

·成果简介·

“九五”基金重大项目“半导体光子集成基础研究” 成果介绍

何 杰 秦玉文 傅便翔 韦 玮

(国家自然科学基金委员会信息科学部,北京 100085)

[关键词] 半导体,光子集成,重大项目,成果

国家自然科学基金“九五”重大项目“半导体光子集成基础研究”已通过验收,顺利结题。该项目由中国科学院半导体研究所、清华大学、吉林大学、中国科学院物理研究所等单位联合承担,负责人为王启明院士。以简水生院士为首、由8位科学家组成的验收专家组在最终的验收意见中一致认为该项目已高质量全面完成了预期任务,创新特色突出,对我国光子学基础和应用领域的发展作出了重要的贡献。

1 背景情况

21世纪人类将迈进高度信息化社会,信息的传输、处理和存储将要求空前的规模和速度,达到太(一万亿)比特(Tb/s)量级。但是以电子流作为载体来传递信息,由于受到不可克服的回路延迟的“瓶颈效应”和电磁波带宽的限制,无论在荷载信息的容量或是在信息处理速率方面都难以满足“Tb”量级的要求。光子(或光波)替代电子(或电流)作为信息的载体,由于它不具荷电性,没有回路延迟的瓶颈效应,系统的响应时间可达皮(1/太)秒,同时由于它不存在电磁串扰,所以有很高的安全保密性。光波的本征带宽高达200THz,即使只采用波分复用(WDM)的PCM传输技术也能达到10Tb/s以上荷载容量,成为当今超大容量光通信和光网络发展的基础。

光子学技术与科学的迅速发展就是在这样的时代需求下应运而生的,它将作为支撑现代信息高科技产业的另一强大支柱。光子学的研究内涵包括以光子为载体对信息的载入、传输、交换、处理、存储再现与读出等诸多功能运作。光子学系统就是建立在对上述诸多功能有综合体现的光子集成芯片基础上

的。“集成”化是半导体光子学发展的必然趋向。根据系统功能的要求,把不同功能的若干或众多光子器件通过内部光波导互连,优化兼容地集成在一个芯片上,以突破分立器件组合的局限性,无论在提高芯片的运作功能水平和可靠性、稳定性,还是降低系统造价成本等方面都是绝对需要的。

一个集成光子回路(PIC)芯片中可能包含有尺寸差异很大的各种功能的光子器件,如激光源器件、光探测器、调制器、偏振控制器、光开关、光放大器、滤波器、耦合器、复用/解复用器等,它们的功能来源于不同的材料物理效应的应用与器件结构优化设计和运作模式。因此该项目选择光子集成基质材料特性研究和人工改性、器件结构优化设计、集成回路中光子器件的兼容制作与功能体现等为立足点展开研究,具有重要的基础性意义,对光子学集成芯片的发展是一项有预见性和超前性的基础研究工作。

该项目围绕光子集成的基质材料与物理效应、器件结构与器件物理、以及光子集成的基础技术研究,共设置6个课题,具体研究内容为:半导体介质布拉格(Bragg)光栅的功能研究及应用、微光学谐振腔的光物理研究及其应用、量子阱结构中光折变效应增强途径及其在垂直场驱动下光记忆与开关效应的器件应用、量子阱结构中室温激子效应的增强及其器件应用、InP基能带工程的研究与器件应用、Si基能带工程研究与器件应用。

2 主要研究成果

2.1 重要的原创性理论成就

运用能带工程实施天然材料介观改性是该项目

本文于2002年1月22日收到。

中基础性研究的重要方面。Si 为间接带隙材料,发光效率比直接带隙的化合物半导体小 5 个量级。Si 又为非极性立方对称结构,三阶非线性光学效应和电光系数几乎为零,不适于研制高效发光器件(包括激光器)和高速电光开关。如何突破这些限制 Si 基光子学发展的巨大障碍,是国际上未曾解决而有待突破的重大科学问题。该项目对此予以很大关注,从基础理论上部署研究并取得了有重要意义的原创性理论成果。

(1)从量子力学第一性原理出发,采用密度泛函理论框架处理非均匀相互作用的多粒子体系,计算了 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{C}_y$ 的能带结构,预示了 SiGeC 合金中带隙随 C 含量的增加呈现非单调压缩效应及其带边的能量移动行为,理论上首次指出, SiGe/Si 异质界面的导带偏移可由 C 的掺入从零值以 50 meV/[C]% 斜率增加,因而对 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}/\text{Si}$ 的导带偏移 CBO 只需掺入 1% 的 C 即可获得与价带相同的值, $\text{VBO} = \text{CBO} = 50$ meV,从而对提高 SiGe/Si 量子阱的局域化强度和优化量子阱光电子器件特性有重要的指导意义。

