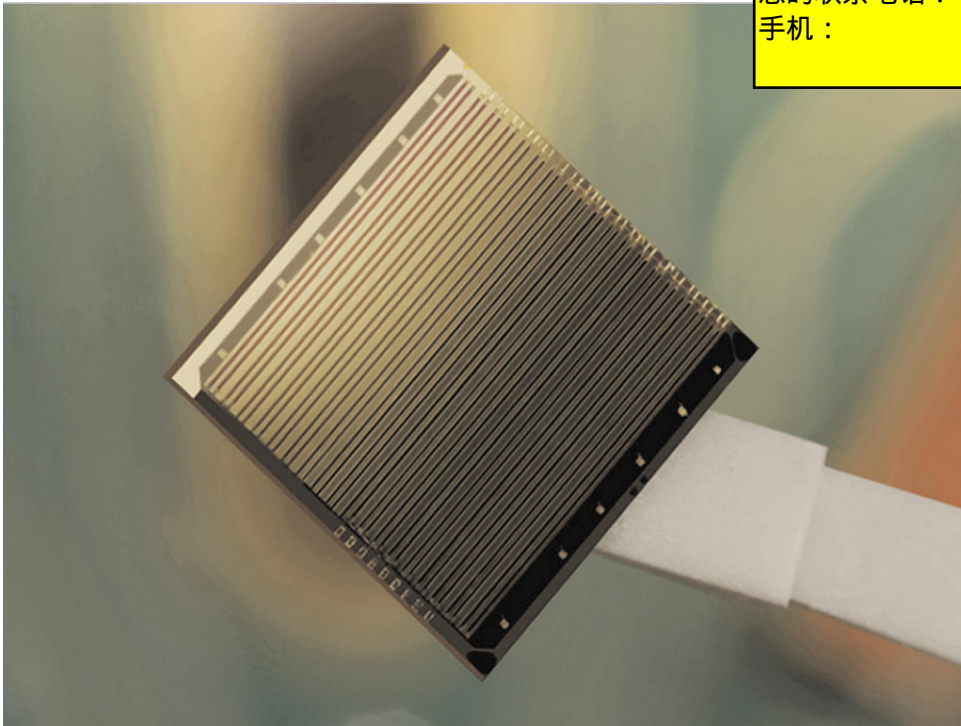


## 1 信息社会的前沿科学领域——硅光子学

随着信息科学的深入研究和光通信技术的发展，光的量子传输特性表现得更为明显，光的量子描述更多，光子学便应运而生。从物理学的角度看，光子学是研究光子的产生和运动特性、光子同物质相互作用及其应用的一门前沿学科；从工程技术的角度看，光子学是研究光作为信息和能量载体所赋予的特性、运动行为及其应用的一门工程技术学科。

信息光子学专门研究信息，它是材料学、计算科学、通信学等许多学科相互交叉形成的一门新学科。在广播、通信、计算机、化



# 硅光子学的研究和发展趋势

◆ 余金中

**作者简介：**余金中 (1943~)，中科院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室研究员、博士生导师，1991年获大阪大学工学博士学位。现为中国光学学会理事、中国电子学会和材料学会高级会员、美国光学学会和 SPIE 会员等。长期从事半导体光电子学研究，近年致力于硅光子学研究。获中科院和国家科技进步二等奖各2次，1992年起享受国务院颁发的政府特殊津贴。发表学术论文200多篇，主编和翻译出版书籍4部。



工、医疗等应用领域中，以光为载体，通过光的发射、传播、吸收、散射，可以探测和研究物理信息、化学信息、生物信息、医学信息，因而有许多应用。以固体材料为介质，研究光子载体在固体介质中的产生、运动、控制、操作，研究光子同固体物质的相互作用及其应用，这就是固体光子学。半导体光子学是固体光子学中最为人关注的部分，它专门研究半导体中光子的特性和运动规律。硅光子学就更加具体了，专门研究硅以及硅基异质结材料中光子的行为和规律，并且非常注重硅基光子器件

