] Aihara T, Hiraki T, Fujii T, et al. Heterogeneously Integrated Widely Tunable Laser Using Lattice Filter and Ring Resonator on Si Photonics Platform [J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 15820–15829.
- [15] Rahimi J, Van Kerrebrouck J, Haq B, et al. High-Efficiency Short-Cavity III-V-on-Si C-Band DFB Laser Diodes [C]//*Silicon Photonics XVII*. San Francisco, USA: SPIE, 2022: 17.
- [16] Li Q, Lau K M. Epitaxial Growth of Highly Mismatched III-V Materials on (001) Silicon for Electronics and Optoelectronics [J]. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2017, 63(4): 105–120.
- [17] Du Y, Xu B, Wang G, et al. Review of Highly Mismatched III-V Heteroepitaxy Growth on (001) Silicon [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(5): 741.
- [18] Park J S, Tang M, Chen S, et al. Heteroepitaxial Growth of III-V Semiconductors on Silicon [J]. *Crystals*, 2020, 10(12): 1163.
- [19] 王瑞军, 韩羽, 余思远. 面向硅基光子集成的片上半导体激光器(特邀) [J]. *光学学报*, 2024, 44(15): 154–165.
Wang R J, Han Y, Yu S Y. Semiconductor Laser on Chip for Silicon-based Photonic Integration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(15): 154–165.

- [20] Hiratani T, Fujiwara N, Inoue N, et al. InP/Si Heterogeneously Integrated Tunable Laser by Utilizing Chip-on-Wafer Bonding Method[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2025, 43(4): 1708–1715.
- [21] 黄银, 李海成, 陈颖, 等. 可延展柔性光子/电子集成器件及转印技术[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46(4): 61–74.
Huang Y, Li H C, Chen Y, et al. Stretchable and Flexible Photonics/Electronics Devices and Transfer Printing [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2016, 46(4): 61–74.
- [22] Roelkens G, Zhang J, Bogaert L, et al. Micro-Transfer Printing for Heterogeneous Si Photonic Integrated Circuits[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2023, 29: 8200414.
- [23] Roelkens G, Zhang J, Bogaert L, et al. Present and Future of Micro-Transfer Printing for Heterogeneous Photonic Integrated Circuits [J]. *APL Photonics*, 2024, 9: 010901.
- [24] Carlson A, Bowen A M, Huang Y, et al. Transfer Printing Techniques for Materials Assembly and Micro/Nanodevice Fabrication [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(39): 5284–5318.
- [25] 梁存满. 柔性电子确定性微转印机理与关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Liang C M. Research on Mechanism and Key Technologies of Deterministic Micro Transfer Printing for Flexible Electronics[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2019.
- [26] Cheng Q, Wang Z, Song Y, et al. Integration of Micro Surface Mount Components on Printed Circuit Board by Micro-Transfer Printing[C]//2023 IEEE 15th International Conference on ASIC (ASICON). Nanjing, China: IEEE, 2023: 10396323.
- [27] 蒋玲. 微转印系统界面黏附力学行为研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022.
Jiang L. Study on Mechanical Behavior of Interfacial Adhesion in Micro-Transfer Printing System[D]. Nanjing, China: Nanjing Forestry University, 2022.
- [28] Yamashita T, Takamatsu S, Okada H, et al. Ultra-Thin Piezoelectric Strain Sensor Array Integrated on a Flexible Printed Circuit Involving Transfer Printing Methods [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(24): 8840–8846.
- [29] Jiang D, Feng X, Qu B, et al. Rate-Dependent Interaction between Thin Films and Interfaces during Micro/Nanoscale Transfer Printing [J]. *Soft Matter*, 2012, 8(2): 418–423.
- [30] Tucker M B, Hines D R, Li T. A Quality Map of Transfer Printing [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(10): 103504.
- [31] Chen H, Feng X, Chen Y. Directionally Controlled Transfer Printing Using Micropatterned Stamps [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(15): 151607.
- [32] Meitl M A, Zhu Z T, Kumar V, et al. Transfer Printing by Kinetic Control of Adhesion to an Elastomeric Stamp[J]. *Nature Materials*, 2005, 5(1): 33–38.
- [33] Kim C, Yoon M A, Jang B, et al. Ultimate Control of Rate-Dependent Adhesion for Reversible Transfer Process via a Thin Elastomeric Layer [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(14): 12886–12892.
- [34] Saeidpourazar R, Li R, Li Y, et al. Laser-Driven Micro Transfer Placement of Prefabricated Microstructures [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(5): 1049–1058.
- [35] Saeidpourazar R, Sangid M D, Rogers J A, et al. A Prototype Printer for Laser Driven Micro-Transfer Printing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(4): 416–424.