(2)从量子力学第一性原理出发,采用紧束缚 Hamiltonian 矩阵元方法,并在理论计算中运用虚晶近似,研究了不同结构和层厚的 SiGe/Si 非对称超晶格 SL1 和 SL2 中的界面光跃迁特性及其对偏振光吸收的各向异性。

$$\text{SL1: (Si) } 80 / (\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}) 20 / (\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}) 8$$

$$\text{SL2: (Si) } 32 / (\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}) 8 / (\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}) 72$$

理论计算了电场扰动下的反映电-光 Pockel 效应的三阶光学非线性系数 r_{13} 和 r_{63} 。理论指出在人工介观改性的非对称 SiGe/Si 超晶格 SL1, SL2 中 r_{13} 均可从零值增强到 10^{-9} cm/V 的量级,比体 GaAs 材料还大约一个量级,从而指出了 Si 基电-光效应人工增强和高速光开关研究的重要方向。

(3)尝试从微观上突破 Si、Ge 共价键属性反演对称结构的固有限制,探索直接带结构 Si 基新材料,从量子力学第一性原理出发,采用混合基从头赝势法对 O/Sim 超晶格能带结构进行理论计算,首次发现在这种超晶格的能带结构中,出现直接带隙,从而更合理地解释了 C-Si/O 超晶格的强发光机制,首次在理论上提出了探索直接带隙 Si 基新材料的设计思想和材料结构新模型。提出进一步提高 Γ 点或降低 X 点的价带能量是一个重要努力方向。理论研究得出 Se/Si₁₀/Se/Si₁₀/Se 超晶格由于 Se 原子比 O 大,芯态效应能够使 X 点的价带能量有更显著

的降低。因而 C-Si/Se 以及 (Se, O)、(Se, S) 在 Si 中的交叉插层微结构材料将会是一种比 C-Si/O 更理想的直接带隙人工改性新材料,有望在这种材料实现电注入 Si 基激光发射。

2.2 光子集成原型器件

通过系统深入地研究光子集成基础科学问题和突破关键工艺技术,创新优化集成器件结构,研制成功了多种有重要应用前景的光子集成原型器件。

(1)利用增益耦合机制的单频激光和抗反射光扰动,低啁啾特性,首次研制成功 InGaAsP/InP 多量子阱复折射率耦合 DFB 激光器与 QCSE EA 电光调制器单片集成的高速响应单频集成光源,中心波长为 $1.55\mu\text{m}$, 3dB 响应频率高达 12GHz。采用偏斜谐振腔技术,研制成功符合 ITU-T 标准 4 波长 $4 \times 2.5\text{Gb/s}$ 的集成器件。实用化封装的 2.5Gb/s 集成光源已用于大容量干线光通信实验系统,经 240km 传输,误码率在 10^{-9} 以下,功率代价 < 0.5 dB。

(2)利用压应变场对 SiGe/Si 量子阱材料的带隙压缩和 SIMOX 衬底及 Bonding 技术制作的 SiO_2/Si Bragg 反射器,首次成功地研制出中心波长为 $1.3\mu\text{m}$, 响应谱宽 6nm 的共振腔增强型 RCE-PD Si 基长波长窄带探测器,量子效率达 4.3%,暗电流低达 10 pA/ μm^2 ,量子效率比国外发表的普通型 PD 高 3—4 倍,由于采用更低 Ge 组份,因而暗电流小一个多量级。

(3)成功研制出 1×16 AlGaAs/GaAs 量子阱微腔 VCSEL 集成面阵,并完成了与 CMOS 电路的智能像素封装模块,进行了 622 Mb/s 模拟传输实验,可在光网络终端和光互连系统中得到应用。

(4)研制成功 64×64 的 InGaAs/GaAs SEED 逻辑光开关集成面阵,并完成了与 CMOS 电路和智能像素封装模块,可在光信息处理系统中得到应用。

(5)在提高 AlGaAs/GaAs 多量子阱材料光折变效应的基础上,首次研制成功衍射效率高达 6.5% 的垂直场驱动、光折变原型器件;电调制频率高达 10 MHz 的原型器件;分辨率为 $2.46\mu\text{m}$,进行了二维图像的传输实验,每秒可传输 10^7 幅二维图像。可在光存储、并行光逻辑运算等系统中得到应用。

(6)首次研究成功一种双曲锥形 SOI Si 基多模干涉器(MMI)。 2×2 和 4×4 MMI 输出不均匀性分别为 0.8 dB 和 0.36 dB,并在此基础上研制成功 2×2 MMI M-Z 光开关原型器件,开关时间首次达到 30 μs ,功耗 0.57 W,交叉输出端消光比为 -13.1 dB。

