

# 硅基光波导结构与器件

刘育梁 王启明

(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)

**A摘要** 简要评述硅基光波导的结构、工艺及其器件, 包括低损耗的硅基光波导, 电光波导器件, 红外波导探测器、氧化硅光波回路等。

**关键词** 硅, 光波导, 工艺, 器件

TN/252

## 引言

-13

硅是微电子学领域最重要的半导体材料, 其工艺技术和集成电路技术得到了高度发展, 将硅从微电子学领域拓展到光电子学领域, 发展集电子学功能和光子学功能于一体的硅基光电子器件与回路已成为一个重要的发展趋势, 吸引了越来越多的科学家和工程技术人员, 并取得了一定的进展. 其主要标志为: (1) SiGe/Si 超晶格和多孔硅的高效光发射现象的发现和研究表明了硅基材料中确定存在着可用于实际器件制作的高效发光机制; (2) 可见光范围的硅肖崩光电探测器早已投入实际应用, 可望用于  $1.3\mu\text{m}$  光通信系统的 SiGe/Si 多量子阱光波导探测器也已在实验室研究成功, 并开始了探测器阵列的研究; (3) 硅基无源光波导器件的研究卓有成效, 取得了许多实际成果. 其中最重要的, 一是 80 年代以来提出的各种结构的硅基光波导的传输损耗几乎都已降至  $1\text{dB/cm}$ , 制作这些光波导大都采用常规的微电子加工工艺, 这为进一步研制各种功能器件奠定了坚实的基础; 二是硅上二氧化硅光波导器件与回路已逐渐推向市场.

硅基光波导器件的这种发展趋势明显地反映在重要的国际光电子期刊中, 80 年代中期很少看到这方面的研究论文, 而到 90 年代初, 硅基光波导器件的研究论文在这类期刊中所占比例越来越大, 近期已发展到专集讨论的程度<sup>[1]</sup>. 目前从事硅基光波导与光电子器件研究的实验室很多, 有 3 个实验室的工作最具连贯性, 代表了现今硅基光波导器件的发展水平. 它们是: NTT 光电子实验室 (集中从事  $\text{SiO}_2$  平面光波导器件与回路的研究开发工作), AT&T Bell 实验室 (Murray Hill) (主要从事  $\text{SiO}_2$  光波导与回路、 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  波导探测器的研究) 和柏林工业大学 (TUB) (从事 SOI 光波导、Ge 扩散硅光波导、光开关和  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  波导探测器的研究工作). 本文将专门就硅基光波导及器件的发展作一简要评述.

## 1 低损耗硅基光波导结构及工艺

### 1.1 外延型光波导

本文 1994 年 12 月 9 日收到

最早提出的用于  $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$  波长范围的硅光波导是外延型光波导<sup>[2]</sup>,即采用常规的外延工艺在  $n^+$  或  $p^+$  硅单晶衬底上生长一层轻掺杂外延层,由于衬底和外延层的自由载流子浓度不同,其折射率也不同,平行于硅片表面传播的光波可以被约束在外延层中,由此而形成光波导.如果进一步采用各向异性湿法腐蚀或等离子体干法刻蚀制备成条状的脊形波导,即可实现对光波的二维限制.通常衬底掺杂浓度高于  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ ,外延层掺杂浓度为  $10^{14}\sim 10^{15}\text{cm}^{-3}$ .外延层亦即波导层厚度在  $10\mu\text{m}$  左右.这种光波导由于利用的是自由载流子效应,衬底和波导层的折射率差仅为  $10^{-4}$  左右,对光波的约束很不充分,导模场在重掺杂衬底中有一个很大的场分布,衬底吸收十分明显.一般外延型平板光波导的传输损耗是  $5\sim 13\text{dB/cm}$ ,而脊形波导则是  $15\sim 20\text{dB/cm}$ .对于研制实际器件来说,这样大的损耗显然不适用,所以人们转向研制其它结构的光波导.

最近在研究表明<sup>[3]</sup>这种光波导的传输损耗可以降至  $1.5\text{dB/cm}$  以下.其关键是采用较大的波导芯径.实验已证实,芯径为  $20\mu\text{m}(h)\times 15\mu\text{m}(w)$  的脊形光波导的传输损耗低于  $1.5\text{dB/cm}$ .由于这种光波导的制作工艺简单,可以达到实用要求.