- [36] Kim T H, Carlson A, Ahn J H, et al. Kinetically Controlled, Adhesiveless Transfer Printing Using Microstructured Stamps [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(11): 113502.
- [37] Kim S, Carlson A, Cheng H, et al. Enhanced Adhesion with Pedestal-Shaped Elastomeric Stamps for Transfer Printing [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(17): 171909.
- [38] Oswalt K, Thostenson J, Moore T, et al. Interposing of Microelectronics by Micro Transfer Printing to Create 3-D Structures [C]//2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Orlando, FL, USA: IEEE, 2020: 9159289.
- [39] Feng X, Meitl M A, Bowen A M, et al. Competing Fracture in Kinetically Controlled Transfer Printing [J]. *Langmuir*, 2007, 23(25): 12555–12560.
- [40] Yang H, Zhao D, Chuwongin S, et al. Transfer-Printed Stacked Nanomembrane Lasers on Silicon [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(9): 615–620.
- [41] Cuyvers S, Hermans A, Kiewiet M, et al. Heterogeneous Integration of Si Photodiodes on Silicon Nitride for Near-Visible Light Detection [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 937–940.
- [42] McPhillimy J, Guilhabert B, Klitis C, et al. High Accuracy Transfer Printing of Single-Mode Membrane Silicon Photonic Devices [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16679–16688.

- [43] Ye N, Muliuk G, Trindade A J, et al. High-Alignment-Accuracy Transfer Printing of Passive Silicon Waveguide Structures[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2023–2032.
- [44] Bommer S P, Panuski C, Guilhabert B, et al. Transfer Printing Micro-Assembly of Silicon Photonic Crystal Cavity Arrays: Beating the Fabrication Tolerance Limit[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 5994.
- [45] Haq B, Rahimi Vaskasi J, Zhang J, et al. Micro-Transfer-Printed III-V-on-Silicon C-Band Distributed Feedback Lasers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32793–32801.
- [46] Haq B, Kumari S, Van Gasse K, et al. Micro-Transfer-Printed III-V-on-Silicon C-Band Semiconductor Optical Amplifiers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(7): 1900364.
- [47] Zhang J, Soltanian E, Haq B, et al. Integrated Optical Transmitter with Micro-Transfer-Printed Widely Tunable III-V-on-Si Laser[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2022: 9748211.
- [48] Zhang J, Bogaert L, Haq B, et al. III-V-on-Si DFB Laser with Co-Integrated Power Amplifier Realized Using Micro-Transfer Printing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(11): 593–596.
- [49] Pan B, Bourderionnet J, Billault V, et al. III-V-on-Silicon Nitride Narrow-Linewidth Tunable Laser based on Micro-Transfer Printing[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 10116632.
- [50] Pan B, Bourderionnet J, Billault V, et al. Experimental Demonstration of a Micro-Transfer Printed InP-on-Si₃N₄ Widely Tunable Laser[C]//2024 IEEE 29th International Semiconductor Laser Conference (IS-LC). Orlando, FL, USA: IEEE, 2024: 10717379.
- [51] Poelman S, Cuyvers S, Vissers E, et al. Low Repetition Rate Mode-Locked Laser on a Commercial Foundry Low-Index Photonic Platform[C]//2023 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose, CA, USA: IEEE, 2023: 10258986.
- [52] Maeda Y, Hiraki T, Aihara T, et al. Membrane Directly Modulated Lasers on Si Using Micro-Transfer Printing Integrated with Post-Processed Polymer Waveguide[C]//2024 IEEE 29th International Semiconductor Laser Conference (ISLC). Orlando, FL, USA: IEEE, 2024: 10717403.
- [53] Ghosh S, O’Callaghan J, Moynihan O, et al. Scalable Transfer Printing Approach to Heterogeneous Integration of InP Lasers on Silicon-on-Insulator Waveguide Platform[J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 125(8): 081104.
- [54] Guo X, Soltanian E, Zhang J, et al. Micro-Transfer-Printed Short-Wave Infrared InP-on-Silicon Tunable Laser[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(5): 1589–1592.
- [55] Zhang J, De Groote A, Abbasi A, et al. Silicon Photonics Fiber-to-the-Home Transceiver Array based on Transfer-Printing-based Integration of III-V Photodetectors[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14290–14299.
- [56] Yu F, Tzu T C, Gao J, et al. High-Power High-Speed MUTC Waveguide Photodiodes Integrated on Si₃N₄/Si Platform Using Micro-Transfer Printing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2023, 29(3): 3800106.