题图：世界上第一支混合型 Si-InP 激光器

的设计、制造和在光通信、光计算等领域中的实际应用。因此,硅光子学成为目前世界上十分热门的前沿学科。

硅不仅是一种电子材料,还是一种光子材料。非常成熟的微电子加工工艺为硅光子学提供了坚实的技术支持,大大加速了硅光子学的形成和发展,并且有进一步扩大和独树一帜的趋势,因此硅光子学是一门非常新的前沿学科。

半导体中有 3 个特征尺寸: 1) 微电子加工尺寸, 2004 年大规模集成电路生产线的最小尺寸为 90 nm, 目前已达 60 nm; 2) 光波在半导体材料中的波长, 对于光通信的 1.3  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  波长来说, 它们在 Si、GaAs、InP 等材料中的波长在 350~400 nm 范围内; 3) 电子波长: 电子也具有波动性, 电子在半导体材料中的波长约为 10 nm。如果半导体材料的线度小于 10 nm, 则会出现量子效应, 几何尺寸小于 10 nm 的区域便成为量子区域。

显然, 半导体的加工能力已经进入了光波波长的范围, 人们可以很容易地设计加工出小于光波波长 (350~400 nm) 的各种结构。硅基光子器件的设计、制造和应用就成了理所当然的事情了。

我们正处在一个将电子领域和光子领域二者合为一体的黄金时期。作为电子材料, 硅基微电子学已经显示出巨大的威力; 现在, 作为光子材料, 硅基光子学将再次发挥威力, 其潜在的高性能器件和广泛应用将在硅中延伸。

## 2 硅光子学的研究进展

硅基异质结构和纳米结构能够实现材料改性, 获得所期望的

能带结构、带隙和折射率。硅基异质结构 (SiGe/Si、SiGeC/Si、GaAlAs/Si、InGaAsP/Si 等)、SOI (Silicon on Insulator, 绝缘体上的硅)、硅基量子结构 (SiGe/Si 量子阱、SiGe 量子点等) 的研究取得较大进展, 为硅基光子学研究提供了材料基础。

1990 年, 英国科学家 L. T. Canham 发现阳极氧化的多孔 Si 中能够获得量子效率高达 10% 的可见光发射, 比体硅材料的近红外发光效率大 10 万倍, 这一发现标志着硅光子学研究的开始。发光器件一直是研究的最难点, 成了许多科学家的攻克目标。

2004 年美国加州大学首次报道了纳米结构的 Si pn 结二极管室温下在 1.1 eV 处受激发射。2006 年 9 月 19 日, 美国 Intel 公司和加州大学洛杉矶分校联合宣布, 研究成功世界上第一支混合型 Si-InP 激光器 (题图)。这种激光器很小, 其优点在于 1) 能够将许多激光器集成在同一硅片上; 2) 通过简单地改变硅波导的性质就可以获得不同的输出波长; 3) 采用键合技术可以大批量生产, 成本低, 产量高; 4) 容易同其它硅基光子器件集成, 制造高集成度的硅光子芯片。

体材料 Si 和 Ge 光电二极管已经广泛用于各种光电系统中。SiGe 多量子阱谐振腔增强型光电二极管是近年来 SiGe 探测器的重要进展。Ge 量子点光电探测器可以将探测波长延伸至 1.55  $\mu\text{m}$  波段。

2005 年 Intel 公司报道了速率高达 10Gbit/s 的 SOI CMOS 光调制器。这种新型调制器在未来的光互连和光计算中有巨大的应用前景。各种硅基光开关的研究

十分引人注目, 英国 Bookham 公司 2003 年报道了  $2 \times 2$  SOI 基 MMI-MZI 热光开关; 2003~2005 年中国科学院半导体研究所先后研制成功  $4 \times 4$ 、 $8 \times 8$ 、 $16 \times 16$  SOI 基 MMI-MZI 热光开关阵列。

