

集成电路芯片上光互连研究的新进展

阮 刚¹ 肖 夏² R. Streiter² 陈智涛³ T. Otto⁴ T. Gessner^{2,4}

(1 复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433, 中国)

(2 Chemnitz 技术大学微技术中心, Chemnitz 09107, 德国)

(3 清华大学微电子学研究所, 北京 100084, 中国)

(4 Fraunhofer 可靠性与微集成研究所 微器件和设备研究室, Chemnitz 09126, 德国)

摘要: 讨论了集成电路向高集成度、高工作频率和高传输速率继续发展时, 常规金属互连出现的困难以及集成电路芯片上光互连具有的潜在优势. 介绍了组成芯片上光互连的光发射器件、光接收器件和光传输器件等三种基本器件及其与硅集成电路集成的研究新进展. 最后展望了集成电路芯片上光互连的应用前景.

关键词: 集成电路; 光互连; 光发射器件; 光接收器件; 光传输器件

EEACC: 2550F; 2570; 4140

中图分类号: TN405.97

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)04-0387-11

1 引言

随着超大规模集成电路集成度和工作频率的迅速提高, 芯片上互连线的寄生效应如寄生电容、延迟时间、信号串扰等问题变得十分显著, 成为集成电路更快发展的巨大障碍. 理想的互连应具有信号延迟时间短、串扰小、工作频带宽、损耗低、制造成本低等特点. 已有大量的研究工作致力于怎样减小互连的寄生效应, 如采用低电阻率的金属(Cu 及 Cu 合金)替代传统的 Al, 开发研制低介电常数材料用作互连介质替代传统的 SiO₂, 优化互连布线的几何尺寸及结构等. 这些措施卓有成效地降低了互连引起的寄生效应, 减小了延迟时间及串扰. 但是, 当集成电路工作频率迅速提高至几 GHz 甚至更高时, 基于金属的常规互连将无法高效地传输信号. 尽管经优化后的常规互连还可应用于短程信号传输线例如连接执行单元或功能模块中门电路和晶体管的局部互连(local interconnect)以及用于提供功能模块内部时钟信号的中级互连(intermediate interconnect), 但仍不能适用于长程信号传输线, 例如用于提供所有

功能模块电源及模块之间时钟信号的全局互连(global interconnect)^[1]. 那时, 常规互连将成为限制集成电路快速发展的瓶颈, 必须引入新的互连方法.

光互连作为一种可能的新的芯片上互连方法, 已研究至少有 16 年了^[2]. 它与基于金属的电互连具有相似之处, 信号的传输都是通过电磁波的形式, 而且所有的逻辑相互作用都是通过电子来实现^[3,4]. 但是光互连与常规的金属互连相比, 具有卓越的潜在优势: 更高的互连集成、更大的频带宽度、更低的功耗、极小的信号延迟和串扰、很大的信号扇入和扇出、精确的时钟分配、系统的同步化以及设计的简化等^[5-7]. 这些优势是基于光与电固有的物理特性差别^[3,8]: (1) 光具有很高的频率 $f = 500\text{THz}$, 而电系统内典型的时钟频率为 $10\text{MHz} - 10\text{GHz}$; (2) 光具有非常短的波长 $\lambda = 500\text{nm}$, 而电系统内传输信号的波长为 $3\text{cm} - 30\text{m}$; (3) 光具有大的光子能量 $E = 2\text{eV}$, 而电子能量为 $40\text{neV} - 40\mu\text{eV}$. 光互连用于硅芯片上不需要物理上的新突破.

上述光互连的种种潜在的、理论上的优势激励了大量研究人员致力于光互连相关元件及其与集成

阮 刚 男, 1935 年出生, 复旦大学教授, 博士生导师, 从事 ULSI 工艺、器件及电路的模型和模拟研究.

肖 夏 女, 1971 年出生, 德国 Chemnitz 技术大学微技术中心博士研究生, 研究方向为 ULSI 芯片上电互连和光互连.

R. Streiter 男, 1959 年出生, 德国 Chemnitz 技术大学微技术中心高级研究员, 研究方向为 ULSI 芯片上互连及微工艺设备的模拟.

电路集成,主要是与 CMOS 集成电路集成的研制与开发,迄今已取得了多方面的研究成果,但是距离光互连实用于集成电路芯片上尚有相当大的距离.许多关键问题如光互连元件的材料、效率、尺寸、功耗、与硅集成电路工艺的兼容性以及生产的成本等问题都尚未找到最佳的解决方案.专家预期:2012 年集成电路的工艺将达到 $0.05\mu\text{m}$ 技术水平,工作频率达到 10GHz ^[9].芯片上局部互连和中级互连仍然采用 Cu 或 Cu 合金结合低介电常数介质的互连方法.但是全局互连很可能采用光互连的方法^[1].在国际半导体技术发展指南 1999 年(The International Technology Roadmap for Semiconductor: 1999)的报告中,专家预计:光互连作为有巨大潜力互连方法到 2007 年仍将处于研究阶段,到 2010 年将处于开发阶段,到 2012 年将进入完善和预生产阶段.

芯片上光互连由三种基本器件组成:光发射器件,它接收电信号并将其转换为光信号;光接收器件,它检测光信号并将其转换为电信号;光传输器件,它将光发射器件发射的光信号传输到光接收器件.实现芯片上光互连的工艺技术包括制备上述三种器件的工艺技术以及它们之间和它们与集成电路芯片之间的集成工艺技术.本文将依次论述这三个光互连基本元件及它们与 CMOS 集成电路集成的新进展并评述其未来的发展趋势和应用前景.

2 芯片上光互连研究的新进展

对用于芯片上光互连的三种基本器件的要求为:(1)稳定性高;(2)效率高,它包括光发射器件的电光转换效率高,光接收器件的光电转换效率高,光传输器件的传输效率高以及三者相连时的总体信号传输效率高;(3)尺寸小,以实现比金属互连更高密度的互连,特别是高密度总线长互连;(4)电光、光电转换的响应速率高;(5)能集成于集成电路芯片上,主要是 CMOS 集成电路芯片上,希望集成技术难度小、成品率高、成本低.以下依次对目前有较多研究、有较大潜力应用于光互连中的光发射器件、光接收器件、光传输器件及其与集成电路集成的技术的研究新进展作一简要介绍.

2.1 光发射器件

半导体发光器件按发光材料的不同分为硅基发光器件和非硅基发光器件,其中后者主要是 III-V 族

半导体发光器件.虽然硅是间接带隙半导体,其发光过程必须有声子的参与,发光效率很低(一般低于 10^{-4}).但由于现代的超大规模集成电路是制造在硅片上的,人们希望用于集成电路芯片上光互连的发光器件能够与现有的硅集成电路技术兼容以达到制造成本低的目的,因此硅基材料发光器件的研制围绕提高发光效率始终被人们广泛关注.而 III-V 族材料如基于 GaAs 和 InP 的发光器件的发光效率很高.同时 III-V 族半导体发光器件与硅集成电路的结合技术也在不断成熟,因此虽制造成本高,但很有可能被应用在未来的光互连中.