- [57] Wang Y, Li G, Gu X, et al. Responsibility Optimization of a High-Speed InP/InGaAs Photodetector with a back Reflector Structure[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 4919–4929.
- [58] Arafat Y, Justice J, Gocalińska A, et al. Extended InGaAs Photodiode Integrated on SOI Waveguide Circuit for 2 μm Waveband[C]//2024 IEEE Silicon Photonics Conference (SiPhotonics). Tokyo Bay, Japan: IEEE, 2024: 10543485
- [59] 王兆聰, 全志恒, 郑施冠卿, 等. 基于微转印方法实现 III-V-on-SOI 异质集成光电探测器[J]. *光通信研究*, 2025(2): 90–96.
- Wang Z C, Quan Z H, Zheng S G Q, et al. Heterogeneous Integrated III-V-on-SOI Photodetector Using Micro Transfer Printing Method[J]. *Study on Optical Communications*, 2025(2): 90–96.
- [60] Mojaver H R, Tolstikhin V, Gargallo B, et al. 8 × 8 SOA-based Optical Switch with Zero Fiber-to-Fiber Insertion Loss [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(16): 4650–4653.
- [61] Deng H, Soltanian E, Zhang J, et al. Wavelength Converter Using Micro Transfer-Printed Optical Amplifiers on a Full SiPh Platform[C]//2023 IEEE Silicon Photonics Conference (SiPhotonics). Washington, DC, USA: IEEE, 2023: 10141958.
- [62] Goyvaerts J, Kumari S, Uvin S, et al. Transfer-Print Integration of GaAs p-i-n Photodiodes onto Silicon Nitride Waveguides for Near-Infrared Applications [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 21275–21285.
- [63] Justice J, Bower C, Meitl M, et al. Wafer-Scale Inte-

- gration of Group III - V Lasers on Silicon Using Transfer Printing of Epitaxial Layers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(9): 610–614.
- [64] Katsumi R, Ota Y, Osada A, et al. Quantum-Dot Single-Photon Source on a CMOS Silicon Photonic Chip Integrated Using Transfer Printing [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(3): 036105.
- [65] Uzun A, Atar F B, Iadanza S, et al. Integration of Edge-Emitting Quantum Dot Lasers with Different Waveguide Platforms Using Micro-Transfer Printing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2023, 29(3): 1500210.
- [66] Liu Y, Zhang J, Bogaert L, et al. Micro-Transfer Printing of O-Band InAs/GaAs Quantum-Dot SOAs on Silicon Photonic Integrated Circuits [J]. *Photonics Research*, 2025, 13(5): 1341.
- [67] Zhu Y, Liu R, Yi A, et al. A Hybrid Single Quantum Dot Coupled Cavity on a CMOS-Compatible SiC Photonic Chip for Purcell-Enhanced Deterministic Single-Photon Emission [J]. *Light, Science & Applications*, 2025, 14(1): 86
- [68] McPhillimy J, May S, Klitis C, et al. Transfer Printing of AlGaAs-on-SOI Microdisk Resonators for Selective Mode Coupling and Low-Power Nonlinear Processes [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 881–884.
- [69] Hu Y, Zhu D, Lu S, et al. Integrated Electro-Optics on Thin-Film Lithium Niobate [J]. *Nature Reviews Physics*, 2025, 7(5): 237–254.
- [70] Vandekerckhove T, de Bruxelles U L, Vanackere T, et al. Reliable Micro-Transfer Printing Method for Heterogeneous Integration of Lithium Niobate and Semiconductor Thin Films [J]. *Optical Materials Express*, 2023, 13(7): 1984.
- [71] Tan Y, Niu S, Billet M, et al. Micro-Transfer Printed Thin Film Lithium Niobate (TFLN)-on-Silicon Ring Modulator [J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(5): 1920–1927.
- [72] Su J, Dai Y, Sun A, et al. Low-Loss and High-Speed Heterogeneous Lithium Tantalate-on-Si₃N₄ Modulator via Micro-Transfer Printing [C]//CLEO 2025. Long Beach, California, USA: Optica Publishing Group, 2025: PD104_4.
- [73] Minemura D, Kou R, Sutoh Y, et al. Compact Magneto-Optical Isolator by μ -Transfer Printing of Magneto-Optical Single-Crystal Film on Silicon Waveguides [J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 27821–27829.
- [74] Hill P, Klitis C, Guilhabert B, et al. All-Optical Tuning of a Diamond Micro-Disk Resonator on Silicon [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 318.
- [75] Tuorila H, Viheriälä J, Arafat Y, et al. Micro-Transfer Printing of GaSb Optoelectronics Chips for Mid-Infrared Silicon Photonics Integrated Circuits [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2025, 10(10): 2570053.