(7)首次提出并研制成功一种高出光效应的新型 InGaAsP 和 InGaN 发光二极管。在充分研究微盘

光学腔的基础上,提出由微盘和一系列同心圆环组成的电注入LED结构,圆盘保持了LED的高Q值发射模式,同心环光子晶体则利于将内部的光在一定立体角内有效地发射出来,从而有效地提高了发光效率,最高可达20倍,为研制高亮度LED提供了一条新途径。

2.3 基础性工艺的突破与新一代光电子材料的开拓

(1)UHV-CVD超高真空SiGe/Si量子阱生长系统建设及II型能带结构自组装量子点的生长。超高真空CVD是生长优质SiGe/Si异质材料的首选技术。在总结前人技术的基础上,课题组自行设计国内加工,创建了自己的UHV-CVD生长系统。其主要创新点是:采用差分式RHEED结构解决了在较大分压下RHEED的可靠稳定工作,从而能够在生长SiGe/Si材料过程中实施原位监控。采用衬底的倒悬安置避免了旁生颗粒的吸附,采用冷壁的气流混合室减少旁生效应以及特殊的喷嘴以保证气流的均匀性,使自制设备能够持续稳定地生长出优质SiGe/Si量子阱材料。利用该设备生长的量子阱材料界面陡直,发光特性优异,掺杂可控。由此研制的SiGe/Si RCE-PD和SiGe/Si HBT器件已得到国际水平的好结果。课题组立足于该生长系统摸索了一套优化生长工艺。运用渐变缓冲层在Si衬底上生长出穿透位错密度为 $3 \times 10^5/\text{cm}$,应变弛豫量高达95%的国际最好水平的 $\text{Si}_{0.77}\text{Ge}_{0.23}$ 材料,并在此基础上生长了II型带结构SiGe/Si多量子阱材料,观察到II型量子阱中由于电子局域化程度的提高,对发光强度和温度不敏感性的贡献。采用单原子层生长技术在Si[001]衬底上生长了 $10 \times \text{Ge}(5.8 \text{ ML})/\text{Si}(35\text{nm})$ 多量子阱结构。首次发现,由于Ge原子互扩散和偏析迁移效应的作用,导致了自组装二维Ge岛阵列的生成。在量子尺寸的二维Ge岛样品中,250℃下观察到来自Ge量子点中的强光发射。实验证实这些Ge/Si量子点具有II型带结构。这是国际上的首次发现,为Si基纳米发光器件和量子器件的创新研究奠定了重要的基础。

(2)低能纯正N源MBE生长。InGaAs/GaAs有良好的晶格匹配,少量N原子在InGaAs中的掺入,可使InGaAs的带隙缩小,使导带偏移量提高,3%N的掺入可以使带隙红移到1.6μm波长,又有很强的高温激子特性,因而是新一代的耐温特性优异的长波长光电子材料。低损伤、高浓度的N的掺入是高质量材料生长的关键。课题组在原有的MBE生长

设备上,自主创新地设计采用了低能量的直流高效等离子N源,同时创新设计安置了直流偏转磁场。通过磁偏转效应,使N束源中的离子成份被排除,获得光学质量优异的全波段InGaAs/GaAs量子阱材料。在此基础上,研制成功激射波长为1.28μm能在室温下脉冲工作的激光器,特征温度高达115K,显著优于常用的InGaAsP/InP激光器。利用InGaAs/GaAs的晶格匹配特性,生长了以多层AlGaAs/GaAs DBR为衬底的InGaAs/GaAs量子阱,首次研制成功InGaAs/GaAs 1.3μm峰值响应共振增强型RCE-PD窄带响应光电探测器。量子效率达50%,而谱带响应半宽为5nm,为长波长垂直直腔面发射激光器(VCSEL)的开拓奠定了重要的基础。

(3)全固态含P化合物MBE生长系统的建设,和长波段InAsP/InGaAsP大失配度应变量子阱材料的生长。MBE生长技术是实现原位监控化合物半导体材料原子层生长的首选技术,但由于P有很高的蒸汽压,又易燃易爆,因此一般的MBE系统中无法采用普通的P源。含P的量子阱材料如InGaAsP/InP MQW均采用MOCVD生长,而MOCVD又难以实现原位监控,不利于实现大失配度应变层量子阱的生长。而大失配度应变量子阱的研究却是当前提高光电子器件特性的热点课题。课题组在国产IV型MBE系统上,通过自行设计改装和购进三温区固态P源炉,建成了以国产MBE设备为主体的全固态P源MBE系统。在充分研究 As_2 、 As_4 和 P_2 、 P_4 生长动力学的基础上,成功地生长了1.55μm波长的InAsP/InGaAsP大失配度应变量子阱,获得优质的材料,并首次研制成功了1.55μm波段室温脉冲工作的InAsP/InGaAsP应变多量子阱激光器,阈值电流密度低达1.4kA/cm²。本生长技术的建立为新一代大失配度长波长光电子材料与器件的开拓研究奠定了重要的基础。

2.4 成果在论文及专利等方面的体现

该项目共完成研究论文293篇,其中126篇发表在国外刊物,SCI收录论文103篇,EI收录113篇,发表在影响因子3以上论文21篇,出版著作一部,译著一部,参与主编的著作一部。国际会议报告53篇,其中大会邀请报告14篇;国内会议报告65篇,其中大会邀请报告8篇。已获准和申请的专利13项。

在该项目开展的4年中,培养了一批优秀的年青专业科技人才,其中有博士后6名,博士研究生24名,硕士研究生20名。他们已成为我国光电子

集成领域的新生力量,一批承担任务的青年科技人员也随着项目的开展迅速成长起来,成为本单位的研究骨干并在国际学术界产生了重要的影响。

3 新进展及发展趋势

该项目如期全面、超额地完成了预期目标的任务要求,取得了丰硕的创新成果,尤其是若干重要的原创性理论成果和新技术的关键性突破,为半导体集成光子学的自主创新、持续发展奠定了重要的基础。

该项目的立项开展,跨越了20到21世纪(1998.4—2002.4)的过渡年代,这也是信息化社会蓬勃发展的时期。国内外在光子集成,尤其是半导体光子集成研究方面发展迅速,应用普遍,取得了一系列突破性重要进展。光纤通信网络已成为信息化时代的重大基础,国家信息基础设施的关键。而光子集成器件与芯片则无可置疑地成为光网络发展的基础。该项目虽然侧重光子集成的基础性研究,但在器件应用目标方面则明确地瞄准了光网络与光信息处理系统的长远需求,有明显的前瞻性。因此,光子集成的研究与应用已为后来设置的“973”计划和“S-863”计划所接受并进一步明确了系统应用的具体目标,从而充分体现该项目基础研究的活力与价值。扎实的基础研究成果的积累无疑将为今后光子集成应用研究的创新发展奠定雄厚的基础。这是该项目的一条重要经验。2000年国家科技部批准启动了以集成光电子学国家重点联合实验室为主体承担的“支撑高速、大容量信息网络的光子集成基础研究”的重大基础研究发展规划项目,2001年国家

自然科学基金重大研究计划“网络与信息安全”中设置了“光网络节点功能研究”的重点课题,从而在本项目的研究积累基础上,进一步明确选定了光子集成的重点应用目标,并较大幅度地提高了研究经费的投入强度,使该项目的基础研究成果得以深化和拓展。

光子集成的研究无论从基础内涵的深化和应用领域的开拓,尚处于青春活跃期。今后基础性研究内涵的发展,一是充分运用掌握的诸多物理效应,创新发展满足系统功能需求的集成光子器件与芯片,取得自己的知识产权,自主发展我国的光子集成技术及其在诸多关键领域中的开拓应用;二是开拓兼容功能更为优异的新一代光子集成器件材料研究,包括GaN基四元系材料,ZnO基宽带隙材料,有机聚合物新材料以及Si基人工改性新材料,以期获得一些重要的物理效应的新应用,例如室温强激子效应和强非线性光学效应的研究与应用,尤其关注光子集成信息处理功能芯片的应用研究;三是光子技术与微电子技术兼容集成研究,发展微光电子集成系统芯片(SOC),光子集成与微电子集成是未来信息高科技系统的二大并行关键支柱,在未来的三“T”信息系统中(Tb/s的传输,TB位元的存储,和1/T秒的交换、处理速率),光子集成担负了微电子所起不到的重要角色,但在一个完整的信息功能芯片中,光子集成离不开电子技术的支撑与协同,尤其在信息处理功能芯片中,光子集成与微电子集成将共融一体,因此Si基光电子集成将是首选的研究目标。

(本文大部分资料源自国家自然科学基金重大项目“半导体光子集成基础研究”工作总结报告。)

AN INTRODUCTION OF THE ACHIEVEMENTS OF “FOUDAMENTAL RESEARCH ON SEMICONDUCTOR INTEGRETED PHONTONICS” ——Major Project of National Natural Science Foundation of China

He Jie Qin Yuwen Fu Bianxiang Wei Wei
(Department of Information Sciences, NSFC, Beijing 100085)

Key words semiconductors, integreted phontonics, major project, achievement