2.1.1 硅基发光器件

人们尝试利用多孔硅量子效应、在硅中掺铟、锗、硅超晶格等方法研制开发硅基发光器件.但迄今主要由于发光效率太低,离用于光互连还有相当距离,还有很长的路要走,其中利用多孔硅量子效应的多孔硅发光器件近年来研究最多,发展最快.

多孔硅发光现象最初是由 Pickering 等在 1984 年发现的^[10].由于当时的实验条件是低温(4.2K),因此只引起少数人的兴趣.Canham 在 1990 年观测到了室温条件下多孔硅的发光现象^[11].自此,多孔硅引起了人们的广泛兴趣,希望多孔硅发光器件能作为硅基发光器件实用于硅集成电路芯片上的光互连.

多孔硅发光利用量子尺寸效应产生辐射复合发光,分为光致发光和电致发光两类.拟应用在硅超大规模集电路上作为发光材料的多孔硅一般是通过阳极氧化处理的方法使硅在 HF 溶剂中发生电化溶解过程得到的^[12].在制造过程中,通过控制阳极的电流值可以得到期望的孔占率和厚度.作为发光二极管、抗反射涂层和非线性光学材料,多孔硅的孔占率一般大于 70%^[13].为了应用于光互连,多孔硅发光二极管需具有以下特性:几年的稳定工作时间;10%的外部电致发光效率;不小于 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ 的功率输出密度;超过 100MHz 的调制速度,最好能超过 1GHz;能在全频段可见光及红外光范围发光^[14,15],能与传统的硅集成电路工艺兼容.以下我们对多孔硅发光二极管的有关特性作一述评.

(1) 稳定性

多孔硅发光二极管的不稳定性是由多孔硅内部大的表面积引起的.这个大的表面积使多孔硅的很大一部分处于易于与外界发生反应的状态.硅表面的 Si-H 键在大气、一定的光强、一定的温度及大

的电场环境下都易发生断裂^[16,17]. Loni 等^[18]在 1995 年研制成的多孔硅发光二极管的稳定性在空气中只有几分钟, 在一定的真空条件下也才只有几个小时. 随着研究的深入, 其稳定性在不断提高. Mulloni 等^[19]在 1996 年报道的多孔硅发光器件的稳定性已达到几个月. 基于这种较快的改进速度, 相信多孔硅发光二极管的稳定性问题最终会被解决, 以达到商业器件及光互连对稳定工作时间的要求.

(2) 发光效率

由于从多孔硅发光二极管的金属接触到二极管内部的载流子注入效率很低以及金属接触部分对光的吸收, 致使发光二极管的外部量子效率很低^[20,21]. 到 1995 年, 多孔硅发光二极管的功率效率已可达到 0.1%^[22], 且工作电流密度($1\mu\text{A}/\text{cm}^2$)和阈值电压(2V)比以往也都有了较多的降低. 同年, Loni 等人^[18]报道了工作电压为 2V 条件下, 发光二极管的效率可达 0.2% 的结果. 且该器件工作在真空状态下稳定性可达到 100h. 1998 年, Nishinura 等^[23]人研制的多孔硅发光二极管的效率已达到 0.8%, 并提出如果用透明的电极接触, 效率将可超过 1%.

(3) 调制频率

在多孔硅发光二极管中, 并不存在显著的肖特基结, 多孔硅的辐射复合发光只发生在注入载流子漂移时. 为了达到高的工作频率, 发光二极管的厚度必须减小^[24]. 但是, 由于厚度减小, 二极管的电致发光强度也会减小. Balucani 等^[25]在 1998 年报告了一种稳定性较好的铝-多孔硅发光器件, 其信号调制频率已达到 200MHz, 并指出限制器件工作速度的主要参数是结构中的结电容, 通过优化器件的几何结构, 可望将工作频率提高到 GHz 范围.

(4) 发光频段

由于多孔硅的孔占率可由制备过程控制, 因此可以通过多孔硅制备过程控制结合多孔硅发光器件结构的优化设计和制备来得到不同的发光波长. 三种主要的光(蓝、绿、红)都可由多孔硅发光器件发出. 1996 年 Fauchet 等研制成了能够发出明亮白光的多孔硅二极管以及波长为 $1.5\mu\text{m}$ 的掺铟氧化多孔硅. 1999 年 Chan 等^[26]制得了不同波长的多孔硅微腔共振器, 其发光波长范围为 700—780nm.

(5) 与大规模集成电路工艺的兼容性

多孔硅发光器与大规模集成电路的集成已展现出成功的前景. 1995 年 Duttagup 等^[27]通过光学及

电子束曝光、硅表面无定形化抑制多孔硅的形式, 以及离子溅射的方法增强多孔硅的形成等特别设计的工艺, 可以在硅上有选择地形成多孔硅区域, 较易实现与其它硅电子器件在同一芯片基础上的集成. 1996 年 Hirschman 等^[28]在 Nature 杂志发布了多孔硅发光器件成功地集成于双极型晶体管电路中的消息, 但工作频率还很低, 只有 1MHz. 报告还提出若采用改进的新型结构的多孔硅发光二极管, 可望与其他硅基元件及复杂的集成电路实现集成. 以上研究表明多孔硅与标准硅集成电路的集成是可能实现的.

综上所述五个方面的特性, 为使多孔硅发光二极管成功地应用于光互连, 发光效率低仍是最大的障碍.

硅基发光器件的研究除多孔硅发光器件外, 掺铟硅发光器件及锗硅超晶格发光器件也有较多研究. 但发光效率前者最高为 1%, 后者为 10^{-3} 量级. 因此仅有望作为单管发光器件或应用于光电集成电路中, 而难以应用于集成电路芯片上的光互连中.

2.1.2 IV-VI族发光器件

由于 III-V 族半导体材料的发光效率高, 多数的发光器件是由 III-V 族半导体材料制成的. 不同的 III-V 族原子构成的化合物半导体的能带结构有的是直接带隙, 有的是间接带隙, 且随着组分、比例的不同而有所不同. III-V 族化合物四元素材料如 AlInAsP、InGaAsP、AlGaAsSb、In(AsPSb) 等对应于直接带隙, 室温下发出的波长从可见光频段可到甚至大于 2000nm 的范围^[29]. III-V 族发光器件分为激光和发光二极管两大类. 激光的基本结构是 Fabry-Perot (F-P) 型双异质结构, 它将电子和光子限制在有源区. 在有源层的两侧分别有解理面用以形成 F-P 腔的镜面. 激光材料的选用是根据所期望得到的波长来决定的, 器件发出的波长则是由材料中导带到价带的光跃迁决定的^[30]. AlGaAs/GaAs 发出的光波长为 850nm, InGaAsP/InP 发出的光波长为 1300/1550nm. 此外, 三族氧化物等材料可发出可见光波长范围的光^[31]. 半导体发光二极管是 PN 结异质结结构. 与激光二极管相比, 效率通常要低几个百分点, 发出的谱线宽, 方向性差, 但制备简单, 成本低. 半导体发光二极管分为表面发光和侧面发光两种. GaAs 和 AlGaAs 一起合用或不同组成成分的 AlGaAs 一起合用制成的发光二极管可以发出波长为 780—900nm 的光. InGaAsP 与 InP 构成的发光

二极管可以发出波长为 1300—1550nm 的光^[31]. 上述发光器件已成功地应用在数据连结, 远程控制和光导纤维通讯系统等领域.