### 1.2 SOI 光波导

SOI(Silicon on Insulator)技术是近十年来发展起来的一项硅集成电路技术.采用 SOI 结构的 CMOS 无并门锁效应,源、漏寄生电容小,易形成浅结,SOI 器件还具有抗瞬时辐射效应的能力,可以在高温环境下工作,因此被微电子工业界看好<sup>[4,5]</sup>.

对于硅基光波导器件与回路来说,非常有意义的是 SOI 结构本身正好就是平板光波导结构,因此实现 SOI 电路和 SOI 光波导器件的单片集成无疑成为一种自然的想法. SOI 光波导是在前述的外延型硅光波导的外延层和衬底之间夹入一层  $\text{SiO}_2$  而形成的.  $\text{SiO}_2$  的折射率远小于硅,它可以将其上波导层中传输的光波与衬底完全隔离开,从而消除衬底的吸收.实际上  $\text{SiO}_2$  已完全取代了衬底的光学作用,所以衬底的掺杂与否已不受波导的限制.

SOI 材料的生成技术主要有区熔再结晶技术(ZMR)、直接键合与背腐蚀技术(BE)和注入氧隔离技术(SIMOX)等.目前来看,ZMR-SOI 光波导的损耗太大,BE-SOI 光波导的顶层硅质量很好,但难以获得均匀的厚度,相对而言 SIMOX-SOI 是最佳的选择.典型的 SIMOX-SOI 的工艺过程为:在(100)单晶硅表面以  $200\text{keV}$  的能量注入  $1.8\times 10^{19}\text{cm}^{-2}$  的氧离子,注入温度控制在  $600\pm 20\text{C}$ .之后在  $\text{Ar}/\text{O}_2$  气氛中  $1300\text{C}$  退火  $6\text{h}$ .为了波导能够与光纤匹配,还需通过外延将顶层硅厚度增至  $7.5\mu\text{m}$ ,然后再刻蚀成脊形波导.这样的 SOI 脊形导的传输损耗在  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.5\mu\text{m}$  处都小于  $0.5\text{dB/cm}$ <sup>[6-9]</sup>.

SOI 光波导的一个重要问题是单模条件.因为硅与  $\text{SiO}_2$  的折射率差别非常大,所以单模平板波导的波导层仅需  $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$  厚.如果制成脊形波导,则难于和光纤耦合.不过最近的理论和实验表明<sup>[9,10]</sup>,适当条件下单模脊形波导的芯径可以达到与光纤相匹配.其根据是:这样的波导尽管在垂直于芯片表面方向上可以承载多模,但这些高阶模式在平行于芯片表面方向上并不受导.

### 1.3 氧化硅光波导

氧化硅光波导是在硅衬底上淀积  $\text{SiO}_2$  膜后再淀积掺杂的氧化硅而形成的.  $\text{SiO}_2$  掺杂后其折射率有所提高,可以形成波导,杂质主要是  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{GeO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  等.最初的工作主要以  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  波导为主,以后逐渐转向  $\text{GeO}_2$ - $\text{SiO}_2$  波导,因为后者可以达到更低的损耗.一般

可以通过 CVD 和反应离子刻蚀方法制作  $\text{SiO}_2$  波导,也可以采用火焰水解法(Flame Hydrolysis Deposition),折射率差  $\Delta$  为 0.25% 的  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  光波导的损耗小于 0.1dB/cm,  $\Delta$  为 0.75% 的这类光波导的损耗约 0.3dB/cm,而  $\Delta$  为 0.75% 的  $\text{GeO}_2$ - $\text{SiO}_2$  光波导的损耗则低达 0.04dB/cm<sup>[11,12]</sup>.

尽管  $\text{SiO}_2$  和硅的热膨胀系数相差很大,目前可以在硅上淀积厚达 50 至 100 $\mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$  而不产生裂纹<sup>[11]</sup>.硅衬底上掺杂  $\text{SiO}_2$  受到残余压缩应力,从而引起波导的双折射,双折射指数  $B$  为  $4 \times 10^{-4}$ .所以在很多功能器件制作中,利用或控制双折射成为一项主要内容.

