

支撑光网络发展的硅基光电技术研究*

余金中[†]

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室 北京 100083)

摘要 作为大规模集成电路和化合物半导体光电子器件的制造技术共同构成的一门高新技术,硅基光电技术越来越受到重视.文章着重介绍中国科学院半导体研究所外延生长 SiGe/Si 量子结构和 Si 基器件研究的结果.采用自行设计的 UHV/CVD 系统,成功地生长出 II 型 SiGe/Si 量子阱和量子点,直到 250K 仍能观察到自组织生长 Ge/Si(001)量子点的发光峰.研制成功 SiGe/Si 谐振腔增强型光电二极管(RCE PD)、Y 分支 MZI 光调制器和多模干涉-马赫-曾德干涉型光开关等 Si 基光电子器件.1.3 μm 处 RCE PD 的量子效率达到 4.2%, -5V 偏压下暗电流密度 $12\text{pA}/\mu\text{m}^2$, 2×2 热光型光开关的响应时间小于 $20\mu\text{s}$,两输出端关态串扰为 -22dB ,通态串扰为 -12dB .

关键词 光电子集成, SiGe/Si, 光电探测器, 耦合器, 光开关, 全光网

Si-based optoelectronic technology for development of optical networks

YU Jin-Zhong[†]

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract As a new high technology, combining the fabrication techniques of IC and compound optical devices, Si-based optoelectronic technology has become more and more attractive. We present results of studies on Si-based optoelectronics carried out in the Institute of Semiconductors, CAS, including UHV/CVD epitaxy of SiGe/Ge quantum structures and Si-based optoelectronic devices. Type-II SiGe/Si quantum wells and self-organized dots have been successfully grown, and the photoluminescence spectra from the quantum dots were measured as far as 250K. Several Si-based devices, such as resonant cavity enhanced photodiodes, optical modulators and switches, have been fabricated. The quantum efficiency and dark current density of the photodiodes at $1.3\mu\text{m}$ are 4.2% and $12\text{pA}/\mu\text{m}^2$, respectively. The response time of the 2×2 thermal-optical switches is shorter than $20\mu\text{s}$, and the turn-on and turn-off cross-talks are -22dB and -12dB , respectively.

Key words OEIC, SiGe/Si, photodiode, waveguide coupler, optical switch, all optical networks

1 引言

信息时代的特征是:信息量巨大爆炸、信息传递非常快捷、信息处理十分迅速.其量化的标志为 3^T ($1T=10^{12}$):光通信传输速率大于 1Tbit/s ,计算机运算速度大于 1Tbit/s ,光盘存储密度大于 $1\text{Tbit}/\text{in}^2$.虽然硅的大规模集成电路的集成度提高得很快,遵循“摩尔定律”:每三年翻两番,然而“电子瓶颈”限制了信息传输速率.为了突破这一限制并实现 3^T ,必须采用光电子器件及光电子集成回路来

提高信息的传输与处理速率和存储密度.半导体光电子集成以半导体为基片,以集成为手段,以光信息为载体,以光速为传输速度,具有集成度高、信息量大、速度快等独特的性能和作用,因此,研究半导体光电子集成技术就变得越来越重要了.

* 国家自然科学基金(批准号 69896260,69990540)、国家重点基础研究发展计划(批准号:G2000-03-66)和国家高技术研究发展计划(批准号 2002AA312060)资助项目

2003-05-15 收到初稿,2003-09-03 修回

[†] E-mail: jzyu@red.semi.ac.cn

光纤网络系统是未来光通信的主流方向,光子技术将在网络体系中成为主体技术,发挥重大的作用^[1].由于硅基光电子集成的独特性能和重要作用,成为支撑光纤网络系统的关键,已成为世界各国十分关注的研究领域,它集“光、机、电、计、材”于一身,有机地结合大规模集成电路和化合物半导体光电子器件的制造工艺,共同构成一门高新技术^[2].其目标为:以硅衬底为基片,在同一芯片上集成光子有源器件和无源器件,实现光和电的信息或能量的高效转换、高速传输和接收.它的研究与发展已经形成一门新的学科——硅基光电子学.