拟应用于光互连的 III-V 族半导体发光器件的研究主要集中在垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 和多量子阱半导体激光器 (MQW 激光器).

VCSEL 的研究已有二十余年, 此发光器件利用多层介质堆栈形成布拉格反射腔. VCSEL 的中心是有源区, 有源区的上下是反射器. 反射器又分为介质膜反射器和半导体多量子阱的分布布拉格反射器. 其中后者性能更优越. 布拉格反射器要求有高的反射率. 布拉格镜面之间的厚度为 $\lambda/2$ 的几个整数倍, 以形成精巧的 F-P 腔. 这样, 整个 VCSEL 腔体的长度通常只有几个微米^[30]. 研究表明: 经氧化限制结构的 VCSEL 可以实现在低的阈值电流和阈值电压条件下获得高的量子效率, 而且制备简单, 比较容易准确控制发射的波长. VCSEL 与光纤或其他光学器件耦合时既容易, 效率又高, 是最有发展前途和实用价值的发光器件. 第一个 VCSEL 是 Soda 等^[32] 在 1978 年制备成功的. 第一个单片 VCSEL 是通过分子束外延和掺杂的方法制备的^[33]. 近年来, VCSEL 的制备大多采用金属氧化汽相外延法. 用此法制备 VCSEL, 其工艺制备速度快, 可重复性高, 产品质量高. 长期以来, VCSEL 的研究环绕降低阈值电流和电压, 降低功率损耗, 提高反射率, 波长可调谐, 与其它光电器件、CMOS 器件和 MESFET 集成等方面广泛展开, 并不断取得可喜进展. 随着研究的深入, VCSEL 已展现出令人比较满意的性能. 经选择氧化的 VCSEL 的阈值电流已达到小于 $10\mu\text{A}$ ^[34], 阈值电压仅为 1.33V ^[35], 功率转换效率可超过 50% ^[36], 可以发现 21GHz 的小信号调制带宽^[37]. 另外, 一种已实现商用的离子注入远红外 VCSEL 的阈值电流已达到亚毫安, 且可以发出 15GHz 的小信号调制带宽^[38]. VCSEL 所展现的高性能使它具有很大的潜力应用于并行的几 Gbit/s 数据连结以实现总数据传输率达到 Tbit/s 的目标^[39]. VCSEL 的制备技巧也在不断提高. 1998 年, Bond 和 Dapkus 报告了一种双向高性能的 VCSEL. 从底部发光和从顶部发光的 VCSEL 可以并排地制备在通过外延生长的单片上. 这一技术将大大简化 VCSEL 在大规模三维互连中的应用^[40]. 1999 年, Chirovsky 等制成了一种称为 $\text{I}^2\text{-VCSEL}$ 的器件, 此器件有效地结合了浅离子注入形成的激光器孔径与独立的光折射率两方面的

特性. 它发出的光波长为 980nm , 在 2.5mA 电流的输入条件下, 光的输出功率为 1mW , 数据传输率达到 1Gbit/s . 而且此激光器的制备重复性很高, 适于批量制造^[41]. 但 VCSEL 至今还很少见到制成大阵列系统集成于硅芯片上, 所以对用在高密度互连系统的实际结果还缺少了解^[7]. 为满足光互连的要求, VCSEL 的性能还在不断提高^[42, 43].

多量子阱激光器的研究也有二十余年. 它利用较薄的势垒层把单个量子阱连接起来, 使注入载流子可以通过隧道效应分别收集于量子阱内以保证受激发射发生在有源区的受限态之间. 通过设计量子阱的尺寸, 可以使发光器发出所需的波长. Tsang 等早在 1979 年就制成了用 MBE 生长的含有 14 个量子阱的 AlGaAs 激光器. 紧接着又提出通过优化量子阱势垒高度和厚度, 使得注入载流子能够有效克服阱间势垒的作用而注入阱中. 此后, 多量子阱的研究得到迅速发展^[44-50]. 而且新的研究表明: 一维量子线和零维量子点结构的激光器比二维量子阱激光器具有更优异的性能^[51-53]. 预计它们可以得到极低阈值电流 (亚微安级) 的激光器, 且可望明显改善激光器光谱线宽和动态调制速率, 并提高温度稳定性. 但量子线和量子点激光器的制造需要极为精细的工艺, 目前还处于初级阶段. 多量子阱结构的另一优点是: 它除了可用于制作发光器件以外, 还可用来制作光接收器件. 而 VCSEL 则需另外的光接收器件来检测光. 量子阱激光器阵列已经制得, 且已焊接键合到 CMOS 电路芯片上. 它们的性能好到足以证明大的光互连实验系统是能够实现的.

由于现代的超大规模集成电路都是制造在硅片上, 因此 III-V 族发光器件要应用于芯片上的光互连则必须能够集成在硅片上, 与标准的微电子工艺兼容. 目前, 已有不少光电子和微电子工作者致力于 III-V 族发光器件与标准微电子电路的集成研究. 集成方法可分为单片生长和结合技术两类.

在单片生长方面, 已有很多文献报道了 III-V 族器件直接生长在硅片上的结果. 最早的 GaAs/Al-GaAs 激光器首先生长在有锗涂层的硅片上^[54], 后来通过 MBE 的方法直接生长在硅片上^[55], 紧接着应用 MOCVD 的方法将激光器生长在硅片上^[56]. 随后不断有 III-V 族激光器生长在硅片上的相关报道^[57-62]. 但是, III-V 族激光器与硅集成电路的单片生长集成方法还存在许多问题. 硅工艺中温度可高至 1000°C , 而 GaAs 工艺中温度通常需低于 850°C

以保证 As 原子不向外扩散. 此外, GaAs 与硅的界面上存在由晶格失配等引起的大量位错, 应力也很大, 这势必会降低器件的性能.

III-V 族发光器件与硅片的结合有可能成为 III-V 族器件集成在硅集成电路的途径. 结合技术主要有: 倒装芯片法 (flip-chip)^[63-67]、外延脱离法 (epitaxial liftoff)^[68-70]、镶饰法 (applique)^[71, 72]、流态装配法 (fluidic assembly)^[73, 74]、混合法 (hybridization)^[75-78]. 研究表明: III-V 族发光器件与硅集成电路的结合技术还未发展完善, 仍有许多问题有待解决, 如功耗降低、速度提高、占用空间减小、大阵列与硅的集成、光的对准性等问题^[79]. 结合技术成熟以后, III-V 族发光器件与硅芯片的集成将会应用到光互连中去, 实现高性能的光电信号处理.

2.2 光接收器件

光接收器件用以检测光信号. 它通过吸收光辐射产生电子空穴时, 将光信号转换成适于放大和处理的电信号. 从工作原理和结构来看, 光接收器件主要有三类: p-i-n 二极管, 它工作于 PN 结的本征区; 金属-半导体-金属光二极管, 它利用两个背对背的肖特基势垒工作; 雪崩光二极管, 它利用雪崩倍增对检测到的信号进行本征放大. 其中, p-i-n 二极管最为成熟, 被广泛采用.