另外一种不掺杂而形成  $\text{SiO}_2$  波导的方法是用 PECVD 在硅衬底上淀积  $\text{SiO}_2$  膜,退火后用 25keV 的电子辐照(剂量是 0.74C/cm<sup>2</sup>)改变局部折射率,这样形成的光波导的损耗可以控制在 1.5dB/cm 以内<sup>[13]</sup>.

#### 1.4 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 外延层光波导和 Ge 扩散光波导

由于 GeSi 材料系统在光电子学领域潜在的应用前景,GeSi 光波导也受到了注意.目前主要有两种方法形成这类光波导,一种是在硅衬底上用 CVD 或 Si-MBE 等生长  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ <sup>[14,15]</sup>,另一种则是将 Ge 扩散入硅片表面<sup>[16,17]</sup>.Ge 的折射率为 4.1,Si 为 3.5.Si 中引入 Ge 后,该区域的折射率增大,从而可以形成光波导.典型的  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  外延层光波导的 Ge 组分为 1.2%,厚度 6.5 $\mu\text{m}$ .为了改善模斑,在  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  层上还生长一层 3 $\mu\text{m}$  厚的 Si 层,这种 Si/ $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ /Si 脊形波导的损耗在 1.32 $\mu\text{m}$  时介于 0.5~1.6dB/cm.

Ge 扩散光波导的制备是在硅衬底上用电子束蒸发 GeSi 合金,再将其刻蚀成所需的图形后在 1200 $^\circ\text{C}$  和氧气氛中扩散 65h,扩散深度是 1.54 $\mu\text{m}$ .这种光波导的损耗在 1.3 $\mu\text{m}$  和 1.55 $\mu\text{m}$  波长时均小于 0.3dB/cm.

#### 1.5 硅 V 槽光波导

硅 V 槽一般用于光纤与波导器件的耦合.在 V 槽中填充适当的介质材料(如氧化硅、聚合物)可以形成能与光纤直接耦合的波导.V 槽中 P 掺杂  $\text{SiO}_2$  光波导在 0.633 $\mu\text{m}$  波长时损耗约 0.1dB/cm<sup>[18]</sup>.V 槽中空金属波导的损耗则不符合指数衰减规律,大体上说,对于 633、780、980 及 1310nm 的光波,在 1.5cm 长度内波导损耗介于 1~6dB/cm<sup>[19]</sup>.

#### 1.6 SiC 光波导

有人建议发展硅上的 SiC 光波导<sup>[20]</sup>,建议发展 SiC 光波导的原因是 SiC 有很强的线性电光效应,能够制作电光调制器件,并且这种波导不但能用于 1.3~1.6 $\mu\text{m}$  波长,而且可以用于 0.7 $\mu\text{m}$  波长(多孔硅器件的发光波长).在 1.3 $\mu\text{m}$  时, $\beta$ -SiC 的折射率为 2.57<sup>[21]</sup>,所以不能在硅衬底上直接形成波导,但可以采用类似于 SOI 的结构,即 SiC/ $\text{SiO}_2$ /Si 结构.这种波导的损耗主要是 SiC/ $\text{SiO}_2$  界面上的散射损耗和侧壁散射损耗(如果制成脊形波导的话),其损耗应该与 SOI 波导相当. $\beta$ -SiC 膜可以用 CVD 生长<sup>[22]</sup>, $\text{SiO}_2$  层采用氧离子注入和高温退火形成,条状脊形结构可用 H 型 RF 反应离子刻蚀形成.

## 2 硅基电光波导器件

电光调制器与波导光开关等控光器件是硅基光电子集成电路的重要器件.然而单晶硅不存在线性电光效应,二阶电光效应也很弱,能以用于实际器件.Franz-kelbysh 效应也不足

以有效地影响折射率。目前自由载流子效应<sup>[24]</sup>和热光效应<sup>[25]</sup>均可用于研制调制器和电光开关,利用这两种效应的 Mach-Zehnder 干涉仪和光交换开关均有一定的工作,如外延型 M-Z 干涉仪、SOI M-Z 干涉仪、GeSi M-Z 干涉仪、GeSi BOA 光开关、外延型 TIR 光开关等<sup>[26~36]</sup>。不过研制的器件均尚未达到实用水平。就自由载流子效应器件来说,它需要较高的载流子注入浓度(至少  $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ),伴生的热效应不易避免,热光效应将抵消自由载流子效应,而利用热光效应的器件需要至少 50mW 的热功率,响应速度也很慢。相对而言,自然载流子效应器件更有可能达到实用。如果恰当地设计器件的结构,提高注入载流子的利用率,将伴生热功耗降至 10mW 以内,就可以避免热效应的影响。最近有人提出一种优化设计的 SOI M-Z 干涉仪,在  $1.55 \mu\text{m}$  处,预计工作电压 0.9V,注入载流子密度  $2.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,工作电流 4mA(电流密度  $120 \text{A}/\text{cm}^2$ ),响应时间 100ns<sup>[37]</sup>。