硅基光电子集成的工艺与互补的金属氧化物半导体晶体管(complementary metal-oxide-semiconductor transistor, CMOS)工艺完全兼容,可以实现低成本的集成光电子回路.硅基集成光学研究主要集中在三个方面:(1)硅基异质结构与量子结构的光发射和光探测;(2)硅基光波导器件和光互连;(3)硅基光电子器件同电子器件的集成.

在能带工程的基础上,现已研制出频率高达210GHz的异质结双极晶体管(heterostructure bipolar transistor, HBT)、灵敏度达0.9A/W的光电探测器、损耗小于0.1dB/cm的光波导以及可见光LED.将硅基LED、PD、光波导器件、FET、HBT等集成在同一芯片上,为硅基光电集成带来希望.我国也十分重视硅基光电子学的研究,复旦大学、南京大学、清华大学、浙江大学、中国科学院物理研究所和半导体研究所开展了硅基异质结构研究,我们侧重硅基光电子学研究,并取得许多进展.我们采用自行研制的UHV/CVD(超高真空化学气相沉积)系统,在硅衬底基片上成功地外延生长出高质量的SiGe/Si量子阱和量子点,研制成功SiGe/Si谐振腔增进型光电二极管(resonant cavity enhanced photodiode, RCE PD)和SiGe/Si HBT,绝缘体上的硅(silicon on insulator, SOI)耦合器、光开关以及阵列波导光栅(array waveguide grating, AWG)等硅基光电子器件.本文在介绍硅基光电子技术的同时,着重描述我们近年来的研究成果.

2 超高真空化学气相沉积生长 SiGe/Si 量子结构

为了在硅上制造光电子器件,必须研制出能够发射光和探测光的硅基异质结构、量子结构、纳米结

构材料.这样, SiGe/Si、SOI 以及 Si 上外延或键合 III-V 族化合物半导体便成了热门课题.

2.1 超高真空化学气相沉积生长 SiGe/Si^[3]

采用自行设计的超高真空化学气相沉积(UHV/CVD)系统,使用串接分子泵、生长室冷壁通液氮、改进衬底清洗、生长硅缓冲层以及提高生长速率等方法,大大改善了生长的原始表面.利用高低温交替的方法,在 SiGe/Si 超晶格缓冲层结构上生长弛豫的 SiGe,表面位错密度仅为 $2 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$.原位退火及时地消除了残余应力,获得了表面平均粗糙度为 5nm、应力弛豫度为 95%、表面位错密度为 $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 的 SiGe.

2.2 I 型 II 型 SiGe/Si 量子阱^[4]

在由两种禁带宽度不同的半导体组成的量子阱中,材料 1 和材料 2 的禁带宽度分别为 E_{g1} 、 E_{g2} ,导带底分别为 E_{c1} 、 E_{c2} ,价带顶分别为 E_{v1} 、 E_{v2} .如果 $E_{g1} > E_{g2}$ 并且 $E_{c1} > E_{c2}$ 、 $E_{v1} < E_{v2}$,则它们构成 I 型量子阱.如果 $E_{g1} > E_{g2}$ 、 $E_{c1} > E_{c2}$ 、 $E_{v1} > E_{v2}$ 则它们构成 II 型量子阱.

我们在硅衬底上生长 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$ 的量子阱,构成 I 型多量子阱(multi quantum wells, MQWs),双晶 X 射线衍射摇摆曲线同理论曲线几乎完全吻合,表明晶体质量完美;MQWs 的光荧光(photoluminescence, PL)谱中 NP 峰随着阱宽的变窄而出现明显的蓝移.然而 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 阱的能带为间接带,电子和空穴的复合效率相当低,这不利于发光.

我们进一步在应变 SiGe 衬底上成功地生长出 II 型 SiGe/Si 量子阱,其电子被限制在量子阱中,而空穴被限制在临近的限制层中,尽管电子和空穴没有处在相同的空间区域,但被限制的电子和空穴的浓度很高,因此能有效地提高发光效率,在 200K 下仍能观察到光荧光发光峰,表明 II 型量子阱结构对电子和空穴都有较强的限制.然而所能实现的最高温度还远在室温以下.这样一来,研究量子点就变得很必要了.

2.3 自组织生长 Ge/Si(001)量子点^[5]

在 GeSi 应变层上生长 Ge 岛,原子力显微镜显示出下面的 GeSi 层部分地参与了 Ge 岛的形成,从而发现了自覆盖效应.由于 Ge 岛与 GeSi 应变层的相互作用,引起应变层中的应力的部分弛豫,Ge 岛的尺寸和密度随 GeSi 层的 Ge 组分增加而增加.这些结果为生长密度高、均匀性好的量子点开辟了新途径.直到 250K,仍能观察到量子点的发光峰(图 1).这一结果表明,Ge 量子点可以在比 SiGe/Si 量

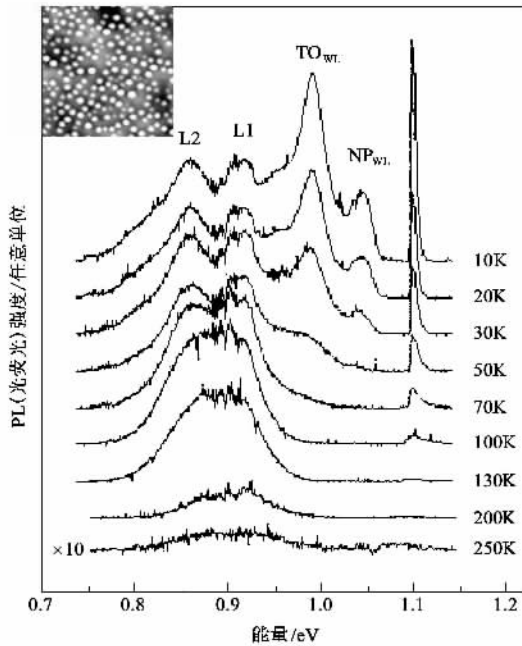


图1 Ge岛的PL谱同温度的关系(左上图为Ge岛的原子力显微镜照片)

子阱更高的温度下发光,其PL谱显示出Ge岛发光比Si上的量子阱的发光强。

上述量子结构仍未能实现室温下发光.理论与实验研究表明,通过能带折叠效应、Si/SiO_x或Si/Se超晶格、硅或SiO₂中掺稀土元素或 δ 掺杂以及硅上外延SiFe₂、硅上键合或外延III-V族化合物等方式,有可能获得直接带隙结构,实现高温下发光,实验探索正在进行中,这些必将为硅基发光器件提供可靠的基础。

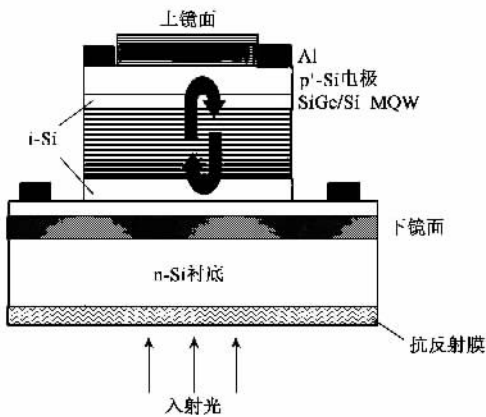


图2 SiGe/Si谐振腔增强型探测器结构图

3 SiGe/Si有源光电器件:谐振腔增强型光电二极管^[6]

光电探测器是集成光电子学中的一类重要器件.为了使Si_{1-x}Ge_x探测器的响应波长向通信用的长波方向延伸,必须提高组分 x 值.然而由于Si和Ge的晶格失配高达4.18%, x 值超过40%时的临界厚度小于20nm.若不引进太多的缺陷,则吸收区的厚度会很薄.采用超晶格结构,适当设计各层的参数,可增加总吸收区的厚度,然而就总体而言,吸收区的厚度小于1 μ m,依然不够厚.为此,我们在国际上首次研究出具有谐振腔增强作用(RCE)的SiGe/Si光电二极管。

图2为SOI基制备的SiGe/Si谐振腔增强型探测器结构.在这种结构中,吸收区为SiGe/Si多量子阱,位于共振腔内,进入腔内的光场多次往返吸收区而被吸收,光的有效吸收长度(光作用)足够长,因此这种探测器具有较高的响应度.由于这种谐振腔比较短,吸收区中光生载流子的运输距离(电效果)很短,使探测器的响应速度比较快.同时由于共振腔的滤波作用,这种探测器具有波长选择性,有滤波作用,可用于窄带光信号的探测。

用键合和智能剥离技术研制成功反射器上的硅(silicon on reflector, SOR),顶层硅的厚度为1 μ m,而反射率可达到99%以上,构成高反射率Si衬底.在该衬底上外延高质量的SiGe/Si MQW,在其上淀积Si/SiO₂多层分布布拉格反射器(distributed Bragg reflector, DBR)反射膜,实现Si基共振腔结构.制成了正入射和背入射两种结构SiGe/Si MQW RCE探测器.后者性能更好.其性能为:1.3 μ m处的量子效率达到4.2%;-5V偏压下工作时,暗电流密度为12pA/ μ m²;具有波长选择性,最小半高宽为6nm.这一工作得到国际同行的高度评价。

4 SiGe/Si无源光电子器件:硅基光波导器件

硅基光波导的研究主要集中在SiO₂光波导回路、SiGe/Si光波导器件和SOI光波导器件等方面^[7].表1列出了三种常见的硅基光波导结构的性能,从表1以看出,SOI光波导的制作工艺成熟,制作容差大,导波层和限制层之间的折射率差大,因而对光场的限制作用强,传输损耗较低,同光纤耦合效率高. SOI材料用于光波导器件有许多优越性(1)与Si工艺兼容,便于电子集成和光子集成(2)能制作三维结构,可大规模集成(3)损耗小,具有良好的波导特性(4)用于光互连,光学回路的运算速度

比电子回路快 10^4 倍 (5) 抗辐射,能在空间或军事上应用. 高速率、大容量 DWDM(密集波分复用)网络系统需要重点解决高速光传输技术、复用与解复用技术、光分插复用技术、光交叉互连技术、光波导开关集成面阵、高性能集成探测器. 而这些技术的实现离不开高性能、高可靠性的硅基光波导器件.

表1 三种硅基光波导结构性能比较

波导结构	SiO ₂ 光波导	SiGe/Si 光波导	SOI 光波导
材料制备	SiO ₂ 中掺杂	晶格不匹配	成熟
折射率差	0.1%—0.75%	小	大
与 CMOS 工艺兼容性	不兼容	兼容	兼容
几何尺寸	大	厚度受到限制	大
制作容差	小	小	大
损耗	小	较小	较小
与光纤耦合效率	高	低	高

4.1 SOI 光波导^[8]

硅基光波导有平板和条形两种. 在条形结构中,人们研究得最多的是脊形结构. 在图 3 所示脊形结构中,如果 W 、 H 和 h 分别为脊形波导的脊宽、内脊高和外脊高,并且 $t = W/H$, $r = h/H$,则由光学导波理论研究得出的单模传输的条件为^[9]

$$t \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (r > 0.5) \quad (1)$$

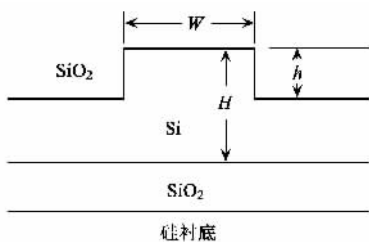


图3 SOI 脊形波导结构

实验发现 (1) 式有一定偏差. 我们采用有效折射率方法求解三维脊形波导的本征方程,得到与实验结果一致的脊形波导的单模条件^[10]:

$$t \leq \frac{r + 0.15r^3}{\sqrt{1-r^2}} \quad (r > 0.5) \quad (2)$$

这些研究表明,脊波导几何尺寸满足一定条件时,可以实现大截面尺寸的单模 SOI 波导,波导截面尺寸可与光纤芯层尺寸相当. 在脊形波导中,尽管在垂直方向上波导可承载多模,但水平方向上,由不同波导层厚度引起的折射率差很小,只能承载单模,因此在

脊形波导中垂直方向的高阶模耦合到侧向基模中,从而在脊波导中形成有效的单模传输. 弯曲波导在集成光学中也是非常重要的. 为了减小器件的尺寸,希望弯曲波导的弯曲半径尽量小. 通常波导弯曲会导致光场向衬底泄漏,这是限制减小波导弯曲半径的一个重要因素. 由于 SOI 光波导 Si 和 SiO₂ 具有很大的折射率差,这种泄漏损耗是可以忽略的. 此时限制减小 SOI 弯曲波导的弯曲半径的主要因素是波导的侧向辐射损耗. 采用锥形结构(弯曲部分波导的宽度较小),可减小弯曲波导的最小弯曲半径.

4.2 光波导耦合器^[7]

光波导耦合器是集成光学中的一种重要的单元器件. 传统的波导耦合器有 Y 分支器和定向耦合器,通常要求较高的加工精度,而且器件的尺寸较长. 利用多模波导的自映像效应的多模干涉 (multi-mode interference, MMI) 耦合器是另一类光分束器. MMI 耦合器具有许多不同寻常的优点,如器件结构紧凑、制作容差大、输出功率均衡、光功率损耗低,因此它尤其适合于分支数比较大的分束器. 这种耦合器近年来受到人们的很大的重视,也广泛应用于集成光学中.

多模波导干涉耦合器的基本工作原理是基于多模波导中的自映像现象. 在多模波导中,沿着波的传播方向,在周期性的间隔处出现输入场的一个或多个复制的映像,这就是多模波导的自映像. 多模波导干涉耦合器由输入、输出单模波导和多模波导 3 个部分组成. 多模波导干涉耦合器有 3 种结构形式: (1) 普通干涉 MMI (2) 对称干涉 MMI (3) 受限干涉 MMI.

我们研制了对称干涉 1×2 3dB 分束器、 1×4 分束器以及受限干涉 2×2 耦合器. 耦合器(特别是 2×2 耦合器)具有很好的功率均衡性. 同时器件显示了很大的制作容差. 对于 2×2 耦合器,多模波导长度的容差可达到 $200 \mu\text{m}$,刻蚀深度的容差可达到 $0.8 \mu\text{m}$.

4.3 SOI 光波导开关^[7,8]

光开关有微电机系统 (micro electric mechanic system, MEMS) 光开关、SOI 光波导开关和聚合物光开关等多种. SOI 光波导,波导层为硅. 硅具有较大的热光温度系数,当 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 时 $\frac{\partial n}{\partial T} = 2 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$,因此可利用硅的热光效应实现对光场的调制和开关功能. 硅有较强的等离子色散效应,硅中载流子浓度的变化会引起硅的折射率的变化. 在 $1.3 \mu\text{m}$

处,注入空穴浓度为 10^{18} cm^{-3} 时,硅的折射率变化可达到 1.5×10^{-3} ,与 GaAs 的电光效应水平相当.因此,可以利用 Si 的等离子色散效应实现 SOI 电光波导开关.

光开关的结构主要有定向耦合器开关、多模干涉马赫 - 曾德尔干涉仪 (multimode interference - Mach - Zehnder interferometer, MMI - MZI) 型开关、全内反射开关以及数字光开关等几种结构.定向耦合器光开关要实现高消光比,要求两耦合波导的长度精确等于耦合长度的奇数倍,而耦合长度与两耦合波导的间距成指数关系,因此定向耦合器开关要求有高的制作精度.而对于全内反射交叉波导开关和数字光开关都要求交叉波导或分支波导具有很小的交叉角或分支角,这是这类器件的关键.然而这种小的交叉角或分支角不仅增加了器件的制作难度,而且由于输入(输出)分支之间必须有一定的距离,小的分支角使整个器件的长度变得很长.马赫 - 曾德尔干涉仪 (MZI) 是一种常用的光开关结构. MZI 由 2 个 3dB 耦合器和 2 个波导臂组成.传统的 3dB 耦合器有 Y 分支器,定向耦合器,非对称 X 结等,这样的结构同样存在上面提到的问题.以多模干涉耦合器作为 3dB 耦合器,具有结构紧凑、制作容差性大的特点,在光开关中应用越来越广泛. MMI - MZI 光开关的结构如图 4 所示.

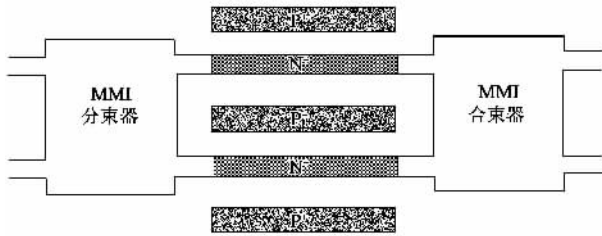


图 4 MMI - MZI 光波导开关结构的顶视图

我们利用硅的热光效应制作了 Y 分支 MZI 光调制器,调制器的消光比为 -16.5 dB ,开关时间小于 $20 \mu\text{s}$,功耗为 0.39 W .同样,利用热光效应制作了 2×2 多模干涉 MZI 光开关,光开关的响应时间小于 $20 \mu\text{s}$,功耗为 0.57 W ,两输出端关态串扰为 -22 dB ,通态串扰为 -12 dB ,交叉输出端的消光比为 -13.1 dB ,直通输出端的消光比为 -10 dB .

4.4 阵列波导光栅 (AWG)

阵列波导光栅 (array waveguide grating, AWG) 是波分复用 (wavelength division multiplex, WDM) 通信系统的一种关键器件.目前 AWG 的研究主要集

中在 SiO_2 , SOI, InP, 聚合物等材料上,因此硅基 AWG 格外重要. Jalali 等已经研制了制作在 4 英寸 SOI 晶片上的相位阵列波导光栅.其自由光谱范围 (FSR) 为 7.6 nm ,通道间隔为 1.9 nm ,相邻通道间的串扰为 -22 dB ,整个器件损耗小于 6 dB .另外他们还研制了 8 通道的 AWG,通道间隔为 2 nm ,其他性能与四通道的 AWG 类似.

用 SOI 制作的光波导器件,无论是光开关还是 AWG,一个很重要的优点是器件对偏振的敏感性很小.在制作的 AWG 中,TE - TM (横电场 - 横磁场模) 的偏移约为 0.04 nm ,这是现有器件在不加补偿的情况下所能达到的最好的水平.一般器件的偏振敏感性主要由两个因素决定 (1) 器件材料自身的双折射和波导层的内应力 (2) 波导几何结构上的不对称.对于 SOI 波导器件,波导层为硅,不存在材料的双折射和内应力,因此 SOI 波导器件的偏振敏感性主要由波导的结构决定.采用深刻蚀的脊形结构,可以最大限度地减小器件的偏振敏感性.

光开关和 AWG 可以有效地构成全光网中的光学交叉互联和光学上下路,支撑光网络的发展.

5 硅基光电集成

在真正硅基光电子集成变为实际产品之前,平面光回路 (planar light circuit, PLC) 已经成为现实,有的已经用于密集型波分复用 (dense wavelength division multiplex, DWDM) 全光网通信系统.确切地说,可以把它看作是硅基混合光电子集成,即以硅片为衬底,在其上制作一些目前已经成熟的光电器件或电子器件的同时,通过刻蚀 V 形槽定位耦合光纤、键合或焊接 III - V 族光电器件或电子器件,构成具有一定光电信息转换功能的组合件. PLC 工艺兼容,制造方便,十分适用,很受光通信系统的工程人员的欢迎.

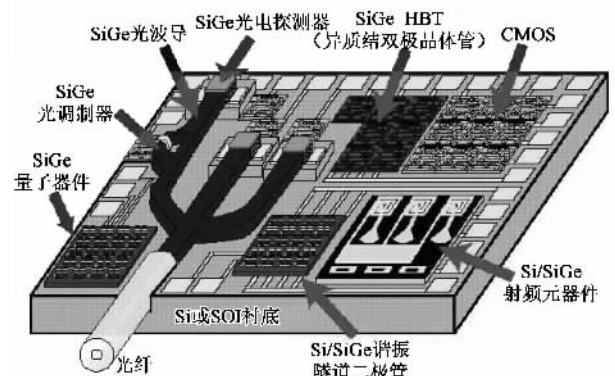


图 5 硅基光电子集成电路

当然人们寄希望于真正的硅基光电子集成. 图 5 为一种硅基光电子集成电路图,它同时集成了 SiGe HBT、CMOS、SiGe 光波导器件、SiGe 光电探测器、SiGe 调制器、SiGe 射频器件、SiGe/Si 量子器件等,还有给光纤定位的沟槽,同时具有传输与探测光信号,放大和处理电信号的功能,兼有电子学和光子学的优势. 虽然这些还处于研究之中,但也确实指日可待.