作为应用于芯片上光互连的光学器件, 光接收器件与光发射器件相比, 较易实现. 这是因为硅基光接收器件可以成功地直接制作在硅片上, 与标准的硅工艺兼容^[80-84]. 硅基光接收器件可检测到波长为 850nm 的光波, 它应用在高速集成电路的最大障碍是反应速度较慢^[85, 86]. 对此, 许多研究致力于提高硅集成电路光接收器件的工作速度. Huchta 等^[85]使用 BiCMOS 工艺中的隐埋收集极制作光检测器, 检测能力达到 622Mbit/s. Zimmermann 等报告了 1.0 μ m CMOS 标准工艺条件下制备的 p-i-n 光接收器件在 3.3V 工作电压下, 数据处理能力也达到 622Mbit/s, 且精确度极高, 对长度为 $2^{23}-1$ 的伪随机比特序列进行接收的眼形图检测结果轮廓极其清晰, 并预言亚微米工艺制造出的光接收器件的数据处理能力将超过 1Gbit/s^[82, 83]. 1998 年, Woodward 等在 0.35 μ m CMOS 工艺条件下制成的光接收器件的数据处理能力已达到 1Gbit/s, 且出错率极低, 只有 10^{-9} . 此器件在 2.2V 的工作电压下功耗为 1.5mW, 但在 3.3V 下功耗增加到 6mW^[84, 87]. 光接

收器件的功耗是光互连总功耗中最大部分^[88, 89], 在设计时应使光接收器件的功耗在 mW 量级, 以保证整个芯片在使用大量光互连时功耗足够低.

硅基光接收器件除了晶体硅检光器以外, 还有多孔硅检光器. 其优势是可检测不同波长的光. Zheng 等^[90]制成了敏感性很高的多孔硅检光器, 可检测波长为 400—1075nm 范围的光, 且在 630—900nm 的波长范围内, 量子效率高达 0.97. Krueger 等^[91]制成的多孔硅检光器可检测到波长为 500、600 和 800nm 的光^[91]. 多孔硅光接收器件的稳定性问题可通过快速热氧化法来改善^[92].

III-V 族光接收器件由于还需要另外的工艺将其集成在硅片上, 目前看来, 它应用于未来巨大规模集成电路中光互连的前景不大.

2.3 光传输器件

光传输器件是连接光发射器件和光接收器件的桥梁. 它引导光发射器件发出的光波沿着设计的路线传播, 将光信号传输到光接收器件上.

从传输媒质的角度看, 光传输器件分为折射率引导传播的波导和以空气为媒质的自由空间传输两种. 其中, 后者是通过特别设计的微透镜组将光信号传输到光接收器件上. 此方法在实现上要求有非常高的对准性, 但可以高密度的传输信号, 且适应于芯片的尺寸按比例缩小, 因此很有潜力应用于光互连上, 已经被广泛地深入研究^[92-98]. 但目前的研究表明: 自由空间光互连大多适用于系统与系统或芯片与芯片之间的光互连.

芯片上的光互连主要是通过波导的形式实现. 波导是横截面为矩形的轴对称光信号传输线. 它利用波导本身与周围介质折射率的差异, 实现光沿波导传播. 其性能取决于折射率、几何尺寸、信号损失等因素. 从几何外形上分, 有凸起形波导、嵌入条形波导、脊形波导、埋藏型波导等几种. 为了应用于芯片上的光互连, 人们希望波导能与标准的硅集成电路兼容, 能够高密度地传输光发射器件和光接收器件的工作波长, 信号损失小, 占用面积小.

目前, 在硅基波导方面已有很多研究. 比较典型的波导结构是 SiO₂ 层上的 Si 波导, 即 SOI 波导. 光信号沿着 Si 材料所限定的路径传输. 由于 Si 与 SiO₂ 之间的折射率差异很大 ($\Delta n \approx 2$), SOI 波导结构中的 SiO₂/Si/SiO₂ 各层可以做得很薄 (< 1.0 μ m). SOI 波导的工作波长约为 1.55 μ m, 它可同

工作于长波长的光发射器件及光接收器件与 CMOS 集成电路集成在一起. SOI 的制备方法主要有: 氧离子注入分隔技术(SIMOX)、背面腐蚀键合技术(BESOI)和精巧切割技术(smart cut)^[199, 100]. SOI 有不同的形状以实现多种功能, 如方向耦合器(directional coupler)、波分离器(splitter)、分波长多路传输器(WDM, wavelength division multiplexer)等. 这些功能增强了硅集成电路中光信号的传输多样性和适应性. Trihn 等^[101]制备的脊形 SOI 方向耦合器的信号损失只有约 1.9dB. 此器件高 $2\mu\text{m}$, 宽 $3\mu\text{m}$, 耦合区域两波导之间的距离为 $2.5\mu\text{m}$, 耦合长度范围为 $150\text{--}400\mu\text{m}$. 这个研究组还利用此结构制备了 5×9 星状耦合器^[102]和分波长多路传输器^[103]. 这些器件都是光互连的主要元件. 利用 SOI 结构还可制成一种称为反谐振的反射光波导(ARROW, antiresonant reflecting optical waveguide)的垂直耦合器件以实现硅片上不同层之间光信号的连接^[104-106]. Ikuta 等人^[106]对 SOI 结构的 ARROW 器件各层的材料和尺寸作了优化设计, 使器件的耦合效率高达 96%, 耦合长度只有 $800\mu\text{m}$. 结构中, 光信号传输层的厚度为 $7.0\mu\text{m}$. 此 ARROW 器件可应用于硅集成电路的三维光互连中. 以上研究表明: SOI 技术在实现低成本的全硅集成电路光互连方面具有很大优势.

硅基波导还有 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料, 多孔硅材料等. $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 波导制作在 Si 基底上, 传输光波的工作波长可随 x 值的变化而变化. Pogossian 等^[107]通过选择外延生长法制备的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 波导可传播 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 的光波, 且信号损失只有 1.7dB/cm. 多孔硅材料的折射率随孔占率的不同在 1.3 到 3.0 的范围内可变. 因此多孔硅波导可工作于可见光到红外光的波长范围. 其优势是能够与发光二极管和光探测器的工作区直接集成. 1998 年, Arrand 等^[108]制备了可工作于 0.633、1.15、1.3 和 $1.52\mu\text{m}$ 的多孔硅波导样品, 但信号损失较大. 2000 年, Vorozov 等^[13]制备的多孔硅波导的信号损失只有约 1dB/cm, 但波导的横截面还很大, 宽度约 $20\mu\text{m}$, 厚度为 $10\mu\text{m}$, 还需进一步缩小.

人们对 III-V 族材料制成的波导也有一些研究^[109-111]. 如 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ 、 GaInAsP 、 InGaAs 波导, 工作波长从 1.3 到 $1.55\mu\text{m}$. 但由于存在与硅集成电路的集成问题, III-V 族波导应用于芯片上光互连即使技术上可行, 对成品率的提高和成本的降低

是不利的.