日本 NEC 公司研制成功的 400 信道的, 阵列式波导光栅, 其中心波长 1570 nm, 波长范围 1530~1610 nm, 通道间隔 25GHz。

我国硅光子学研究与世界几乎是同步进行的, 中国科学院半导体研究所、物理所、北京大学、南京大学、厦门大学、复旦大学、清华大学等都进行了许多研究。北大的硅基发光理论和半导体所的硅基量子点外延生长、谐振腔增强型光电二极管、光开关阵列等都获得长足进展, 并在国际上有一定的影响。

相对化合物半导体而言, 硅光子学的研究起步较晚, 1990 年之后才逐渐兴起, 但是最近五年突起奋进, 在光子学理论、材料生长、器件设计制备和在光通信、光计算中的应用等方面, 已经取得重大进展, 并且大有如火如荼的发展之势。

## 3 硅光子学发展趋势

硅光子学是物理中最新、最前沿的学科, 硅光子器件将是继集成电路之后最有应用前景的实用元器件, 将在信息领域和人类社会生活中起着重要的作用, 特别是将推动光计算的发展, 具有重要的战略地位。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006-2020)》中明确指出: “信息技术将继续向高性能、低成本、普适计算和智能化等主要方向发展, 寻求新的计算与处理方式和物理实现是未来信息

技术领域面临的重大挑战……重点研究低成本的自组织网络,个性化的智能机器人和人机交互系统、高柔性免受攻击的数据网络和先进的信息安全系统。”同时还指出:“物质在纳米尺度下表现出的奇异现象和规律将改变相关理论的现有框架,使人们对物质世界的认识进入到崭新的阶段,孕育着新的技术革命,给材料、信息、绿色制造、生物和医学等领域带来极大的发展空间。纳米科技已成为许多国家提升核心竞争力的战略选择,也是我国有望实现跨越式发展的领域之一。”因此在未来十几年重点攻关后新一代信息功能材料及器件、传感器网络及智能信息处理、智能材料与结构技术、激光技术、纳米研究等项目推进中,硅光子学应当具有很大的发展空间。

图 1 示意表达了半导体材料、加工尺寸、集成电路、光电器件和应用领域的发展趋势。图中标出了硅和化合物半导体两类材料的半导体光电子器件的演变过程,包括年代、主要的集成电路和光电子器件、材料外延生长或微细加工的尺寸和主要应用的成功。

依照硅集成电路的器件尺寸和价格的发展趋势,我们可以预计硅基异质结构材料和器件的发展趋势为:异质材料多型化、材料尺寸纳米化、物理性质量子化、功能特性完善化、光电集成复杂化、实际应用多样化。

硅光子学的研究课题包括:

- 1) 硅和硅基异质结构材料中的光子行为的理论与模拟;
- 2) 硅基异质结构和量子结构的外延生长、材料改性和光学特性研究;
- 3) 硅基发光光源和阵列:硅基发光管、硅基激光器、太赫兹( $10^{12}$  Hz)和中红外光源,硅发光管阵列和激光器阵列;
- 4) 硅基探测器和阵列:硅锗量子阱和量子点探测器、硅基 InGaAs 和其它 III-V 族化合物探测器,硅基探测器线阵列和面阵列;
- 5) 硅基和 SOI 基光波导:纳米线光波导理论、纳米线波导的设计和制作、光波导器件;
- 6) 高速 (1~60 GHz) 光调制器、光开关、光开关线阵列和面阵列;

7) 光子晶体:一维、二维、三维硅基光子晶体理论、模拟、器件、制作和应用;

8) 硅基电子器件和光子器件的集成:光子器件和电子器件的兼容设计制造,硅基键合技术,单片集成和混合集成;

9) 硅基光子集成回路:分束器、合波器、模斑变换器、环形振荡器、耦合器等有源光子器件的集成设计制造;

10) 硅光子器件和光子回路在光通信和光计算及其它领域中的应用;

11) 硅基生物光子传感器、生物光子芯片及在医学中的应用。

由于硅大规模集成电路制备工艺极其成熟,硅基光子集成的研究工作主要集中在:

- 1) 适于制作光电器件的硅基异质结构的外延生长和键合技术;
- 2) 硅基异质结构与量子结构的光发射和光探测;
- 3) 硅基光波导器件和光互连;
- 4) 硅基光电子器件同电子器件的集成。

硅基光电子集成具有十分诱人的前景。2005 年和 2006 年硅拉曼激光器的连续波工作和混合型硅基 InP 激光器的问世让我们更看到了希望。图 2 示出硅基光电子集成回路,可以看出,将电子器件(SiGe 量子器件、异质结双极晶体管、CMOS、射频器件、隧道二极管等)、光子器件(激光器、探测器、光开关、光调制器等)、光波导回路集成在同一硅片或 SOI 片上,构成具有很多特殊光电性能的光电子集成电路,有可能实现光计算和人工智能。

硅光子学的发展得益于材料

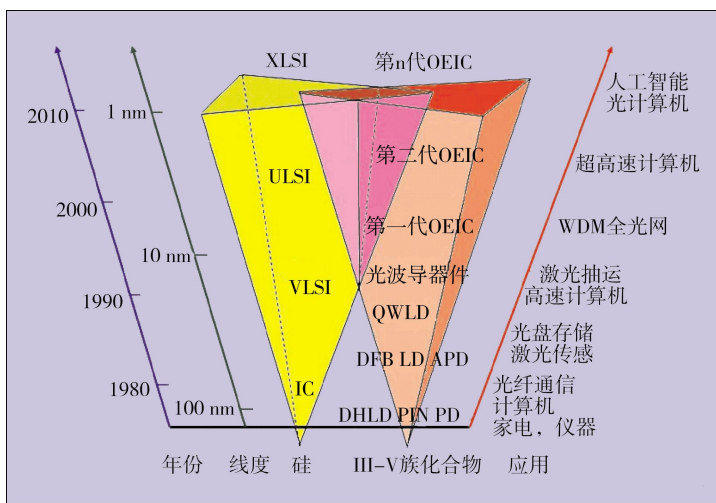


图 1 硅和 III-V 族化合物半导体的发展趋势图

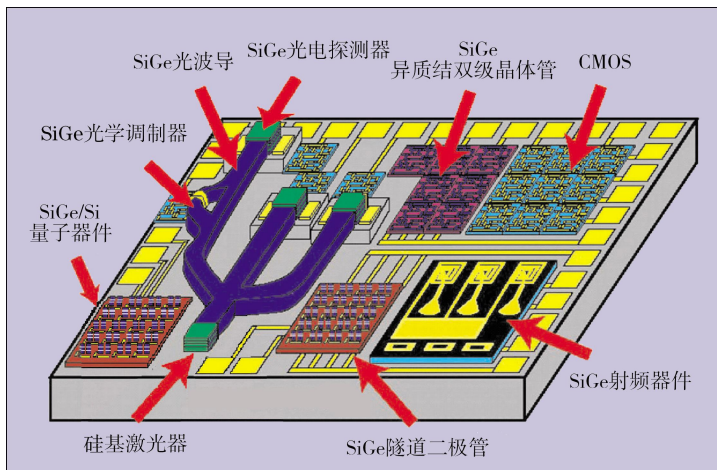


图 2 硅基或 SOI 基光电子集成电路示意图

科学、激光物理、微电子学、计算机科学、微细加工技术、现代化学等学科和技术的成就，其进展又极大地促进了相邻学科的交叉和发展。硅光子学的材料、器件和应用在新世纪中将会大显身手，为信息化时代的发展作出历史性的重大贡献。光子独特功能的运用对电子载体的局限性将会带来历史性的重大突破。可以肯定“光子与电子”将携手合作，和谐共建绚丽灿烂的信息时代。