6 结束语

图 6 为半导体光电子技术发展趋势图. 随着外延和微细加工尺寸进入微米、亚微米、纳米量级,硅电子集成电路经历了大规模集成(VLSI)、超大规模集成(ULSI)、极大规模集成(XLSI),III-V 族化合物半导体经历了双异质结(DH)激光器、分布反馈(DFB)激光器、量子阱(QW)激光器、第一、第二代光电集成电路(OEIC). 到上世纪末,硅基和 III-V 族基的电子和光电子器件出现了交融. 硅基光电子学的发展得益于材料科学、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,它的进展又极大地促进了相邻学科的交叉和发展. 高速率、大容量密集波分复用网络系统需要重点解决高速光传输技术、复用与解复用技术、光分插复用技术、光交叉互连技术、光波导开关集成面阵、高性能集成探测器. 而这些技术的实现离不开高性能、高可靠的硅基光电子技术. 因此,研究硅基光电子技术具有重要的学术意义和美好的应用前景.

参 考 文 献

- [1] 王启明. 中国科学院院刊,2002,2:39[Wang Q M. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2002,2:39(in Chinese)]
- [2] 余金中. 半导体光电子技术. 北京:化学工业出版社,2003:1—17,131—156[Yu J Z. Semiconductor Optoelectronic Technologies. Beijing: Chemical Industry Press, 2003:1—17, 131—156(in Chinese)]
- [3] Yu J Z, Yu Z, Cheng B *et al.* Science Foundation in China, 1999,7(7):40
- [4] Yu J Z, Huang C J, Cheng B W *et al.* International J. Modern Phys. B, 2002,16(28&29):4228
- [5] Huang C J, Tang Y, Li D Z *et al.* J. of Crystal Growth, 2001, 203:9
- [6] Li C, Yang Q Q, Chen Y H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2000, 77(2):157
- [7] 余金中,严清峰,夏金松等. 功能材料与器件学报,2003,9(1):1[Yu J Z, Yan Q F, Xia J S *et al.* J. of Functional Materials and Devices, 2003,9(1):1(in Chinese)]
- [8] YU J Z, Wei H Z, Yan Q F *et al.* J. of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2003,20(1):1
- [9] Soref R A, Pirnat T, Friedman L. J. Quantum Electro., 1991,27:1971
- [10] Wei H Z, Yu J Z, Liu Z L *et al.* IEEE Photonics Technology Letters 2001,13(5):466

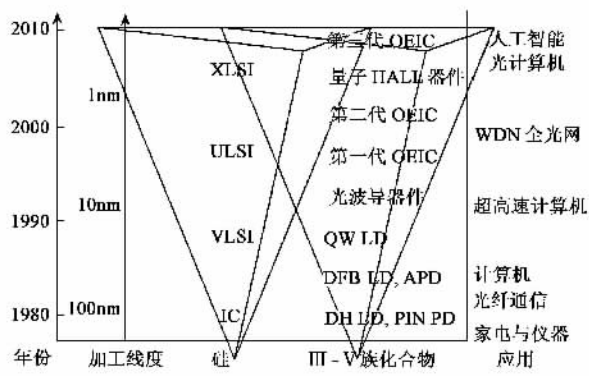


图 6 半导体光电子技术发展趋势图

(上接总目次第 VI 页)

2003 年广告总目录

(按汉语拼音字母顺序排列)

北京东方晨景科技有限公司(第 7—12 期) 北京汇德信科技有限公司(第 1—12 期) 北京卓立汉光仪器有限公司(第 1、8、10 期) 大恒新纪元科技股份有限公司(第 1—12 期) 高等教育出版社理工分社(第 5 期) 光库通讯(珠海)有限公司(第 5—12 期) 广东文博展览有限公司(第 1 期) 桂林瑞特试验机有限公司(第 5、10 期) 合肥科晶材料技术有限公司(第 2、4、6、8、10、12 期) 美国 Coherent(相干)公司北京代表处(第 1—12 期) 美国吉时利仪器公司(第 3、4、6、7、9、10 期) 上海华龙测试仪器有限公司(第 1、3、5、7、9、11 期) 山东省聊城大学物理科学与信息工程学院(第 11 期) 沈阳市科友真空技术研究所(第 1—12 期) 江西连胜实验装备有限公司(第 4—12 期)《物理》诚征 2004 年广告客户——本刊编辑部(第 10 期) 物理,您理想的广告媒介——本刊编辑部(第 6、10 期) 企业名录与产品商标(第 10 期)(正文 686—687 页之间) 新产品(彩色专页)(第 10 期)(正文 686—687 页之间)