3 结论

(1) 21 世纪集成电路将从 $3\text{G}(G=10^9)$ 时代逐步发展到 $3\text{T}(T=10^{12})$ 时代, 即存储容量由 Gbit 发展到 Tbit, 集成电路器件的时钟频率由 GHz 发展到 THz, 数据传输速率由 Gbit/s 发展到 Tbit/s^[112]. 在这一发展过程中, 集成电路芯片上金属互连系统, 特别是总线长互连面临着难以解决的困难, 基于新的物理机制的光互连是解决此难题的最可能选择. 因为它无需物理原理上的新突破, 具有很多潜在的优点, 虽然工艺技术上还存在不少问题, 未来的制作成本也还无法预估, 但仍吸引着不少微电子和光电子方面的科技人员的密切关注和科研投入.

(2) 在硅基光发射器件中, 近年来, 多孔硅发光器件的研究较多, 进展较快. 但就其已达到的稳定性和发光效率的指标来看, 离开实用于光互连仍还有很大距离, 稳定性不满一年, 发光效率不超过 0.8%. 所以, 尽管硅基光接收器件和硅基光传输器件已有实用于光互连的实验室研究记录, 但还缺乏能实用于光互连的硅基发光器件. 因此全硅基光互连系统的实现还要走很长的路, 这将是实现高成品率、低成本芯片上光互连的最大障碍.

(3) 光发射器件采用基于 III-V 族半导体材料的 VCSEL 或多量子阱半导体激光器; 光接收器件采用例如 p-i-n 硅基光接收器件; 光传输器件采用硅基 SOI 波导以及 III-V 族光发射器件与硅 CMOS 集成电路的集成采用焊接键合技术, 似乎是当前实现芯片上光互连可以选择的最佳阵营. 毫无疑问, 这个方案的实现还需要对三种被选器件的工艺和特性以及 III-V 族光发射器件同硅 CMOS 集成电路芯片进行集成的技术继续进行最佳化及实用化的研究. 此外, 这个方案不仅要使用制造硅基集成电路、硅基光接收器件及硅基光传输器件的技术(当然它们中的绝大部分工艺是兼容的), 还需要使用制造基于 III-V 族材料的发光器件以及它与硅 CMOS 集成电路芯片的集成技术, 人们有理由担心由于技术的多样性和技术的难度带来的低成品率和高昂的造价是否会随着技术的更趋成熟而缓解, 是否芯片上光互连技术最终会被工业界所接收.

(4) 对集成电路技术和性能限制的估计, 一再被集成电路高速发展的事实所突破, 这几乎是近十年

来对集成电路作过发展预测的大多数专家的共识. 芯片上光互连的研究和实现不仅对推动集成电路向更高集成度、更高工作频率、更高传输速率的发展有着瓶颈的意义, 而且对光技术、光电子技术的发展和例如综合应用光子、光电子及微电子技术的新颖计算机概念(既非光子计算机也非电子计算机)的形成及其设计和制作也有很大的意义. 因此, 研究开发这项技术的驱动力是很大的, 尽管目前还面临技术上和成本上的严峻挑战, 只要在已有成果的基础上, 加大力度地继续研究和开发芯片上高密度光互连在实验室的实现, 2012 年前后将进入完善和预生产以及最终被工业界所采用等目标的达到也是有望的.

参考文献

- [1] The International Technology Roadmap for Semiconductors, 1999, Sponsored by SIA, EECA, EIAJ, KSIA and ISIA.
- [2] J. W. Goodman, F. J. Leonberger, S. Y. Kung *et al.*, Optical Interconnections for VLSI Systems, Proc. of IEEE, 1984, **72** (7): 850—865.
- [3] D. A. B. Miller, Physics Reasons for Optical Interconnection, Int. J. Optoelectronics, 1997, **11**: 155—168.
- [4] D. A. B. Miller, Optics for Digital Information Processing, Semiconductor Quantum Optoelectronics, Proc. the Fiftieth Scottish University Summer School in Physics, St. Andrews, June 1998, 433—463.
- [5] A. V. Kirshnamoorthy and D. A. B. Miller, Scaling Optoelectronic—VLSI into the 21st Century: A Technology Roadmap, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, April 1996, **12**(1): 55—75.
- [6] C. M. Ryu, U. Koelle, S. R. Johnson *et al.*, Optical Interconnects for High-Speed Data Links, Proc. SPIE, 1999, **3631**(4): 10—17.
- [7] D. A. B. Miller, Rationale and Challenges for Optical Interconnects to Electronic Chips, Invited Paper, Special Issue of Proc. IEEE, 2000, to be published.
- [8] D. A. B. Miller, Optical Interconnects, IITC '98, Stanford.
- [9] SIA Roadmap 1997.
- [10] C. Pickering, M. I. J. Beale, D. J. Pobbins *et al.*, Optical Studies of the Structure of Porous Silicon Films Formed in p-Type Degenerate and Non-Degenerate Silicon, J. Phys. C, 1984, **17**: 6535—6552.
- [11] L. T. Canham, Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers, Appl. Phys. Lett., 1990, **57**: 1046—1048.
- [12] N. Vorozov, L. Dolgyi, V. Yakovtseva *et al.*, Self-Aligned Oxidised Porous Silicon Optical Waveguides with Reduced Loss, Electron. Lett., 2000, **36**(8): 722—723.
- [13] L. T. Canham, Proc. Mater. Res. Soc. Symp., 1997, **452**: 29—42.
- [14] P. M. Fauchet, Photoluminescence and Electroluminescences from Porous Silicon, J. Luminescence, 1996, **70**: 294—309.
- [15] T. I. Cox, A. J. Simons, A. Loni *et al.*, Modulation Speed of an Efficiency Porous Silicon Light Emitting Device, J. Appl. Phys., 1999, **86**(5): 2764—2773.
- [16] M. B. Robinson, A. C. Dillon, D. R. Haynes *et al.*, Effect of Thermal Annealing and Surface Coverage on Porous Silicon Photoluminescence, Appl. Phys. Lett., 1992, **61**: 1414—1416.
- [17] R. T. Collins, M. A. Tischler and J. H. Stathis, Photoinduced Hydrogen Loss from Porous Silicon, Appl. Phys. Lett., 1992, **61**: 1649—1651.
- [18] A. Loni, A. J. Simons, T. I. Cox *et al.*, Electroluminescent Porous Silicon Device with an External Quantum Efficiency Greater than 0.1% Under CW Operation, Electronics Letters, 1995, **31**: 1288.
- [19] V. Mulloni, C. Mazzoleni and L. Pavesi, Elaboration, Characterization and Aging Effects of Porous Silicon Microcavities Formed on Lightly p-Type Doped Substrates, Semiconductor Science and Technology, 1999, **14**: 1052—1059.
- [20] P. M. Fauchet, L. Tsybeskov, C. Peng *et al.*, Lighting-Emitting Porous Silicon: Materials Science, Properties and Device Applications, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 1995, **1**(4): 1126—1139.
- [21] L. T. Canham, T. Cox, A. Loni *et al.*, Progress Towards Silicon Optoelectronics Using Porous Silicon Technology, Appl. Surf. Sci., 1996, **102**: 436.
- [22] L. Tsybeskov, S. P. Duttagupta, K. D. Hirschman *et al.*, Stable and Efficient Electroluminescence from a Porous Silicon-Based Bipolar Device, Appl. Phys. Lett., 1996, **68**: 2058.
- [23] K. Nishimura, Y. Nagao and N. Ileda, High External Quantum Efficiency of Electroluminescence from Photoanodized Porous Silicon, Jpn. J. Appl. Phys., 1998, **37**(3B): 303—305.
- [24] C. Peng and P. M. Fauchet, The Frequency Response of Porous Silicon Electroluminescent Devices, Modulation Speed of an Efficiency, Appl. Phys. Lett., 1995, **67**(17): 2515—2517.
- [25] M. Balucani, S. La Monica and A. Ferrari, 200MHz Optical Signal Modulation from a Porous Silicon Light Emitting Device, Appl. Phys. Lett., 1998, **72**: 639—640.
- [26] S. Chan and P. M. Fauchet, Tunable, Narrow, and Directional Luminescence from Porous Silicon Light Emitting Devices, Appl. Phys. Lett., 1999, **75**: 274—276.
- [27] S. P. Duttagupta, C. Peng, P. M. Fauchet *et al.*, Enhancement and Suppression of the Formation of Porous Silicon, J. Vac. Sci. Tech., 1995, **13B**(3): 1230—1235.
- [28] K. D. Hirschman, L. Tsybeskov, S. P. Duttagupta and P. M. Fauchet, Silicon-Based Visible Light-Emitting Devices Integrated into Microelectronic Circuits, Nature, 1996, **384**: 338—