从晶格结构上来说,硅单晶中不存在线性电光效应的原因是其晶胞是中心对称的,而应变的 SiGe/Si 超晶格中, $\text{Si}_{0.4}\text{Ge}_{0.6}$ 晶胞不是中心对称的。理论计算得到其 Pockels 系数为  $1 \times 10^{-12} \text{m}/\text{V}$ ,与 GaAs 的电光系数同等量级,因此可望制作性能与 GaAs 器件相当的 GeSi/Si 超晶格电光调制器和光开关。

晶体  $\beta$ -SiC 则显示很强的线性电光效应,它的 Pockels 系数是 GaAs 的 1.7 倍<sup>[38]</sup>,也可以制作高速电光效应器件。

### 3 1.3 $\mu\text{m}$ Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si 多量子阱波导探测器

这方面工作在“SiGe/Si 应变超晶格光电探测器的发展现状”一文<sup>[39]</sup>中有详细评述<sup>[40~45]</sup>,最近的发展包括<sup>[46~48]</sup>:(1)将 GeSi 波导与 GeSi/Si 多量子阱 PIN 波导探测器集成,由于共度生长要求的临界厚度的限制,GeSi/Si 波导探测器的波导厚度小于  $1 \mu\text{m}$ 。这种器件尽管内量子效率可达 50%以上,但与光纤相接,外量子效率仅百分之几,因此出现了将 GeSi 波导与 GeSi/Si 探测器相集成的工作。即先在硅衬底上生长  $2.5 \mu\text{m}$  厚的  $\text{Ge}_{0.02}\text{Si}_{0.98}$  光波导,再在上面制作  $\text{Ge}_{0.45}\text{Si}_{0.55}/\text{Si}$  多量子阱波导探测器。GeSi 波导与光纤相连接,可以提高耦合效率,这种结构属于波导与探测器的垂直耦合,需要相当的耦合长度(约 10mm),这会大大降低器件响应速度。有一种措施可以改善这种情况,即采用类似于 III-V 族波导探测器中的阻抗匹配垂直耦合(VIM)<sup>[49]</sup>。(2)PIN 型 GeSi/Si 多量子阱波导探测器在波长  $1.3 \mu\text{m}$  时,外量子效率可达 7%(14V 反偏),暗电流密度  $27 \text{pA}/\mu\text{m}^2$ (面积  $10 \times 750 \mu\text{m}^2$ ),总电容 1pF。这样的探测器与硅双极放大器混合集成(反馈电阻  $2 \text{k}\Omega$ )后,响应度达到  $2.57 \text{A}/\text{W}$ 。

### 4 无源氧化硅光波导器件与回路

硅衬底上的氧化硅光波导器件已从单纯的低损耗研究转向实用功能器件的研究,并逐渐推向市场<sup>[50]</sup>。目前在矩阵光开关(利用热效应)、偏振模转换器、偏振分离器与交换开关、波分复用器件、与偏振无关的 MZ 干涉仪、星形耦合器、环形谐振器以及掺铒有源光波导等方面均开展了许多工作<sup>[51~62]</sup>。这些器件主要利用:波导结构变化所引起的模式的分离与组合,波导双折射特性的利用、控制与消除,热光效应改变波导局部折射率等工作机制。近期的

工作除了继续开发和改进各种功能器之外,也注重于提高集成度。

限制氧化硅平面波集成回路集成度的主要因素是波导的最小弯曲半径太大。因为弯曲总会带来损耗,弯曲半径越小损耗越大。对于允许的损耗,弯曲半径有一个最小限度。现在通常用低折射率差(0.25%~0.75%)掺 GeO<sub>2</sub> 氧化硅光波导构成各种功能器件。这种低折射率差的 GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 光波导的损耗虽然很小,但波导的最小弯曲半径限制在 25~5mm。最近日本 NTT 研制成功了折射率差为 1.5% 的 GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 光波导<sup>[63]</sup>,具有最小弯曲半径 2mm、长 200cm 的这种光波回路的损耗仅 0.073dB/cm。采用这种波导可以提高集成度。这种折射率差 1.5% 的波导的模式与单模光纤不匹配,但可以通过热扩展波导芯技术实现波导与器件的高效耦合<sup>[64]</sup>。