- 341.
- [29] JIANG Jianping, Semiconductor Laser, Electronic Industry Press, 2000[江剑平, 半导体激光器, 电子工业出版社, 2000].
- [30] H. P. Zappe, Introduction to Semiconductor Integrated Optics, Artech House, INC., 1995, 293.
- [31] M. Fukuda, Optical Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, Inc. 1999, 93.
- [32] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara *et al.*, GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers, Jpn. J. Appl. Phys., 1979, **18**: 2329—2330.
- [33] P. L. Gourley and T. J. Drummond, Single Crystal, Epitaxial Multilayers of AlAs, GaAs and Al_xGa_{1-x}As for Use as Optical Interferometric Elements, Appl. Phys. Lett., 1986, **49**: 489—491.
- [34] G. M. Yang, M. H. MacDougal and P. D. Dapkus, Ultralow Threshold Current Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Obtained with Selective Oxidation, Electron. Lett., 1995, **31**: 886—888.
- [35] K. D. Choquette, R. P. Schneider, Jr., K. L. Lear *et al.*, Low Threshold Voltage Vertical-Cavity Lasers Fabricated by Selective Oxidation, Electron. Lett., 1994, **30**: 2043—2044.
- [36] K. L. Lear, K. D. Choquette, R. P. Schneider *et al.*, Selectively Oxidised Vertical Cavity Surface Emitting Lasers with 50% Power Convection Efficiency, Electron. Lett., 1995, **31**: 208—209.
- [37] K. L. Lear, H. Q. Hou, V. M. Hietala *et al.*, Engineering High Performance Vertical Cavity Lasers, Presented at the Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and devices, Canberra, Australia, 1996.
- [38] R. A. Morgan, Vertical Cavity Surface Emitting Lasers: Present and Future, in Proc. SPIE Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, 1997, **3003**: 14—26.
- [39] R. F. Carson, M. L. Lovejoy, K. L. Lear *et al.*, Low Power Approaches for Parallel Free Space Photonic Interconnects, in Proc. SPIE Optoelectronic Packaging and Interconnects, 1996, **CR62**: 35—63.
- [40] A. E. Bond and P. D. Dapkus, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with Spatially Adjustable DBR Reflectivity to Enable Free-Space Photonic Repeaters, IEEE Photonics Tech. Lett., 1998, **10**(5): 636—638.
- [41] L. M. F. Chirovsky, W. S. Hobson, R. E. Leibenguth *et al.*, Implant-Apertured and Index-Guided Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (I²-VCSEL's), IEEE Photonics Tech. Lett., 1999, **11**(5): 500—502.
- [42] H. Uenohara, K. Tateno, T. Kagawa and C. Amano, All MOCVD Grown 850nm Wavelength Refractive Index Guided Semiconductor Buried Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with p/n-InGaP Current Blocking Layers, IEEE Photonics Tech. Lett., 2000, **12**(6): 600—602.
- [43] Z. Zou, D. L. Huffaker and D. G. Deppe, UltraLow-Threshold Gryogenic Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, IEEE Photon. Tech. Lett., **12**(1): 1—3.
- [44] D. L. Goodwill, K. E. Devenport and H. S. Hinton, An ATM-Based Intelligent Optical Backplane Using CMOS-SEED Smart Pixel Arrays and Free-Space Optical Interconnect Modules, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., 1996, **2**: 85—96.
- [45] K. Nakahara, M. Kondow, T. Kitatani *et al.*, 1.3 μ m Continuous Wave Lasing Operation in GaInNAs Quantum-Well Lasers, IEEE Photon. Tech. Lett., 1998, **10**: 487—488.
- [46] M. Mullane and J. G. McInerney, Minimization of the Linewidth Enhancement Factor in Compressively Strained Semiconductor Lasers, IEEE Photon. Tech. Lett., 1999, **11**(7): 776—778.
- [47] E. Peral and A. Yariv, Measurement and Characterization of Laser Chirp of Multiquantum Well Distributed-Feedback Lasers, IEEE Photon. Tech. Lett., 1999, **11**(3): 307—309.
- [48] O. Blum and J. F. Klem, Characteristics of GaAsSb Single-Quantum-Well-Laser Emitting Near 1.3 μ m, IEEE Photon. Tech. Lett., 2000, **12**(37): 771—773.
- [49] M. Yamada, T. Anan, K. Tokutome *et al.*, Low-Threshold Operation at 1.3 μ m GaAsSb Quantum-Well Lasers Directly Grown on GaAs Substrates, IEEE Photon. Tech. Lett., 2000, **12**(7): 774—776.
- [50] L. Wu and Y. Zhang, Selenium Doping Effects and Low-Threshold High-Power GaInP-AlGaInP Single-Quantum-Well Lasers Grown by MOVPE, IEEE Photon. Tech. Lett., 2000, **12**(3): 248—250.
- [51] A. Sakamoto and M. Sugawara, Theoretical Calculation of Lasing Spectra of Quantum-Dot Lasers: Effect of Homogeneous Broadening of Optical Gain, IEEE Photon. Tech. Lett., 2000, **12**(2): 107—109.
- [52] X. Huang, A. Stintz, C. P. Hains *et al.*, Very Low Threshold Current Density Room Temperature Continuous-Wave Lasing from a Single-Layer InAs Quantum-Dot Laser, IEEE Photon. Tech. Lett., 2000, **12**(3): 227—229.
- [53] A. Stintz, G. T. Lin, H. Li *et al.*, Low-Threshold Current Density 1.3 μ m InAs Quantum-Dot Lasers with the Dot-in-a-Well (DWELL) Structure, IEEE Photon. Tech. Lett., 2000, **12**(6): 591—593.
- [54] T. H. Windhorn, G. M. Metzger, B. Y. Tsaui *et al.*, AlGaAs Double-Heterostructure Diode Lasers Fabricated on a Monolithic GaAs/Si Substrate, Appl. Phys. Lett., 1984, **45**(4): 309—311.
- [55] T. H. Windhorn and G. M. Metzger, Room-Temperature Operation of GaAs/AlGaAs Diode Lasers Fabricated on a Monolithic GaAs/Si Substrate, Appl. Phys. Lett., 1985, **47**(10): 1031—1033.
- [56] S. Sakai, T. Sago, M. Takeyasu *et al.*, Room-Temperature Laser Operation of AlGaAs/GaAs Double Heterostructures Fabricated on Si Substrates by Metalorganic Chemical Vapor Deposition, Appl. Phys. Lett., 1986, **48**(6): 413—415.

- [57] G. W. Turner, C. K. Chen, B. Y. Tsaur and A. M. Waxman, Through-Wafer Optical Communication Using Monolithic In-GaAs-on-Si LED's and Monolithic PtSi-Si Schottky-Barrier Detectors, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1991, **3**(8): 761—763.
- [58] B. D. Dingle, M. B. Spitzer, R. W. McClelland *et al.*, Monolithic Interation of a Light-Emitting Diode Array and a Silicon Circuit Using Transfer Processes, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(22): 2760—2762.
- [59] B. Gerard, X. Marcadet, P. Etiennet *et al.*, Monolithic Integration of III-V Microcavity LEDs on Silicon Drivers Using Conformal Epitaxy, Presented at the Fall Meeting of the Materials Research Society, MRS, Boston, Nov. 31, 1998.
- [60] C. Fan, D. W. Shih, M. W. Hansen *et al.*, Heterogeneous Integration of Optoelectronic Components, *Proc. SPIE Optoelectronic Integrated Circuits II SPIE, San Jose, 1998*, **3290**: 2—7.
- [61] O. Sjolund, D. A. Louderback, E. R. Hegblom *et al.*, Monolithic Integration of Substrate Input Output Resonant Photodetectors and Vertical-Cavity Lasers, *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**: 1015—1023.
- [62] S. Ting, M. Bulsara, V. Yang *et al.*, Monolithic Integration of III-V Materials and Devices on Silicon, *Proc. SPIE, 1999*, **3630**: 19—28.
- [63] A. V. Krishnamoorthy, T. K. Woodward, K. W. Goossen *et al.*, Operation of a Single-Ended 550Mbit/s, 4fJ, Hybrid CMOS/MQW Receiver-Transmitter, *Electron. Lett.*, 1996, **32**: 764—765.
- [64] A. L. Lentien, K. W. Goossen, J. A. Walker *et al.*, Array of Optoelectronic Switching Nodes Comprised of Flip-Chip Bonded MQW Modulators and Detectors on Silicon CMOS Circuit, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1996, **8**(2): 221—223.
- [65] R. King, R. Michalzik, D. Wiedenmann *et al.*, 2D VCSEL Arrays for Chip-Level Optical Interconnects, *Proc. SPIE, 1999*, **3632**: 363—372.
- [66] C. Jung, R. King, R. Jaeger *et al.*, 64 Channel Flip-Chip Mounted Selectively Oxidized GaAs VCSEL Array for Parallel Optical Interconnects, *Proc. SPIE, 1999*, **3627**: 143—151.
- [67] A. V. Krishnamoorthy, L. M. F. Chirovsky, W. S. Hobson *et al.*, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Flip-Chip Bonded to Gigabit-per-Second CMOS Circuits, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1999, **11**(1): 128—130.
- [68] C. C. Ginestet, M. Hargis, N. Jokerst *et al.*, Alignable Epitaxial Liftoff of GaAs Materials with Selective Deposition Using Polyimide Diaphragms, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1991, **3**: 1123—1126.
- [69] M. Herrscher, M. Grundmann, E. Droge *et al.*, Epitaxial Liftoff InGaAs/InP MSM Photodetectors on Si, *Electron. Lett.*, 1995, **31**: 1383—1384.
- [70] N. M. Jokerst, C. C. Ginestet, B. Buchman *et al.*, Communication Through Stacked Silicon Circuitry Using Integrated Thin Film InP-Based Emitters and Detectors, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1995, **7**: 1028—1030.
- [71] D. L. Mathine, R. Droopad and G. N. Maracas, A Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Applied to a 0.8 μ m CMOS Driver, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1997, **9**(7): 869—971.
- [72] C. B. Wheeler, D. L. Mathine, S. R. Johnson *et al.*, Selectively Oxidized GaAs MESFET's Transferred to a Si Substrate, *IEEE Electron Device Lett.*, 1997, **18**: 138—140.
- [73] H. J. J. Yeh and J. S. Smith, Fluidic Self-Assembly for the Integration of GaAs Light-Emitting Diodes on Si Substrate, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1994, **6**: 706—708.
- [74] J. K. Tu, J. J. Talghader, M. A. Hadley *et al.*, Fluidic Self-Assembly of InGaAs Vertical Cavity Surface Emitting Lasers onto Silicon, *Electron. Lett.*, 1995, **31**: 1448—1449.
- [75] T. L. Wrochesky, K. J. Ritter, R. Martin *et al.*, Large Arrays of Spatial Light Modulators Hybridized to Silicon Integrated Circuits, *Appl. Opt.*, 1996, **9**: 1180—1186.
- [76] R. Pu, C. Duan and C. W. Wilmsen, Hybrid Integration of VCSEL's to CMOS Integrated Circuits, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, **5**(2): 201—208.
- [77] T. Nakahara, H. Tsuda, K. Tateno *et al.*, Hybrid Integration of GaAs p-i-p Photodiodes with CMOS Transimpedance Amplifier Circuits, *IEEE Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1352—1353.
- [78] H. Wada and T. Kamijoh, Wafer Bonding of InP to Si and its Application to Optical Devices, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**(3B): 1383—1390.
- [79] D. L. Mathine, the Integration of III-V Optoelectronics with Silicon Circuitry, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, **3**(3): 952—959.
- [80] T. K. Woodward, A. V. Krishnamoorthy, A. L. Lentine *et al.*, Optical Receivers for Optoelectronic VLSI, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, **2**(1): 106—116.
- [81] J. S. Rieh, D. Klotzkin, Q. Qasaimeh *et al.*, Monolithically Integrated SiGe-Si PINHBT Front-End Photoreceivers, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1998, **10**: 415—417.
- [82] H. Zimmermann, T. Heide and A. Ghazi, Monolithic High-Speed CMOS-Photoreceiver, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1999, **11**(2): 254—256.
- [83] T. Heide, A. Ghazi, H. Zimmermann and P. Seegebrecht, Monolithic CMOS Photoreceivers for Short-Range Optical Data Communications, *Electronics Letters*, 1999, **35**(19): 1655—1656.
- [84] T. K. Woodward and A. V. Krishnamoorthy, 1Gb/s Integrated Optical Detectors and Receivers in Commercial CMOS Technologies, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, **5**(2): 146—156.
- [85] D. M. Kuchta, H. A. Ainspan, F. J. Canora *et al.*, Performance of Fiber-Optic Data Links Using 670nm CW VCSEL and a Monolithic Si Photodetector and CMOS Preamplifier, *IBM J. Res. Dev.*, 1995, **30**(12): 63—72.
- [86] P. Lalanne and J. C. Rodier, CMOS Photodiodes Based on