## 5 其它工作

还有许多其它的相关工作,例如:硅基集成光学传感器(如水听器)<sup>[65]</sup>、在掺 Ge 氧化硅薄膜中用 UV 激光直接写入沟道波导<sup>[66]</sup>、掺 Ge 氧化硅波导中的二次谐波效应<sup>[67,68]</sup>、集成氧化硅波导的光盘读出头<sup>[69]</sup>、光纤直接楔入氧化硅光波回路芯片的耦合技术<sup>[70,71]</sup>、GeSi/Si Bragg 反射镜与光探测器<sup>[72-74]</sup>、GeSi/Si Bragg 反射器与热光开关<sup>[75]</sup>、利用热效应的 Si-SEED 与光学双稳<sup>[76-77]</sup>、PtSi/p-Si肖特基势垒 1.52μm 光电探测器<sup>[78]</sup>、GeSi/Si 红外焦平面<sup>[79,80]</sup>、硅基光电器件混合集成技术<sup>[81-83]</sup>等。

## 6 结语

如果不考虑光源,硅基光波导器件大致可分为无源光波导功能器件、电光波导器件和光波导探测器。总的来看,在无源光波导功能器件方面,SiO<sub>2</sub> 光波导器件与回路已独领风骚,成为这一类器件的主流,不但其它种类的硅基光波导器件难与相比,就是 LiNbO<sub>3</sub> 器件也渐显逊色。电光波导器件目前的工作主要利用自由载流子效应和热光效应,这两种效应在制作电光波导器件方面均有一定的缺点,难以发展高性能的器件。未来高性能的硅基光开关(阵列)和调制器恐怕还得依赖线性电光效应,尽管单晶硅不存在线性电光效应,W 族合金半导体如 β-SiC、GeC、SnC、SiGe、SiSn 和 GeSn 都有很强的线性电光效应<sup>[34]</sup>。这类器件可以向硅衬底上的 W 族二元、三元合金半导体材料发展。而能够用于 1.3μm 波长的硅基红外光探测器目前仍寄希望于 Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si 多量子阱波导探测器。若要保证一定的外量子效率(如 10%),则带宽超过 5GHz 是困难的,因为这种探测器中 Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub> 仍是间接带隙材料,它对红外光的吸收很弱,这一点大大制约了器件性能的提高。

## 参考文献

- 1 Special issue, *Silica on silicon integrated optics*, *International J. Optoelectronics*, 1994, 9(2)
- 2 Soref R A, Lorenzo J P. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, 22(6):873~879
- 3 Splett A, Petermann K. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, 6(3):425~427
- 4 Collinge J P. *Silicon-on-Insulator technology; materials to VLSI*, Kluwer Academic Pub., 1991
- 5 Wayne E. Bailey. *Proceedings of the 5th international symposium on Silicon-on-Insulator technology and*

- devices, Proceeding 1992, 92:13
- 6 Weiss B L, Reed G T, Ktoh S, et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, 3(1):19~21
  - 7 Soref R A, Cortesi E, Namavar F, et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, 3(1):22~24
  - 8 Rickman A, Reed G T, Weiss B L, et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, 4(6):633~635
  - 9 Schmidchen J, Splett A, Schüppert B, et al. *Electron. Lett.*, 1991, 27(16):1486~1488
  - 10 Soref R A, Schmidchen J, Petermann K. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, 27(8):1971~1974
  - 11 Kawachi M. *Optical and Quantum Electronics*, 1990, 22:391~416
  - 12 Adar R, Serbin M R, Mizrahi V. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(8):1369~1372
  - 13 Syms R R A, Tate T J, Grant M F. *Electron. Lett.*, 1994, 30(18):1480~1481
  - 14 Pesarcik S F, Treyz G V, Jyer S S, et al. *Electron. Lett.*, 1992, 28(2):159~160
  - 15 Splett A, Schmidchen J, Schüppert B, et al. *Electron. Lett.*, 1990, 26(14):1035~1037
  - 16 Schmidchen J, Schüppert B, Petermann K. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(5):842~848
  - 17 Schüppert B, Schmidchen J, Petermann K. *Electron Lett.*, 1989, 25(22):1500~1502
  - 18 Narendra R, McMullin J N. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 5(1):43~46
  - 19 McMullin J N, Narendra R, James C R. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 5(9):1080~1082
  - 20 Liu Y M, Prucnal P R. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 1(6):704~707
  - 21 Ivanov P A, Chelnokov V E. *Semicond. Sci. Technol.*, 1992, 7:863~880
  - 22 Chiew S P, McBride G, Armstrong B M, et al. *Microelectronic Engineering*, 1994, 25:177~182
  - 23 Tang X, Wongchotigul K, Spencer M G. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 58(8):917~918
  - 24 Soref R A, Bennet B R. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, 23(1):123~129
  - 25 Nazarova N A, Romanova G I, Yas K A D. *Sov. J. Opt. Technol.*, 1988, 55:220~224
  - 26 Fischer U, Zinke T, Schüppert B, et al. *Electron. Lett.*, 1994, 30(5):406~408
  - 27 Lorenzo J P, Soref R A. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(1):6~8
  - 28 Fischer U, Schüppert B, Petermann K. *Integrated Photonics Research, Technical Digest*, 1994, 370~72
  - 29 Fischer U, Schüppert B, Petermann K. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, 5(7):785~787
  - 30 Treyz G V, May P G, Halbout Jean-Marc. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 59(7):771~773
  - 31 Treyz G V. *Electron. Lett.*, 1991, 27(2):118~120
  - 32 Liu E, Liu Y, Zhang S, et al. *Photonics' 92: The 2nd IEEE international Workshop on photonics networks, components, and applications*, Canada, 1992
  - 33 Liu Y L, et al. *Electron. Lett.*, 1994, 30(2):130~131
  - 34 Liu Y, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(16):2079~2080
  - 35 Giguere S T, Friedman L, Soref R A, et al. *J. Appl. Phys.*, 1990, 68(10):4964~4970
  - 36 Soref R A, Friedman L. *International J. Optoelectronics*, 1994, 9(2):205~210
  - 37 Tang C K, Reed G T, Walton A J, et al. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(8):1394~1400
  - 38 Tang X, Irvine K G, Zhang D, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 59(16):1938~1939
  - 39 国家科委信息领域办, 863 光电子主题专家组. **硅锗应变层超晶格材料与器件应用**, 1992
  - 40 Luryi S, Pearsall T P, Temkin H, et al. *IEEE Electron Device Letters*, 1986, 7(2):104~107
  - 41 Pearsall T P, Temkin H, Bean J C, et al. *IEEE Electron Device Letters*, 1994, 7(5):330~332
  - 42 Temkin H, Pearsall T P, Bean J C, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 48(15):963~965
  - 43 Kesan V P, May P G, Bassous E, et al. *IEEE IEDM90*, 1990, 637~640
  - 44 Temkin H, Antreasyan A, Olsson N A, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 49(13):809~811
  - 45 Jalali B, Naval L J, Levi A F, et al. *SPIE*, 1992, 1804:94~106
  - 46 Jalali B, Levi A F, Ross F, et al. *Electron. Lett.*, 1992, 28(3):269~271
  - 47 Splett A, Zinke T, Petermann K, et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, 6(1):59~61
  - 48 Jalali B, Naval L J, Levi A F. *J. Lightwave Technology*, 1994, 12(6):830~935
  - 49 Deri R J. *J. Lightwave Technol.*, 1993, 11(8):1296~1313
  - 50 *Advertisement for silica optical waveguide devices, Laser Focus World*, August, 1994
  - 51 Okuno M, Kato K, Ohmori Y, et al. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(9):1597~1606

- 52 de Ridder R M, Sander A F M, Drissen A, *et al.* *J. Lightwave Technol.* 1993, 11(11):1806~1811
- 53 Inoue Y, Ohmori Y, Kawachi M, *et al.* *IEEE Photon. Technol. Lett.* ,1994, 6(5):626~628
- 54 Okuno M, Sugita A, Jinguji K, *et al.* *J. Lightwave Technol.* ,1994, 12(4):625~633
- 55 Adar R, Henry C H, Dragone C, *et al.* *J. Lightwave Technol.* ,1993, 11(2):212~219
- 56 Takahashi H, Suzuki S, Nishi I. *J. Lightwave Technol.* ,1994, 12(6):989~995
- 57 Suzuki S, Inoue Y, Ohmori Y. *Electron. Lett.* ,1994, 30(8):642~643
- 58 Yaffe H H, Henry C H, Kazarinov R F. *et al.* *J. Lightwave Technol.* ,1994, 12(1):64~67
- 59 Suzuki S, Shuto K, Hibino Y. *IEEE Photon. Technol. Lett.* ,1992, 4(11):1256~1258
- 60 Yaffe H H, Henry C H, Serbin M R, *et al.* *J. Lightwave Technol.* ,1994, 12(6):1010~1014
- 61 Hattori K, Kitagawa T, Oguma M, *et al.* *Electron. Lett.* ,1994, 30(11):856~857
- 62 Hibino Y, Hanawa F, Nakagome H, *et al.* *Electron. Lett.* ,1994, 30(8):640~642
- 63 Suzuki S, Yanagisawa M, Hibino Y, *et al.* *J. Lightwave Technol.* ,1994, 12(5):790~796
- 64 Yanagisawa M, Yamada Y, Kobayashi M. *IEEE Photon. Technol. Lett.* ,1993, 4(4):433~435
- 65 Vadekar A, Nathan A, Huang W P. *J. Lightwave Technol.* ,1994, 12(1):157~162
- 66 Svalgaard M, Poulsen C V, Bjarklev A, *et al.* *Electron. Lett.* ,1994, 30(17):1401~1403
- 67 Weitzman P S, Kester J J, Osterberg U. *Electron. Lett.* ,1994, 30(9):697~698
- 68 Brauer M L, Dajani I, Kester J J. *Electron. Lett.* ,1994, 30(4):297~299
- 69 Ochiai M, Temkin H, Kazarinov R F. *Electron. Lett.* ,1994, 30(17):1403~1404
- 70 Grand G, Denis H, Volette S. *Electron. Lett.* ,1991, 27(1):16~18
- 71 *Electron. Lett.* ,1994, 30(22).
- 72 Kuchibhotla R, Campbell C, Bean J C, *et al.* *Appl. Phys. Lett.* ,1993, 62(18):2215~2217
- 73 Bean J C, Peticolas L J, Hull R, *et al.* *Appl. Phys. Lett.* ,1993, 63(4):444~446
- 74 Murtaza S S, Campbell J C, Bean J C, *et al.* *Appl. Phys. Lett.* ,1994, 64(7):795~797
- 75 Fernando C, Janz S, Baribeau J M, *et al.* *Electron. Lett.* ,1994, 30(11):901~903
- 76 Cocorullo G, Rennina L. *Electron. Lett.* ,1992, 28(1):83~95
- 77 Feng S T, Irene E A. *Appl. Phys.* ,1992, 72(9):3897~3903
- 78 李国正, 李道全, 刘恩科. *半导体光电*, 1994, 15(3):273~276
- 79 Tsaur B Y, Chen C K, Marino S A. *Engineering*, 1994, 33(1):72~78
- 80 Lin T L, Park J S, Gunapala S D, *et al.* *Optical Engineering*, 1994, 33(3):716~720
- 81 Zhou M J, Holleman J, Wallinga H. *Electron. Lett.* ,1994, 30(11):895~897
- 82 Crookes C G, Croston I R, Pescod C R. *Electron. Lett.* ,1994, 30(12):1002~1003
- 83 Ayliffe P, Parker J, Bertolini S, *et al.* *International J. Optoelectronics*, 1994, 9(2):179~191
- 84 Soref R A. *Appl. Phys.* ,1992, 72(2):626~630

## SI-BASED OPTICAL WAVEGUIDE STRUCTURES AND DEVICES

Liu Yuliang Wang Qiming

(NIOE Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** This paper presents a concise review of the silicon-based optical waveguides, devices and technology. The low-loss waveguides, electro-optic waveguide devices, waveguide photodetectors for infrared radiation detection, and SiO<sub>2</sub> optical circuits are included.

**Key words** silicon, optical waveguide.