- Vertical p-n-p Junctions, Workshop on Optics and Computer Science, Proc. 11th Int. Parallel Processing Symp., Geneva, Switzerland, April 1997, 1—5.
- [87] T. K. Woodward and A. V. Krishnamoorthy, 1Gb/s CMOS Photoreceiver with Integrated Detector Operating at 850nm, Electronics Letters, 1998, **34**(12): 1252—1253.
- [88] A. V. Krishnamoorthy, D. A. B. Miller, Scaling Optoelectronic-VLSI Circuits into the 21st Century: A Technology Roadmap, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, **2**(1): 55—76.
- [89] D. A. Van Blerkom, C. Fan, M. Blume and S. C. Esener, Transimpedance Receiver Design Optimization for Smart Pixel Arrays, J. Lightwave Technology, 1998, **16**: 119—126.
- [90] J. Zheng, K. Jiao, W. Anderson *et al.*, Highly Sensitive Photodetector Using Porous Silicon, Appl. Phys. Lett., 1992, **61**: 459—561.
- [91] M. Krueger, M. Marso, M. G. Berger *et al.*, Color-Sensitive Photodetector Based on Porous Silicon Superlattices, Thin Solid Films, 1997, **297**(1—2): 241—244.
- [92] C. Tsai, K. H. Li, J. Campbell *et al.*, Photodetectors Fabricated from Rapid-Thermal-Oxidized Porous Si, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**: 2818.
- [93] F. A. Tooley, Challenges in Optically Interconnecting Electronics, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 1996, **2**(4): 3—13.
- [94] M. C. Wu, Micromachining for Optical and Optoelectronic Systems, Proc. IEEE, 1997, **85**: 1833—1856.
- [95] J. Jahns, Free-Space Optical Digital Computing and Interconnection, Progress in Optics, 1998, **38**: 419—513.
- [96] D. A. Lauderback, O. Sjoelund, E. R. Hegblom *et al.*, Modulation and Free-Space Link Characteristics of Monolithically Integrated Vertical-Cavity Lasers and Photodetectors with Microlenses, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 1999, **5**(2): 157—165.
- [97] D. T. Neilson and E. Schenfeld, Free-Space Optical Relay for the Interconnection of Multimode Fibers, Appl. Optics, 1999, **38**: 2291—2296.
- [98] H. Toshiyoshi, M. Kobayashi, D. Miyauchi *et al.*, Design and Analysis of Micromechanical Tunable Interferometer for WDM Free-Space Optical Interconnection, J. Lightwave Tech., 1999, **17**(1): 19—24.
- [99] M. Bruel, Silicon on Insulator Material Technology, Electronics Letters, 1995, **31**(14): 1201—1202.
- [100] B. Jalali, S. Yegnanarayanan, T. Yoon *et al.*, Advances in Silicon-on-Insulator Optoelectronics, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 1998, **4**(6): 938—947.
- [101] P. D. Trinh, S. Yegnanarayanan and B. Jalali, Integrated Optical Directional Couplers in Silicon-on-Insulator, Electronics Letters, 1995, **31**(24): 2097—2098.
- [102] P. D. Trinh, S. Yegnanarayanan and B. Jalali, 5×9 Integrated Optical Star Coupler in Silicon-on-Insulator Technology, IEEE Photonics Tech. Lett., 1996, **8**(6): 794—796.
- [103] P. D. Trinh and S. Yegnanarayanan, Silicon-on-Insulator (SOI) Phased-Array Wavelength Multi/Demultiplexer with Extremely Low-Polarization Sensitivity, IEEE Photon. Tech. Lett., 1997, **9**(7): 940—942.
- [104] M. Ohyama, Y. Kokubun, E. Ohta, Compact Three-Dimensional Optical Interconnects with Large Tolerance by Stacked ARROW-Type Waveguides, Electron. Lett., 1994, **30**(12): 951—952.
- [105] S. T. Chu, W. Pan, S. Sato *et al.*, Ting, ARROW-Type Vertical Coupler Filter: Design and Fabrication, J. Lightwave Tech., 1999, **17**(4): 652—658.
- [106] S. Ikuta, T. Sekimoto, W. Pan *et al.*, High-Coupling Efficiency Vertical ARROW Coupler with Large Tolerance and Short Coupling Length for Three-Dimensional Optical Interconnects, IEEE Photonics Tech. Lett., 1999, **11**(8): 1006—1008.
- [107] S. P. Pogossian, L. Vescan, A. Vonsovici, High-Confinement SiGe Low-Loss Waveguides for Si-Based Optoelectronics, Appl. Phys. Lett., 1999, **75**(10): 1440—1442.
- [108] H. F. Arrand, T. M. Benson, P. Sewell *et al.*, The Application of Porous Silicon to Optical Waveguiding Technology, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, 1998, **4**(6): 975—982.
- [109] D. P. Prakash, D. C. Scott, H. R. Fetterman *et al.*, Integration of Polyimide Waveguides with Traveling-Wave Phototransistors, IEEE Photon. Tech. Lett., 1997, **9**(6): 800—802.
- [110] A. Talneau, M. Allovon, N. Bouadma *et al.*, Agile and Fast Switching Monolithically Integrated Four Wavelength Selectable Source at 1.55μm, IEEE Photon. Tech. Lett., 1999, **11**(1): 12—14.
- [111] B. Liu, A. Shakouri, P. Abraham *et al.*, Fused InP-GaAs Vertical Coupler Filters, IEEE Photon. Tech. Lett., 1999, **11**(1): 93—95.
- [112] WANG Yangyuan, China Electronics News, p. 8, April 28, 2000 [王阳元, 二十一世纪微电子技术发展趋势, 中国电子报, 2000年4月28日, 第8版].

The Recent Progress of On-Chip Optical Interconnects for Integrated Circuits

RUAN Gang¹, XIAO Xi², R. Streiter², CHEN Zhi-tao³, T. Otto⁴ and T. Gessner^{2,4}

(1 ASIC and System State Key Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China)

(2 Center of Microtechnology, Chemnitz University of Technology, Chemnitz 09107, Germany)

(3 Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(4 Department of Micro Devices and Equipment, Fraunhofer Institute of Reliability and Microintegration, Chemnitz 09126, Germany)

Abstract: The limitations of conventional metallization interconnects of integrated circuits and the potential solution of the on-chip optical interconnect are discussed. The recent progress of the three basic optical interconnect devices (light emitter, photo receiver and optical waveguide) and their integration with silicon ICs are overviewed and reviewed. Finally, the prospect of on-chip optical interconnects on integrated circuits is appraised.

Key words: integrated circuits; optical interconnect; light emitter; photo receiver; optical waveguide

EEACC: 2550F; 2570; 4140

Article ID: 0253-4177(2001)04-0387-11

RUAN Gang male, born in 1935, professor, his main research interests are modeling and simulation for VLSI process, devices and circuits.

XIAO Xia female, born in 1971, Ph. D candidate, her main research interests are electrical and optical and optical interconnect for VLSI.

R. Streiter male, born in 1959, Ph. D, his research interests are simulation for interconnect and technology equipment of ULSI.

Received 16 October 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics