中国科学:信息科学 2016年 第46卷 第8期:1156-1174

SCIENTIA SINICA Informationis

信息科学与技术若干前沿问题评述专刊

# 光电子器件与集成技术

祝宁华1\*,李明1,郝跃2

① 中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室,北京 100083
 ② 西安电子科技大学微电子学院,西安 710126
 \* 通信作者. E-mail: nhzhu@semi.ac.cn

收稿日期: 2016-03-23; 接受日期: 2016-05-26; 网络出版日期: 2016-08-05 国家自然科学基金 (批准号: 61321063, 61090390, 61522509, 61535012) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA010303, 2015AA017102) 资助项目

**摘要** 光电子器件与集成技术具有低功耗、高速率、高可靠、小体积等突出优势,是突破信息网络 所面临的速率带宽、能耗体积、智能化与可重构等方面瓶颈的核心关键技术.本文围绕光电子器件 与集成技术,综述了近年来光通信及信息处理功能集成芯片技术、超高分辨成像及显示芯片技术和 宽禁带光电子器件技术的研究现状、重要进展以及我国已具备的基础和条件,分析并提出了在未来 5年主要的研究方向和内容等相关建议.

关键词 光电子器件 光子集成 宽禁带半导体 硅基光子学 混合集成技术

#### 1 引言

光电子技术作为国家信息产业的基础技术之一,涉及通信网络、新能源、医疗健康、先进制造、测量、信息存储显示以及国防等多个领域应用,如图 1 所示.光电子器件是现代信息基础设施 (整机、系统和网络)和各种新型应用的核心,其技术水平和产业能力已经成为衡量一个国家综合实力和国际竞争力的重要标志.光电子器件与集成技术一直是半导体科学的重要研究方向之一.目前,光电子器件总体处于"单个晶体管"时代,信息系统的能耗和容量问题仍然没有得到有效的解决.光电子器件正在面临一次里程碑式的技术变革,必须发展与微电子集成电路类似的光电子器件与集成技术.如图 2 所示,光电子器件与集成技术具有低功耗、高速率、高可靠、小体积等突出优势,这些优势是突破信息网络所面临的速率带宽、能耗体积、智能化与可重构等方面瓶颈的核心关键技术,在光通信、传感、计算、生物、医药、农业等领域也有着广泛的应用.如同微电子集成电路技术在电子技术领域中所发挥的重大作用一样,可以预见光电子器件与集成技术对于光电子领域的发展将是一次具有里程碑意义的技术变革.由此产生的高性能计算机、高速率低功耗的廉价光通讯设施以及新一代的光子传感芯片等等,有着广泛的市场前景,也是国家重大战略需求<sup>[1~20]</sup>.

光电子器件与集成技术的特点是领域涵盖面广,发展迅速,内涵更新频繁,从新型材料、新工艺到 新器件都在不断快速发展中,促使本学科着力研究光电子器件与集成技术应用于国民经济和社会发展

引用格式:祝宁华,李明,郝跃.光电子器件与集成技术.中国科学:信息科学,2016,46:1156-1174,doi:10.1360/N112016-00059

《中国科学》杂志社

SCIENCE CHINA PRESS



图 1 (网络版彩图) 光电子器件及集成技术主要应用领域 Figure 1 (Color online) Applications of optoelectronic devices and integration technologies.



## 图 2 (网络版彩图) 光电子器件及集成技术可用于突破信息技术面临的 3 大瓶颈

Figure 2 (Color online) Optoelectronic devices and integration technologies have the potential to break through three bottlenecks of information technology.

的各个领域的共性理论、技术和方法,以及各种前沿性的半导体新应用技术,这主要体现在光通信及 信息处理功能集成芯片、超高分辨成像及显示芯片技术、宽禁带半导体光电子器件及集成技术等重要 学科方向的理论发展和技术提高的要求.微纳光子学结合了光子学与纳米技术的前沿成果,已经成为



图 3 (网络版彩图)美国和欧盟在光电子器件及集成技术领域的部署

Figure 3 (Color online) The deployment of optoelectronic devices and integration technologies in USA and the European Union.

21 世纪主要发达国家不可或缺的关键科学和技术. 超高分辨、高灵敏光学检测方法与技术在诸多研究 领域和交叉学科的发展历程中发挥着越来越重要的作用. 以 III 族氮化物和碳化硅 (SiC) 为代表的宽 禁带半导体也成为近年来国内外重点研究和发展的新型第3代半导体材料. 研发宽禁带半导体光电子 器件被公认是占领光电信息技术领域的战略制高点,各国政府和企业均投入巨额的经费进行开发. 紫 外光电探测器及其相关技术在国防科技、引擎工作监测、深空探索研究、紫外天文学、环境监测、火 灾探测与报警、可燃烧气体成分的监测分析以及临床细胞癌变检测等方面有着广阔的前景,具有较高 的民用和军事价值.

本文围绕光电子器件与集成技术,综述了近年来光通信及信息处理功能集成芯片技术,超高分辨 成像及显示芯片技术和宽禁带光电子器件技术的研究现状、重要进展和未来的发展趋势.第2节主要 介绍国内外研究现状与最新进展,第3节主要介绍典型光电子器件与集成技术的发展趋势,最后在第 4节介绍我国在光电子器件与集成技术和方面的基础与条件.

## 2 国内外研究现状与进展

经过几十年的发展,光电子技术和产业取得了巨大的成就. 2014 年全球光电子器件相关的产业规 模已经达到 276 亿美元.光电子对国家社会与经济发展的支撑作用已经成为各国共识.例如,美国国家 科学委员会 (National Academies) 在提交给白宫的白皮书《Optics and Photonics: Essential Technologies for Our Nation》中强调"光子学是重拾美国竞争力和维护国家安全的关键";欧洲 21 世纪光子咨询专 家组提交的《Towards 2020- Photonics Driving Economic Growth in Europe》中明确指出"奔向 2020 的光子学将成为欧洲经济增长的重要支撑",如图 3 所示.光电子作为前沿科学研究中的重要组成部 分,一直以来备受各国重视,并设立了各种光电子研究计划,例如美国的 UHPC、EPIC、UNIC、POEM 等; 欧盟的 HELIOS、PhotonFAB、ERA-NET-PLUS 等; 以及日本的 First Program、TIA 等<sup>[21~34]</sup>.

光电子器件与集成技术针对前沿进展、应用需求和信息处理的不同阶段,形成了不同的学科分类,如针对宽带光通信技术的需求形成了高速光电子信息学科;在微纳尺度上实现各种新型功能材料和器件发展形成了微纳光子学和超高分辨成像及显示学科;针对半导体照明和紫外光探测日益增长的需求, 形成了宽禁带半导体光电子学科.另外,如图4所示,目前的单元器件技术基本成熟,但是没有一种材料体系可以成为唯一的光子集成材料体系,多种材料体系并存将成为未来很长一段时间内光电子集成 技术的状态.如何实现多材料体系、多种功能器件的系统集成是亟待解决的难题之一<sup>[35~43]</sup>.



图 4 (网络版彩图)光电子器件与集成技术的特点与挑战

Figure 4 (Color online) State of the art and challenges of optoelectronic devices and integration technologies.

下面针对典型的光电子器件与集成技术分别进行阐述.

#### 2.1 光通信及信息处理功能集成芯片

面向光通信和信息处理所面临的技术瓶颈,光通信及信息处理功能集成芯片的设计、制备、封装 以及应用技术都获得了较大的进展.主要研究现状与进展如下所述.

功能材料: 近年来, 二维原子晶体、拓扑绝缘体等一系列新材料方面的突破, 为探索新原理、新结构信息功能器件提供了新机遇. 掌握了半导体新材料与新原理器件技术, 就抢占了下一代信息技术的制高点. 抓住新型信息功能材料所带来的机遇, 探索新结构、新原理器件, 将为信息技术的新发展奠定基础.

集成技术: 光子集成是突破信息系统面临的"速率"、"功耗"、"智能化"等瓶颈的必由之路,目前 单元器件技术基本成熟,如何实现多材料体系、多种功能器件的系统集成是亟待研究解决的难题.新 型微纳器件与集成系统引领信息产业的多元化,是应对后摩尔时代的必由之路.面向宽带网络、大数 据和 5G 通信,急需研究高速光电子器件,重点解决制备工艺兼容性、模场匹配、光模式交叉耦合等关 键科学和技术.

系统应用:从西方各国在光通信领域的竞争态势看,Pbit/s级超大容量超长距离光传输、数据中心 光互连、片上光网络、硅基多材料混合的光电融合集成芯片和器件、大容量空间光传输等均成为国际 热点问题.未来的竞争将主要体现在"下一代超大容量光传输和光接入"、"高密度、高带宽、低延迟、 低功耗的新一代数据中心光互连"、"新型可见光通信"和"空天地一体化光传输"等多种平台建设.

#### 2.2 超高分辨成像及显示芯片技术

近十年来,国际上开始大力发展微纳光子学及其技术,使光电子技术与纳米技术相结合,对现有 的光电子技术进行升级改造.从基础理论、微纳结构的功能型器件到集成的微纳光子学系统应用以及 高分辨实时获得图像技术,微纳光子学与光电子器件集成领域涌现出大量的创新性原理、手段与技术, 有望在微纳尺度上实现各种新型功能器件,为新一代仪器技术开创新的平台.另外,光学成像领域将 不断出现创新性原理、手段与技术,有望在微纳尺度上实现更高分辨率的成像技术,更稳定的商业化 超高分辨率光学显微成像仪器<sup>[44~73]</sup>.主要研究现状与进展如下所述.

基础理论: 当微纳结构的特征尺寸达到纳米甚至原子尺度时, 宏观 Maxwell 方程组中的物质参数 会发生变化, 产生各种特殊光学效应, 例如光场局域化突破衍射极限、电磁场增强、辐射增强、吸收/透 射/反射增强、非线性效应增强、慢光效应、深亚波长结构等效介质效应等等. 这些特殊光学效应难以 采用传统的光学理论解释, 需要具体考虑不同结构中的不同物理过程, 这方面国际上已有不少研究工 作, 明确这些特殊光学效应的物理机制将为微纳光子器件的设计提供理论指导. 同时, 微纳光子结构 中, 由于光场强烈的局域效应, 使得光场与其他物理场的耦合增强, 例如光、机、电、热等多物理场之 间的复杂耦合, 也需要发展相应的理论和算法加以求解. 目前国际上已能处理一些多物理场的耦合问 题, 但是远未达到彻底解决问题的程度<sup>[44~48]</sup>.

功能器件: 微纳光子学的功能器件能够在微纳尺度实现光的产生、传输、调控、探测和传感等, 具 有尺寸小、速度快和克服传统衍射极限等优点. 目前基于纳米光子波导、光子晶体、表面等离激元以 及人工电磁超材料的微纳光电子新型功能器件, 可以调控微纳尺度下的光场, 产生奇异电磁响应和色 散特性, 已经用来初步实现微纳尺度的集成光源、全光交换器、光开关、光调制器等. 在基于砷化镓、 磷化铟、氮化镓等无机半导体材料的光电子器件基础上, 进一步发展新型复合纳米光电材料和多种异 质光电材料的微纳加工技术和集成技术, 也是国际研究热点. 采用有机半导体材料的功能型器件, 如 OLED、有机薄膜太阳能电池 (OSC)、有机薄膜晶体管 (OTFT) 等, 也获得了学术界和工业界的广泛 关注 <sup>[49~73]</sup>.

系统应用:通过微纳结构的设计可以有效提高光电能源的转换效率,应用在太阳能电池的光伏转 换效率提升方面.通过亚波长结构组合而成的人工复合介质,可以产生电磁隐身、光学欺骗等新颖物 理现象,在光信号的探测与反探测方面有重要应用.具有纳米分辨的光学显微成像技术研究,在生物 医学成像、信息存储、精密光刻、材料分析等领域有很重要应用.利用无源纳米结构可以实现高灵敏 度的生物传感器,广泛应用在生物医学检测、疾病早期诊断方面.基于微纳光子芯片系统可以实现集 成型的超高精度频率 (时间)标准,满足小型卫星、导弹和便携设备的需求.基于纳米结构的光波导、 微纳光子超材料,可以实现多种 3D 显示效果,为裸眼 3D 显示系统的发展提供了新思路.基于微纳结 构的光场时空调控,可以开发包括光子轨道角动量 (OAM)一维模式空间和光束横截面二维横向模式 空间复用 (MDM) 等新的复用维度,具有再次大幅度增加光信息传输容量的潜力.基于飞秒激光实现 的微纳加工系统,可以制作复杂构型三维微纳光学结构,为复杂光电子芯片集成提供了可能.

#### 2.3 宽禁带半导体光电子器件及集成技术

宽禁带半导体紫外探测器作为前沿技术<sup>[74~105]</sup>,近十年来一直是国际化合物半导体领域竞相研 究和开发的热点,在多种被发展的宽禁带半导体紫外探测器中,常规类型的紫外探测器已经趋于成熟. 但是,对于很多核心和新兴应用领域真正需要实现的是对微弱紫外信号的快速测量,这就意味着所用 的半导体紫外探测器必须具有强烈的增益,基于宽禁带半导体的紫外雪崩光电探测器 (APD) 可以很 好的满足这一要求.主要研究现状与进展如下所述.

紫外探测:西方主要国家对宽禁带半导体紫外雪崩光电探测器的研究一直非常重视,多年来投入 了大量研究资源开展相应研究,已经涌现了一些先进的成果.我国对 SiC 基紫外探测器的研究虽然起 步较晚,但是在宽禁带半导体紫外 APD 领域的研究水平与国际先进水平差距并不大.宽禁带半导体 衬底和外延技术、宽禁带半导体光电器件设计和微加工技术、紫外单光子探测器的封装、测试和电路 配套技术等对于实现小批量生产和装备应用,推动信息技术的发展,保障国家安全起到重要作用. 半导体照明: 近十年来全球 LED 的市场规模年均增长 20% 以上. 美国、日本、欧洲处于世界领 先地位, 他们掌握了绝大多数的关键技术和核心专利. 国内半导体照明芯片技术的发展相对国外起步 较晚, 技术水平离国际领先者还存在一定距离. 不过, 最近几年, 在政府有关部门的引导和支持下, 国 内照明级 LED 芯片技术的研究、开发以及产业化工作取得了长足进步. 另外, 白光 LED 照明的可见 光通信技术 (VLC 技术) 是用室内照明的白光 LED 光源作为通信基站进行信息无线传输的技术. 与 传统的射频通信和 FSO 相比, VLC 具有发射功率高、无电磁干扰、节约能源等优点, 在国际上受到高 度重视.

量子器件:国际上的前沿热点是研究基于 III-V 族及 III 族氮化物半导体量子点结构的单光子光 源,同时还携带自旋或偏振特性.如何实现尺寸可控、排列有序的 III-V 族半导体量子点生长,一直是 生长研究的热点.光定向传输主要研究热点是基于 III-V 族半导体的光子晶体波导结构,并且集成在 单芯片上.目前主要研究采用深紫外光刻、电子束光刻 (EBL)、纳米压印等技术加工 III-V 或 III 族 氮化物半导体模板制备光学设计的周期阵列结构.

## 3 典型光电子器件与集成技术的发展趋势

#### 3.1 硅基光电子集成芯片技术

硅基光电子集成技术主要研究和开发以光子和电子为信息载体的硅基大规模集成芯片,即利用硅 或与硅兼容的材料,应用 CMOS 工艺,在同一硅衬底上同时制作光子和光电子功能器件,形成一个具 有完整综合功能的新型混合大规模集成芯片.硅基光电子集成可以充分发挥微电子先进成熟的工艺技 术、大规模集成带来的低廉价格,以及光子器件与系统所特有的极大宽、超快传输速率、高抗干扰性 等优势,为未来信息技术高速发展提供新的途径.

近年来各主要国家研究机构和一些大型公司都投入了大量资金开展这一研究,如美国 DARPA 组 织了包括 MIT、Stanford、Intel、IBM、Sun、Oracle 等大学和公司启动了 EPIC、UNIC、MURI 等多项 研究计划开展硅基光电子集成技术研究,并且已经有少量硅基光电子功能芯片上市:日本也将硅基光 电子集成技术项目列入其国家顶级研究计划 FIRST Program. 欧盟在 FP5、FP6、FP7 系列项目支持 下,以 IMEC 为主要技术平台,取得了很好的进展;我国近年来在国家高技术研究发展计划 (863)、国 家重点基础研究发展计划 (973) 和自然科学基金等支持下也加大了这方面的研究力度, 在硅基关键光 电子集成器件等方面取得了一系列重要成果,调制、探测、复用与解复用、均衡等分立器件已经研制 成功. 在研发方面, 已初步解决了除激光器以外的硅基光电子器件的技术集成的可行性及实用性问题. 我国高校、研究所在单个硅基光电子器件的科技研发方面与世界水平差距不大.近年来,北京大学、中 国科学院半导体研究所、上海交通大学、浙江大学、南京大学等均取得了一定的研究成果.例如,北京 大学已经研制成功了单片集成的 100 Gb/s 硅基相干发射及传输系统,并成功实现了 100 公里的系统 传输;中科院半导体研究所采用低温过渡层技术生长出了高质量的 SiGe、Ge、GeSn 等硅基量子结构 材料, 并研制出 3 dB 带宽达到 26-GHz 的高速 Ge 探测器、带宽 17.5-GHz 的 12 路锗 – 硅光电探测 器阵列, 以及调制速率 60-Gb/s 的; 硅基电 – 光调制器; 上海交通大学研制的 QPSK 硅基电 – 光调制 器具有 100 Gb/s 传输能力, 可在 1000 公里光纤上实现无误码传输; 浙江大学则在单个硅基光电子器 件的小型化方面取得了较大的进步.

面向接入或骨干传输的硅基集成芯片涉及光源、发射(调制)和接收3个环节,最理想的实现方 式是收发一体的高度集成.因此,需要重点研究硅基发光、调制和探测器件,并最终实现大规模集成.

#### 3.2 混合光电子集成技术

目前光信息系统主要由分立的光电子器件构成,这些分立器件所采用的集成材料和工艺都不相同,多元化的材料和工艺是光电子集成的重要特征.比如,光发射、放大、接收集成器件主要采用基于 III-V 族的化合物半导体 (例如磷化铟)材料,光学滤波器件采用光学薄膜材料或氧化硅材料,这些 光电子集成对于某些光通信应用具有适用性,其今后的发展趋势是采用单片集成或混合集成技术,进 一步扩大集成规模,并实现多材料体系、多功能混合集成器件的规模集成,以满足多样化的信息系统 需求.

在硅基芯片上实现 III-V 族材料 (如铟磷和镓砷) 混合集成最有效的方法是直接生长,但硅材料 和镓砷、铟磷的晶格常数和热膨胀系数失配很大,到目前为止通过复杂的设计可以很好地控制铟磷材 料直接生长的缺陷密度,然后其所得到的尺寸还在纳米尺度范围,想要制作电泵浦激光器还有很多的 工作要做,而要实现材料直接生长的大规模集成则还存在很多困难.将生长好的铟磷材料和制作好的 铟磷激光器与硅基芯片混合集成则是目前被广泛看好的方案,前者通常被称为芯片键合,而后者通常 被称为混合封装.键合工艺被广泛应用于激光光源的制作,目前已经实现的成果包括 2014 年美国大学 UCSB 的 20 GHz 锁模激光器,以及 12.5 Gb/s 直接调制的低阈值 8.8 mA 分布反馈激光器,2013 年 Ghent 大学基于 AWG 的多波长激光器和 8 nm 范围的可调谐激光器等.除此之外,键合工艺也被用 于电吸收调制器以及探测器的制作,UCSB 在 2012 年实现了 67 GHz 的电吸收调制器,其消光比可达 到 9.6 dB,在 2013 年实现了 30 GHz 的探测器,其响应度为 0.85 A/W. 国内在铟磷与硅的混合集成上 通过键合工艺也取得了一些初步成果,如 2010 年北大和半导体所报道了 0.45 mW 输出的激光器.

在多功能器件混合集成上,许多研究单位和公司投入很大资源研发相关技术. Luxtera 公司早在 2005年就报道了他们利用光栅耦合光,并实现了 MZI 调制器,锗探测器以及波分复用器的单片集成, 其研制的硅基光发射器已经应用在全球数个超级计算机,并在数据中心获得大规模应用.一些标志性 的大公司如美国 Intel、IBM 和 Cisco 已宣布研制出高度集成的硅基光电子光收发器模块. 近年来,外 延生长和精细加工技术都取得了长足进展,并以这些技术为支柱,基本确立了用各种材料制作光波导 的方法,无源器件、有源器件制作中所出现的问题也逐一得到解决. 各种光电子器件已经达到了较高 的性能指标. 在多功能器件混合集成技术中,无源波导和激光器的耦合很重要,而且需要达到较高的 耦合效率. 现在最好的耦合方法是直接端面耦合法,效率可达 80% 以上,这个过程既复杂又难于稳固, 对于多功能器件混合集成芯片和模块的大规模低成本应用产生不利影响,因此在多功能器件混合集成 技术上,还需要进行深入研究.

十二五期间, 我国对光电子集成进行了重点资助, 取得了较好的成绩, 特别是在单元器件上, 如激 光器、调制器和无源器件上 (如 AWG) 取得了一些重要进展和产业突破. 中科院半导体所开展了小通 道 AWG 与单管激光器、探测器的混合集成研究工作, 也为激光器阵列、探测器阵列合波及解复用所 需波分复用器奠定了基础. 此外, 在降低光波导传输损耗、散射和改善光调制器的消光比等方面还需 要进行大量的研究. 同时也应该看到, 现有的光电器件由于受到光电材料体系本身的局限, 在工作波段 及工作性能等方面难以实现大的突破, 比如在 3 μm 以上的中红外波段光电子器件.

以石墨烯、薄层状过渡金属硫化物为代表的二维原子晶体材料具有优异的机械性能、超高的导热 率和载流子迁移率,涵盖从可见到红外、到太赫兹超宽的光学响应及极强的非线性光学特征,而且,其 光电特性可以调控,器件集成工艺与硅基的 CMOS 工艺兼容,因此在新型光电子器件具有得天独厚的 优势.基于二维原子晶体的新型光电子器件已经开始被研制出并发表在 Nature、Science 等知名期刊, 显示出优异的性能.基于新型光电功能材料的超宽波段光电子器件已经成为学术前沿和研究的热点.

#### 3.3 微波与光波融合集成技术

微波光子学融合了光子技术和电子技术的优势,具有超宽带、低损耗和可复用的特点,可以突破 电子学的瓶颈,在超宽带、多频段、多业务微波信号一体化传输、处理和分布协同方面发挥重要的作 用,提升系统的性能.近年来,在国家自然科学基金重点项目"毫米波光纤无线系统理论与技术的研 究"、"光纤毫米波无线通信技术的关键器件与系统设计"以及"新一代宽带无线移动通信网"国家科 技重大专项项目"面向 RoF 等新型组网技术的射频器件与模块"等的支持下,中科院半导体所、清华 大学、北京邮电大学和北京大学等单位对微波与光波集成基础理论、器件、系统以及面向产业化的应 用等多方面进行了初步研究,取得多项研究成果.虽然,我国在个别单元器件和系统关键技术方面达到 了国际先进水平,但在多频段、多载波和多种制式兼容一体化的天线收发与处理技术,智能化宽带天 线接入和微波与光波融合的混合集成等方面仍然与发达国家差距较大.

产生与发射:微波光子信号产生及发射是任何微波光子系统必不可少的关键组件,其每一个进步 都将对整个微波光子学产生深远的影响.未来的发展主要围绕高频微波与光子高效和平坦相互作用这 一科学问题展开.应布局在光生窄线宽微波源、高相干度宽带多信道光发射源、高功率低 RIN 激光 器、高重复率低抖动超短光脉冲源等方向.重点探索光发射器件相干性控制机理、噪声抑制机理及功 率承载能力提升方法等.

传输与控制:光传微波和光控微波是微波光子技术兴起的诱因.应重点发展大规模高一致性射频 光子交换阵列、阵列化真时延、稳相传输相关的技术与集成芯片,解决光对微波幅度、延时和路由的 高速控制和高精度控制等关键问题.探索能实现纳秒级光交换的物理效应和芯片实现方法、单芯片米 级低损耗延时的芯片生成机理、及集成化光微波锁相环等.

接收与处理:光子技术在进行微波接收时的巨大损耗及噪声系数是限制微波光子技术应用范围的 最重要因素.应重点发展高饱和功率高线性低噪声光电探测器、高频宽带系统中色散与非线性的光学 处理、宽带多维度一体化射频光前端,发展非线性调控、噪声管理及高效光电转换机理和方法.

#### 3.4 模拟分析与测试封装技术

光通信向超大容量、高速率和全光网方向发展,光器件的发展趋势是小型化、高可靠性、多功能、 模块化和集成化.光电子封装是光电子器件、电子元器件及功能应用材料的系统集成.光电子器件的 封装技术来自于市场驱动,光通信的发展需要光器件满足如下需要:更快的传输速率、更高的性能指 标、更小的外形尺寸、更高的光电集成度、低成本的封装工艺技术.

随着光电子器件及系统的发展,芯片尺寸不断减小而集成度不断提高,芯片速率也越来越高,电 子封装已从传统的电源系统、信号分布及传递、散热及机械保护等功能,扩展增加了系统测试、可制 造性、可靠性、可维护性以及成本等多方面内容,目的是在产品设计阶段实现工艺设计、可靠性评估 和测试结构及参数的设计等功能,提高器件封装的成功率.

## 3.5 超高分辨成像及显示芯片技术

超高分辨光学成像的任何研究进展,都有可能极大地促进生物、医学、材料学等相关学科的原始 创新,进而占领前沿科学研究的制高点.正是在此动机的驱动之下,目前在全世界范围内,各国对于超 高分辨率光学显微研究的投入不断加大.针对目前超高分辨光学显微成像的研究,提出优先资助研究 领域如下:(1)新型超高分辨显微技术创新性原理与技术的研究.目前超高分辨成像研究中仍有诸多 问题存在,如成像速度慢、信息表征单一、无法动态无损成像等.每一项问题的突破都要求有创新性 的原理与技术,这也激励着显微成像领域广大研究人员的热情.(2)超高分辨率光学显微技术与其他技术联用的研究.随着目前微流芯片技术、三维信息获取技术、图像处理技术等的迅速发展,将超高分辨光学显微技术与其他技术联用可以进一步扩展其应用范围,扩宽广大研究人员的研究思路.(3)超高分辨率光学显微技术在生物医学方面的应用研究,具体包括在单分子显微成像、脑神经成像等方面的研究.当前生命科学的研究热点包括生物芯片、分子生物学、脑科学、生物信息学、人工生命等.将超高分辨率光学显微成像技术与当前生命科学研究热点结合是必然趋势,也是超高分辨光学显微技术的重要应用方向.

## 3.6 宽禁带半导体光电子器件及集成技术

目前,宽禁带半导体光电子器件的发展趋势为小型化、集成化、阵列化.紫外探测器作为宽禁带 半导体光电子器件的主要领域之一,雪崩紫外探测器的研发是继宽禁带常规紫外探测器后的又一热点 和难点.大面积的光电探测器存在困难,探测器阵列可以较好解决大面积光电探测器成本高、成品率 低的问题.宽禁带半导体的集成电路仍在发展当中,宽禁带光电子器件的单芯片集成是必然趋势,但 由于宽禁带半导体材料的特殊性质,宽禁带半导体的集成参考硅集成的方法困难重重,在不完全废弃 硅工艺的基础上开发新工艺新方法完成宽禁带半导体上的集成电路生产制造是必然趋势.

半导体照明器件:为了实现高效的电 – 光转换过程,重点在研究高效的半导体照明器件和技术. 半导体用于通用照明,将大幅降低能量消耗.目前尤为重要的是基于 III 族氮化物材料和器件的半导 体照明技术.但是,超高效率氮化物 LED 芯片的若干基础科学问题仍亟待解决,包括掌握大失配异质 体系的外延生长规律,弄清大注入条件下 LED 的发光机理,揭示光子传输行为和调控方法,建立功率 LED 器件物理的基本模型,最终目的是研制高质量氮化物半导体量子阱材料和超高效率氮化物 LED 芯片.

宽禁带半导体宽谱光伏器件:光伏器件利用半导体光 – 电转换原理,将太阳光谱能量转化成为电 能或者化学能.目前,最为紧要的是突破单晶硅电池的 Shockley-Queisser 极限,发展高效率、低成本的 第3代硅基太阳能电池,需要采用不同于常规的新材料、新技术、新结构.其重要的解决途径之一就 是使 Si 基材料上能对长波长和短波长的光均产生有效的响应,也即实现对太阳光谱的宽 (全)光谱响 应.基于当前正在迅猛发展的纳米技术、能带工程和掺杂工程,研究多种技术方案,包括多激子电池、 热载流子电池、下转换电池、多结电池、光子剪裁波长转换等;利用纳米线和纳米点等构建新型硅基 纳米薄膜太阳电池和高性能柔性异质结电池.

发展基于 III 族氮化物的化合物半导体宽谱光伏电池器件,重点研究宽带隙的氮化物外延生长和 掺杂工艺,设计和制备新型太阳光伏器件;利用能带工程和应变调控工程,纳米技术大幅提高 III-V 化 合物、III 族氮化物基光伏器件的转换效率;研究利用 III 族氮化物等化合物半导体作为光电化学电极, 利用其宽广连续可调的能带结构以及化学稳定的特点,研究高效率的制氢技术.

宽禁带半导体紫外单光子探测器:为了实现对极微弱紫外信号的有效探测,甚至最终实现单光子 探测,必须使所研制的 APD 同时具有很高的增益和足够低的暗电流,以及高的量子效率.因此,除了 材料选择、外延生长等材料问题之外,在材料的雪崩特征参数、载流子输运和倍增机理、噪音来源与 控制、器件结构设计与工艺开发、微弱信号探测能力的测试表征等方面都面临着大量的共性科学问题, 值得下大力气专门加以研究.建议紧密围绕提升宽禁带半导体雪崩光电探测器性能的目标,深入研究 高 Al 组分氮化物半导体的生长机理和动力学行为,提高材料的晶体质量;研究 SiC 及 AlGaN 基 pn 结的高场漏电机理、光生载流子的倍增和输运规律、以及不同类型缺陷对器件性能的具体影响;结合 发展新型的器件结构设计和工艺方法,包括高可靠性终端结构和钝化技术;实现高探测效率 SiC 基紫 外单光子探测器和高增益 AlGaN 基日盲紫外雪崩光电探测器;并开展小规模紫外单光子成像阵列的研究探索.

新型低维结构激光/单光子光源器件:研究利用表面等离激元,激子极化激元,光学微腔提高 III 族氮化物, ZnO 发光器件的辐射效率,发展新一代低阈值激光器件;研究新型的无机/有机混合半导体 结构,钙钛矿结构的新型发光器件;研究具有单光子发射功能的零维量子点光电子器件.目前,基于二 维材料体系的新一代信息器件毋容置疑是研究的热点,宽禁带半导体迫切需要与传统的硅材料、新兴 的二维材料体系结合,利用范德华外延等新材料生长机制,制备新型混合异质结构;与自旋磁性材料 结合,研究自旋的注入和在半导体中的输运机制,利用先进的光 – 磁 – 电联合表征系统,发现新物理 现象;综合先进的亚微米、纳米加工手段,制备新型微电子与光电子信息器件;加强工程集成,最终实 现具有量子信息处理功能的量子集成光电路系统.

#### 3.7 高速光电子信息处理集成器件技术

国际上,光电子器件及集成技术总体朝着集成化、低成本、智能化、高性能方向发展.在宽带光通 信系统和超快速、超大型计算机等需求的推动下,基于成熟的 CMOS 工艺,近年来硅基及新型材料集 成光子器件的发展呈现出大容量、微型化和大规模集成化、智能化、高速化等几大发展趋势.在大容 量方面,新型调制格式、超高速单信道和多波长信道有效地提升了容量;在微型化和大规模集成化方 面,需要实现有源和无源波导的微纳米尺度下集成.

全光模拟计算: 全光模拟计算能够突破传统电域计算的带宽瓶颈, 并且具有信号处理精度高、不 受电磁干扰、传输损耗低等优点, 是面向未来百 GHz 乃至 THz 超高速应用场合的一种很有前景的解 决方案. 未来几年发展方向主要集中在有新功能的片上光学模拟运算单元; 基于基本光模拟运算单元 构建开发光学模拟运算系统以实现更为强大的运算功能; 全面提升光学模拟运算单元的性能, 包括运 算速率、运算准确性和稳定性等; 探索研究引入新材料实现超高速光学模拟运算的可能.

数字光逻辑运算器件:数字光逻辑能够充分发挥光波巨大的带宽能力,通过多维复用方式,处理的信号速率有望超过 Tb/s. 实现光学数字逻辑运算一般需要基于介质中的非线性效应,增强和选择性调控非线性效应是基本的科学问题.因此需要从材料、器件结构和工作机理 3 个方面展开系统深入的研究工作.未来几年发展主要集中在探索实现数字光逻辑运算的新机理和新的工作方式;通过非线性效应的增强降低输入光功率的要求,提高逻辑运算功能的灵活性和可控性,重点研究有单片集成潜力的逻辑运算功能实现方案,研究 InP 有源波导和无源波导的单片集成,研究 InP 基光子晶体微腔结构实现低功耗高速逻辑运算功能,研究硅基兼容非线性波导的复杂逻辑运算功能芯片,实现复杂的逻辑运算功能.

片上并行光学处理:如何实现传统光学矩阵处理器与硅基微纳光电子器件结合,在硅片上实现光 学矩阵处理器,是当前光计算领域一个亟待解决的重大科学技术问题.未来的发展主要围绕高速、大 规模并行处理的光学实现方法及其系统构架的研究;支持高速、大规模并行处理的硅基集成光学处理 芯片的研究;片上并行光学处理器的系统扩展、性能升级、鲁棒性及自适应性技术的研究.

宽带高精度光子模数转换:光子模数转换充分发挥光信号处理在超高速、大带宽方面的优势,被 认为是解决超高速信号数字化瓶颈问题的最具潜力的途径,已成为目前国际上的研究热点,并呈现出 了超高速、高精度、大带宽和集成化等特点.转换速率是衡量模数转换性能的重要指标.信息技术的 发展对模数转换速率提出了越来越高的要求,特别是高速信号(包括微波信号)的采样,无论是科学研 究中瞬息变化过程的观测与记录,还是通信、监测、雷达、人工智能系统等技术都要求数十 Gb/s 及以 上的转换速率.转换精度是衡量模数转换性能的另外一项重要指标.光子模数转换中存在各种光学噪 声,也存在光电相互转换过程中的噪声.要实现高的转换精度,需要在超高速、大带宽的光子模数转换 过程中进一步降低噪声,提高信噪比,并提高信号无杂散信噪比和接收机灵敏度,这将是研究的难点. 信息技术中的信号带宽直接决定所携带的信息容量,大带宽将是信息技术发展的趋势.目前实现光子 模数转换的光电子器件和电子器件存在带宽失配的问题,需要开展深入研究.集成化是缩小器件体积、 降低功耗、提高稳定性的有效途径.光子模数转换核心模块将使用光子集成芯片实现,需要研究单元 器件优化设计、各器件之间的兼容集成,以及制备工艺和光电耦合封装等技术,集成化将是未来发展 的趋势.

多维信息互连与传输技术:通过采用光互联在内的各种高带宽互联技术,解决带宽围墙效应,成 为半导体学科发展的紧迫需求.光互联技术必须满足高带宽、低延迟、可集成、低成本、低能耗等要 求.传统的大容量长距离光纤通信技术难以满足这些要求,需要通过开发光波新维度,开辟新的复用 资源,多维度加载信息等方法,提供半导体集成环境下的光互联带宽.目前核心、城域网络的大容量长 距离光纤通信技术仍然面临巨大的需求压力.在现有技术提供的带宽资源基本耗尽的背景下,开发光 载波各个维度上潜在的容量资源、寻找下一个传输容量成数量级提高的极大容量光纤传输技术,成为 紧迫需求.因此,开展支持综合运用多维度带宽资源进行信息传输的新型集成光电子器件研究成为半 导体科学的重要任务.实现光互联技术和下一代极大容量光纤传输技术,不但需要新的光传输方案和 技术,还需要基于多个维度的光路由资源,实现可集成的片上、片间和子系统间、网络终端之间的全光 数据交换网络,才能实现真正适应未来信息系统发展的需求.因此,半导体科学还肩负着研究支持全 光信息高速交换的集成光电子器件的艰巨任务.其核心科学问题是解决这类集成半导体光电子器件的 效率和可扩展性问题.

多端口光信息高速交换关键技术:光交换是下一代网络关键技术之一,是国际上的研究热点.通 信容量的急剧增加对光网络的数据交换能力提出了更高的要求.下一代光网络需要实现几十到上百个 端口的任意交换,每个端口速率高达 Gb/s,同时切换的时间要进入纳秒量级.如何实现大容量多端口 的高速交换是研究的重点.为了提高通信容量,光传输系统将大量采用多维度复用技术,传输信号的 数据格式不断发生变化.同时,在不同用途的光网络中,如城域网、局域网、大数据的光互连网,将出 现多种不同的数据格式同时并存的情况.为此,未来的光交换系统需要具备兼容不同数据格式信号的 能力.光缓存及存储是全光交换中的重要环节,也是光信息处理、光计算技术中的关键环节.但是,现 有的光缓存及存储,无论是存储光场本身的模拟光存储,还是逐个比特的数字光存储,都处在研究的 初级阶段.与成熟的电子信息存储比较,光存储研究在总容量及其可扩展性、容量密度、能耗等主要 性能方面存在巨大差距,需要在机理、材料、器件等方面取得原创性的突破,这将是一项重要的科学挑 战.在集成芯片上实现大容量多端口的高速光交换是发展趋势.在未来的光交换系统中,众多的端口 数目、大容量的单通道速率、超短的切换时间都对芯片的集成度提出了更高的要求,同时,还需要研究 芯片与光纤之间的多端口低损耗耦合封装、高速驱动电路封装、以及模块化封装技术.规模化的光子 集成将是未来光交换技术能否进入实际应用阶段的关键.

## 4 我国的基础与条件

近年来我国各大高校和研究单位在光电子器件与集成技术领域展开了较深入的研究,取得了一系列重要成果,打下了较好的研究基础,形成了一批优势单位,下面按照方向具体介绍如下.

光通信及信息处理功能集成芯片方向.在高速光电子信息处理功能集成器件方面,国内已具有广泛和深厚的研究基础和良好的研究条件.在全光模拟微分器、全光 Hilbert 变换器、全光逻辑运算单元

1166

等方面研究成果得到了国际学术界广泛的关注和认可.在光学数字逻辑器件开发、高级逻辑电路、可 编程逻辑阵列、光缓存技术、非线性增强光波导技术等方面的研究成果得到了国际学术界广泛关注和 认可. 在用于硅基光子集成的光源、光调制器、光开关、光学滤波器、光学复用/解复用器等方面开展 了多年的研究,也取得了一些国际上有影响力的成果.在宽带高精度光子模数转换器件方面,已经具备 进行工作速率达 100 GS/s 的研究平台,并且在光子模数转换的理论和方法、关键部件研究、模数转换 系统等方面的研究成果取得了突破性进展. 在多维度信息传输技术方面, 我国研究人员取得了国际瞩 目的进展,特别在基于光子轨道角动量复用传输方面,演示了融合轨道角动量、偏振、波长等多种维度 复用资源、并同时进行幅度、相位等维度的高阶相干调制的传输方案,取得了国际领先的容量、复用 通道数和频谱效率.在微波光电子方向,我国已经开展了针对射频信号的交换、补偿、延迟、滤波以及 稳相等关键科学技术问题的深入探索,研究满足微波光子信号处理的光电子集成器件,构建面向宽带 模拟信号的微波光子处理系统,实现光生窄线宽微波源、高饱和功率高线性低噪声光电探测器、高相 干度宽带多信道光发射源、大规模高一致性射频光子交换阵列、高频宽带系统中色散与非线性的光学 处理、阵列化真时延、宽带多维度一体化射频光前端和稳相传输的技术与方法.优势单位主要有中科 院半导体研究所、清华大学、北京大学、吉林大学、华中科技大学、西南交通大学、上海交通大学、北 京邮电大学、暨南大学、复旦大学、南京大学、浙江大学、中科院物理所、香港中文大学、上海大学、 中山大学、南京航空航天大学、电子科技大学等.

超高分辨成像及显示芯片技术方向.最近十年来,国内一些重点院校和研究所,如浙江大学、中国科技大学、北京大学、华中科技大学、深圳大学等,也纷纷开始在超高分辨光学成像领域进行研究.浙江大学刘旭课题组成功完成了一套基于荧光受激发射损耗技术 (STED)的超分辨荧光寿命成像系统 (STED-FLIM),空间分辨率达到 38 nm,荧光寿命探测精度为 20 ps;北京大学席鹏课题组搭建了一套分辨率在 60 nm 左右的双色 STED 系统;中国科技大学侯建国院士课题组利用针尖扫描拉曼分子成像,实现了 0.5 nm 的成像分辨率;吴自玉课题组实现了 X 射线成像,应用于生物软组织如肿瘤、血管的研究;上海理工大学庄松林院士课题组对超分辨显微矢量光束调控进行了详细的研究;深圳大学牛憨笨院士课题组对非线性光学显微特别是荧光多功能成像作出了突出贡献,袁小聪课题组在表面等离激元 (SPP)和拉曼光谱成像方面取得了突出进展;华中科技大学骆清铭课题组开发了脑成像系统,应用于小鼠的脑神经高分辨成像;上海光机所徐至展院士课题组对单分子探测显微成像进行了深入研究;西安光机所姚保利课题组提出并实现了基于数字微镜器件 (DMD)和 LED 照明的 SIM 技术等等.

宽禁带光电子器件方向.国内对宽禁带光电子器件的研究具有良好的研究基础.SiC 衬底材料生 长方面,山东大学、上海硅酸盐研究所、中国电子科技集团公司第二研究所有一定的积累.GaN 材 料生长方面,西安电子科技大学宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室取得了良好成果.SiC 和 AlGaN APD 紫外探测器均取得突破,形成了一些优势单位.SiC 基紫外探测器优势单位主要有南京大 学、西安电子科技大学、厦门大学和中国科学院半导体研究所等.AlGaN 材料紫外探测器涉及的主要 单位包括南京大学、北京大学、中山大学、华中科技大学、中国科学院上海技术物理所、中国科学院 长春光学精密器械与物理研究所和中国科学院半导体研究所等.目前国内光导开关的研制还在起步阶 段,国内主要研究机构有西安电子科技大学和上海硅酸盐研究所.西安电子科技大学微电子学院,现 有 3 个部级重点实验室,即"宽禁带半导体材料与器件"教育部重点实验室、"微电路可靠性技术"和 "新型半导体材料与器件"信息产业部重点实验室,在宽禁带材料方面有深厚的积淀,在宽禁带光电子 器件方面,如紫外探测器及光导开关已经有了一定的技术积累.

## 5 结论

本文围绕光电子器件与集成技术,综述了近年来光通信及信息处理功能集成芯片技术,超高分辨 成像及显示芯片技术和宽禁带光电子器件技术的研究现状、重要进展和未来的发展趋势.光电子器件 与集成技术具有低功耗、高速率、高可靠、小体积等突出优势,是突破信息网络所面临的速率带宽、能 耗体积、智能化与可重构等方面的瓶颈的核心关键技术.我国经过多年的努力发展,在光电子器件与 集成领域已经取得了较大的进展,具备了较好的科研队伍和条件.在基础研究层面,建议重点研究微纳 尺度下光场、电场与物质之间相互作用机理,集成芯片中光模式传输与耦合效应以及微电子与光电子 融合中的协同与匹配等重大科学问题.在发展战略层面,建议在未来5年成立国家光电子器件与集成 技术产学研用发展联盟,整合优势资源,从基础条件建设、标准化工艺和器件库建设、关键理论和技术 研发到光电子集成器件的示范应用与产业化推广应用,进行全链条式的研发.

致谢 感谢为本文撰写提供材料的各位专家和学者.

#### 参考文献 —

- 1 Li M, Chen X, Su Y, et al. Photonic integration circuits in China. IEEE J Quant Electron, 2016, 52: 0601017
- 2 Li M, Zhu N H. Microwave photonics shines in China. IEEE Photo Soci Newsl, 2016, 30: 4–14
- 3 Bougioukos M, Kouloumentas C, Spyropoulou M, et al. Multi-format all-optical processing based on a large-scale, hybridly integrated photonic circuit. Opt Express, 2011, 19: 11479–11489
- 4 Bougioukos M, Richter T, Kouloumentas C, et al. Phase-incoherent DQPSK wavelength conversion using a photonic integrated circuit. IEEE Photon Tech Lett, 2011, 23: 1649–1651
- 5 Cemlyn B R, Labukhin D, Henning I D, et al. Dynamic transitions in a photonic integrated circuit. IEEE J Quant Electron, 2012, 48: 261–268
- 6 Chen L, Sohdi A, Bowers J E, et al. Electronic and photonic integrated circuits for fast data center optical circuit switches. IEEE Commun Mag, 2013, 51: 53–59
- 7 Dal Bosco A K, Kanno K, Uchida A, et al. Cycles of self-pulsations in a photonic integrated circuit. Phys Rev E, 2015, 92: 062905
- 8 Ding Y H, Ou H Y, Xu J, et al. Silicon photonic integrated circuit mode multiplexer. IEEE Photon Tech Lett, 2013, 25: 648–651
- 9 Englund D R. Towards scalable networks of solid-state quantum memories in a photonic integrated circuit (presentation recording). In: Proceedings of SPIE Active Photonic Materials VII, San Diego, 2015. 9546
- 10 Evans P, Fisher M, Malendevich R, et al. 1.12 Tb/s superchannel coherent PM-QPSK InP transmitter photonic integrated circuit (PIC). Opt Express, 2011, 19: 154–158
- 11 Evans P, Fisher M, Malendevich R, et al. Multi-channel coherent PM-QPSK InP transmitter photonic integrated circuit (PIC) operating at 112 Gb/s per wavelength. In: Proceedings of Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, 2011. 1–3
- 12 Fandino J S, Domenech J D, Munoz P, et al. Design and experimental characterization of an InP photonic integrated circuit working as a receiver for frequency-modulated direct-detection microwave photonic links. In: Proceedings of SPIE Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XVII, San Francisco, 2013. 8627: 1–8
- 13 Germer S, Cherkouk C, Rebohle L, et al. Si-based light emitter in an integrated photonic circuit for smart biosensor applications. In: Proceedings of SPIE Integrated Photonics: Materials, Devices, and Applications II, Grenoble, 2013. 8767: 1–13

- 14 Guan B B, Scott R P, Qin C, et al. Free-space coherent optical communication with orbital angular, momentum multiplexing/demultiplexing using a hybrid 3D photonic integrated circuit. Opt Express, 2014, 22: 145–156
- 15 Guzzon R S, Norberg E J, Coldren L A. Spurious-free dynamic range in photonic integrated circuit filters with semiconductor optical amplifiers. IEEE J Quant Electron, 2012, 48: 269–278
- 16 Haney M W. How will photonic integrated circuit technology develop? In: Proceedings of SPIE Silicon Photonics VIII, San Francisco, 2013. 8629: 1–6
- 17 Hasan M, Guemri R, Maldonado-Basilio R, et al. Theoretical analysis and modeling of a photonic integrated circuit for frequency 8-tupled and 24-tupled millimeter wave signal generation. Opt Lett, 2014, 39: 6950–6953
- 18 Hasan M, Guemri R, Maldonado-Basilio R, et al. Theoretical analysis and modeling of a photonic integrated circuit for frequency 8-tupled and 24-tupled millimeter wave signal generation. Opt Lett, 2015, 40: 5710–5710
- 19 Hasan M, Hall T. Cascade photonic integrated circuit architecture for electro-optic in-phase quadrature/single sideband modulation or frequency conversion. Opt Lett, 2015, 40: 5038–5041
- 20 Hasan M, Maldonado-Basilio R, Hall T J. Dual-function photonic integrated circuit for frequency octo-tupling or single-side-band modulation. Opt Lett, 2015, 40: 2501–2504
- 21 Heck M J R, Bauters J F, Davenport M L, et al. Hybrid silicon photonic integrated circuit technology. IEEE J Sel Top Quant, 2013, 19: 6100117
- 22 Heck M J R, Davenport M L, Srinivasan S, et al. Optimization of the hybrid silicon photonic integrated circuit platform. In: Proceedings of SPIE Novel In-Plane Semiconductor Lasers XII, San Francisco, 2013. 8640: 1–10
- 23 Huang W P, Han L, Mu J W. A rigorous circuit model for simulation of large-scale photonic integrated circuits. IEEE Photon J, 2012, 4: 1622–1638
- 24 Kazmierski C. Electro-absorption-based fast photonic integrated circuit sources for next network capacity scaling. J Opt Commun Netw, 2012, 4: 8–16
- 25 Kervella G, van Dijk F, Pillet G, et al. Optoelectronic cross-injection locking of a dual-wavelength photonic integrated circuit for low-phase-noise millimeter-wave generation. Opt Lett, 2015, 40: 3655–3658
- 26 Liow T Y, Ang K W, Fang Q, et al. Silicon photonics technologies for monolithic electronic-photonic integrated circuit applications. In: Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Shannghai, 2010. 29–32
- 27 Mao D P, Qiao X, Dong L. Design of nano-opto-mechanical reconfigurable photonic integrated circuit. J Lightw Tech, 2013, 31: 1660–1669
- 28 Nagarajan R, Lambert D, Kato M, et al. Five-channel, 114 Gbit/s per channel, dual carrier, dual polarisation, coherent QPSK, monolithic InP receiver photonic integrated circuit. Electron Lett, 2011, 47: 555–556
- 29 Nagarajan R, Rahn J, Kato M, et al. 10 channel, 45.6 Gb/s per channel, polarization-multiplexed DQPSK, InP receiver photonic integrated circuit. J Lightw Tech, 2011, 29: 386–395
- 30 Ruocco A, Fiers M, Vanslembrouck M, et al. Multi-parameter extraction from SOI photonic integrated circuits using circuit simulation and evolutionary algorithms. In: Proceedings of SPIE Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XVII, San Francisco, 2015. 9366: 1–9
- 31 Shiue R J, Gao Y D, Wang Y F, et al. High-responsivity Graphene-Boron nitride photodetector and autocorrelator in a silicon photonic integrated circuit. Nano Lett, 2015, 15: 7288–7293
- 32 Snyder B, Corbett B, O'brien P. Hybrid Integration of the wavelength-tunable laser with a silicon photonic integrated circuit. J Lightw Tech, 2013, 31: 3934–3942
- 33 Spyropoulou M, Bougioukos M, Giannoulis G, et al. Large-scale photonic integrated circuit for multi-format regeneration and wavelength conversion. In: Proceedings of Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, 2011. 1–3

- 34 Stanton E J, Heck M J R, Bovington J, et al. Multi-octave spectral beam combiner on ultra-broadband photonic integrated circuit platform. Opt Express, 2015, 23: 11272–11283
- 35 Stopinski S, Malinowski M, Piramidowicz R, et al. Data readout system utilizing photonic integrated circuit. Nucl Instrum Meth A, 2013, 725: 183–186
- 36 Summers J, Vallaitis T, Evans P, et al. Monolithic InP-based coherent transmitter photonic integrated circuit with 2.25 Tbit/s capacity. Electron Lett, 2014, 50: 1150–1151
- 37 Theurer M, Gobel T, Stanze D, et al. Photonic-integrated circuit for continuous-wave THz generation. Opt Lett, 2013, 38: 3724–3726
- 38 van Acoleyen K, Ryckeboer E, Bogaerts W, et al. Efficient light collection and direction-of-arrival estimation using a photonic integrated circuit. IEEE Photon Tech Lett, 2012, 24: 933–935
- 39 van Dijk F, Lamponi M, Chtioui M, et al. Photonic integrated circuit on InP for millimeter wave generation. In: Proceedings of SPIE Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XVIII, San Francisco, 2014. 8988: 1–6
- 40 Wang Z, Lee H C, Vermeulen D, et al. Silicon photonic integrated circuit swept-source optical coherence tomography receiver with dual polarization, dual balanced, in-phase and quadrature detection. Biomed Opt Express, 2015, 6: 2562–2574
- 41 Xu K, Cheng Z Z, Wong C Y, et al. UWB monocycle pulse generation based on colourless silicon photonic integrated circuit. Electron Lett, 2013, 49: 1291–1292
- 42 Yi Y J, Wang H R, Liu Y, et al. Multilayer hybrid waveguide amplifier for three-dimension photonic integrated circuit. IEEE Photon Tech Lett, 2015, 27: 2411–2413
- 43 Zhong Q H, Tian Z B, Veerasubramanian V, et al. Thermally controlled coupling of a rolled-up microtube integrated with a waveguide on a silicon electronic-photonic integrated circuit. Opt Lett, 2014, 39: 2699–2702
- 44 Alekseyev L, Narimanov E, Khurgin J. Super-resolution imaging via spatiotemporal frequency shifting and coherent detection. Opt Express, 2011, 19: 22350–22357
- 45 Ashida Y, Ueda M. Precise multi-emitter localization method for fast super-resolution imaging. Opt Lett, 2016, 41: 72–75
- 46 Babcock H P, Moffitt J R, Cao Y L, et al. Fast compressed sensing analysis for super-resolution imaging using L1-homotopy. Opt Express, 2013, 21: 28583–28596
- 47 Beliveau B J, Boettiger A N, Avendano M S, et al. Single-molecule super-resolution imaging of chromosomes and in situ haplotype visualization using Oligopaint FISH probes. Nat Commun, 2015, 6: 7147
- 48 Carles G, Downing J, Harvey A R. Super-resolution imaging using a camera array. Opt Lett, 2014, 39: 1889–1892
- 49 Conkey D B, Caravaca-Aguirre A M, Dove J D, et al. Super-resolution photoacoustic imaging through a scattering wall. Nat Commun, 2015, 6: 7902
- 50 Darafsheh A, Guardiola C, Palovcak A, et al. Optical super-resolution imaging by high-index microspheres embedded in elastomers. Opt Lett, 2015, 40: 5–8
- 51 Darafsheh A, Limberopoulos N I, Derov J S, et al. Advantages of microsphere-assisted super-resolution imaging technique over solid immersion lens and confocal microscopies. Appl Phys Lett, 2014, 104: 061117
- 52 Dempsey G T, Vaughan J C, Chen K H, et al. Evaluation of fluorophores for optimal performance in localization-based super-resolution imaging. Nat Methods, 2011, 8: 1027–1036
- 53 Dong S Y, Horstmeyer R, Shiradkar R, et al. Aperture-scanning Fourier ptychography for 3D refocusing and superresolution macroscopic imaging. Opt Express, 2014, 22: 13586–13599
- 54 Du Y J, Zhang H, Zhao M Y, et al. Faster super-resolution imaging of high density molecules via a cascading algorithm based on compressed sensing. Opt Express, 2015, 23: 18563–18576
- 55 Duan Y B, Barbastathis G, Zhang B L. Classical imaging theory of a microlens with super-resolution. Opt Lett,

2013, 38: 2988 - 2990

- 56 Geissbuehler S, Sharipov A, Godinat A, et al. Live-cell multiplane three-dimensional super-resolution optical fluctuation imaging. Nat Commun, 2014, 5: 5830
- 57 Hao X, Liu X, Kuang C F, et al. Far-field super-resolution imaging using near-field illumination by micro-fiber. Appl Phys Lett, 2013, 102: 013104
- 58 Hardie R C, Barnard K J, Ordonez R. Fast super-resolution with affine motion using an adaptive Wiener filter and its application to airborne imaging. Opt Express, 2011, 19: 26208–26231
- 59 Izeddin I, El Beheiry M, Andilla J, et al. PSF shaping using adaptive optics for three-dimensional single-molecule super-resolution imaging and tracking. Opt Express, 2012, 20: 4957–4967
- 60 Jia S, Vaughan J C, Zhuang X W. Isotropic three-dimensional super-resolution imaging with a self-bending point spread function. Nat Photon, 2014, 8: 302–306
- 61 Kozawa Y, Kusama Y, Sato S, et al. Super-resolution imaging of lateral distribution for the blue-light emission of an InGaN single-quantum-well structure utilizing the stimulated emission depletion effect. Opt Express, 2014, 22: 22575–22582
- 62 Li L, Guo W, Yan Y Z, et al. Label-free super-resolution imaging of adenoviruses by submerged microsphere optical nanoscopy. Light-Sci Appl, 2013, 2: e104
- 63 Lu D L, Liu Z W. Hyperlenses and metalenses for far-field super-resolution imaging. Nat Commun, 2012, 3: 1205
- 64 Pan D, Hu Z, Qiu F W, et al. A general strategy for developing cell-permeable photo-modulatable organic fluorescent probes for live-cell super-resolution imaging. Nat Commun, 2014, 5: 5573
- 65 Piliarik M, Sandoghdar V. Direct optical sensing of single unlabelled proteins and super-resolution imaging of their binding sites. Nat Commun, 2014, 5: 4495
- 66 See C W, Hu F, Chuang C J, et al. Super-resolution imaging using proximity projection grating and structured light illumination. Opt Express, 2013, 21: 15155–15167
- 67 Sobieranski A C, Inci F, Tekin H C, et al. Portable lensless wide-field microscopy imaging platform based on digital inline holography and multi-frame pixel super-resolution. Light-Sci Appl, 2015, 4: e346
- 68 Tang H H, Liu P K. Long-distance super-resolution imaging assisted by enhanced spatial Fourier transform. Opt Express, 2015, 23: 23613–23623
- 69 Tang Y, Wang X, Zhang X, et al. Sub-nanometer drift correction for super-resolution imaging. Opt Lett, 2014, 39: 5685–5688
- 70 Wang F F, Lai H S S, Liu L Q, et al. Super-resolution endoscopy for real-time wide-field imaging. Opt Express, 2015, 23: 16803–16811
- Willets K A, Weber M L. Super-resolution imaging of surface-enhanced Raman scattering hot spots under electrochemical control. In: Proceedings of SPIE Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VII, 2015.
   9467
- 72 Wu K D, Wang G P. One-dimensional Fibonacci grating for far-field super-resolution imaging. Opt Lett, 2013, 38: 2032–2034
- 73 An Q, Jaramillo-Botero A, Liu W G, et al. Reaction Pathways of GaN (0001) Growth from Trimethylgallium and Ammonia versus Triethylgalliunn and Hydrazine Using First Principle Calculations. J Phys Chem C, 2015, 119: 4095–4103
- 74 Appavoo K, Liu M Z, Sfeir M Y. Role of size and defects in ultrafast broadband emission dynamics of ZnO nanostructures. Appl Phys Lett, 2014, 104: 133101
- 75 Appavoo K, Sfeir M Y. Enhanced broadband ultrafast detection of ultraviolet emission using optical Kerr gating. Rev Sci Instrum, 2014, 85: 055114

- 76 Cai Y, Han Z H, Wang X X, et al. Analysis of threshold current behavior for bulk and quantum-well germanium laser structures. IEEE J Sel Top Quant, 2013, 19: 1901009
- 77 Cai Z H, Narang P, Atwater H A, et al. Cation-mutation design of quaternary nitride semiconductors lattice-matched to GaN. Chem Mater, 2015, 27: 7757–7764
- 78 Chang H X, Cheng J S, Liu X Q, et al. Facile synthesis of wide-bandgap fluorinated graphene semiconductors. Chem-Eur J, 2011, 17: 8896–8903
- 79 Chen Q S, Jiang Y N, Yan J Y, et al. Modeling of ammonothermal growth processes of GaN crystal in large-size pressure systems. Res Chem Intermediat, 2011, 37: 467–477
- 80 Chu T, Ilatikhameneh H, Klimeck G, et al. Electrically tunable bandgaps in bilayer MoS2. Nano Lett, 2015, 15: 8000–8007
- 81 Claudel A, Chowanek Y, Blanquet E, et al. Aluminum nitride homoepitaxial growth on polar and non-polar AlN PVT substrates by high temperature CVD (HTCVD). Phys Status Solid C, 2011, 8: 2019–2021
- 82 Gulbahar B, Akan O B. A communication theoretical modeling of single-walled carbon nanotube optical nanoreceivers and broadcast power allocation. IEEE Tran Nanotech, 2012, 11: 395–405
- 83 Kang K, Xie S E, Huang L J, et al. High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity. Nature, 2015, 520: 656–660
- 84 Ko W, Lee S, Myoung N, et al. Solution processed vertically stacked ZnO sheet-like nanorod p-n homojunctions and their application as UV photodetectors. J Mater Chem C, 2016, 4: 142–149
- 85 Lashkarev G V, Shtepliuk I I, Ievtushenko A I, et al. Properties of solid solutions, doped film, and nanocomposite structures based on zinc oxide. Low Temp Phys, 2015, 41: 129–140
- 86 Li Z Y, Yuan X M, Fu L, et al. Room temperature GaAsSb single nanowire infrared photodetectors. Nanotechnology, 2015, 26: 445202
- 87 Majety S, Cao X K, Dahal R, et al. Semiconducting hexagonal boron nitride for deep ultraviolet photonics. In: Proceedings of SPIE Quantum Sensing and Nanophotonic Devices Ix, San Francisco, 2012. 8268: 1–8
- 88 Naeemullah, Murtaza G, Khenata R, et al. Phase transition, electronic and optical properties of NaCl under pressure. Mod Phys Lett B, 2014, 28: 1450062
- Nagar S, Chakrabarti S. P-type ZnO films by phosphorus doping using plasma immersion ion-implantation technique.
  In: Proceedings of SPIE Oxide-Based Materials and Devices IV, San Francisco, 2013. 8626: 1–8
- Nagar S, Sinha B, Mandal A, et al. Influence of Li implantation on the optical and electrical properties of ZnO film.
  In: Proceedings of SPIE Oxide-Based Materials and Devices II, San Francisco, 2011. 7940: 1–7
- 91 Nam S H, Boo J H. Rutile structured SnO2 nanowires synthesized with metal catalyst by thermal evaporation method. J Nanosci Nanotech, 2012, 12: 1559–1562
- 92 Nyawo T G, Ndwandwe O M. Reactive DC sputter deposition and charactersation of AlN thin films. In: Proceedings of SAIP2012: the 57th Annual Conference of the South African Institute of Physics, Pretoria, 2012. 180–185
- 93 Okell W A, Witting T, Fabris D, et al. Temporal broadening of attosecond photoelectron wavepackets from solid surfaces. Optica, 2015, 2: 383–387
- 94 Ou H Y, Ou Y Y, Argyraki A, et al. Advances in wide bandgap SiC for optoelectronics. Eur Phys J B, 2014, 87: 58
- 95 Park J S, Lee J M, Hwang S K, et al. A ZnO/N-doped carbon nanotube nanocomposite charge transport layer for high performance optoelectronics. J Mater Chem, 2012, 22: 12695–12700
- 96 Park S H, Yuan G, Chen D T, et al. Wide bandgap III-Nitride nanomembranes for optoelectronic applications. Nano Lett, 2014, 14: 4293–4298
- 97 Park Y S. Wide bandgap III-Nitride semiconductors: opportunities for future optoelectronics. Opto-Electron Rev, 2001, 9: 117–124

- 98 Sang N X, Beng T C, Jie T, et al. Fabrication of p-type ZnO nanorods/n-GaN film heterojunction ultraviolet light-emitting diodes by aqueous solution method. Phys Status Solid A, 2013, 210: 1618–1623
- 99 Tan H, Fan C, Ma L, et al. Single-crystalline InGaAs nanowires for room-temperature high-performance near-infrared photodetectors. Nano-Micro Lett, 2016, 8: 29–35
- 100 Tournier D, Brosselard P, Raynaud C, et al. Wide band gap semiconductors benefits for high power, high voltage and high temperature applications. Adv Mater Res-Switz, 2011, 324: 46–51
- 101 Ullah N, Ullah H, Murtaza G, et al. Structural phase transition and optoelectronic properties of ZnS under pressure. J Optoelectron Adv M, 2015, 17: 1272–1277
- 102 Weiss N O, Zhou H L, Liao L, et al. Graphene: an emerging electronic material. Adv Mater, 2012, 24: 5782–5825
- 103 Wen Z, Luo J S, Zhu Y F, et al. Cohesive-energy-resolved bandgap of nanoscale graphene derivatives. Chemphyschem, 2014, 15: 2563–2568
- 104 Zeggai O, Ould-Abbas A, Bouchaour M, et al. Biological detection by high electron mobility transistor (HEMT) based AlGaN/GaN. Phys Status Solid C, 2014, 11: 274–279
- 105 Zhou M, Duan W H, Chen Y, et al. Single layer lead iodide: computational exploration of structural, electronic and optical properties, strain induced band modulation and the role of spin-orbital-coupling. Nanoscale, 2015, 7: 15168–15174

# Optoelectronic devices and integration technologies

Ninghua ZHU<sup>1\*</sup>, Ming  $LI^1$  & Yue HAO<sup>2</sup>

 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
 School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710126, China

\*E-mail: nhzhu@semi.ac.cn

**Abstract** Optoelectronics integration technology has several outstanding advantages, including low power consumption, high speed, high reliability, and small size. It is well known as one of the key technologies to break through the bottlenecks of current information networks, such as bandwidth, power consumption, and intelligence. In this paper, we review recent advances in China on optoelectronic devices and integration technology, and its applications in the fields of optical communication and information processing, ultrahigh resolution imaging and display, and wide-band gap optoelectronic device. In addition to recent progress, the current research situation, experiences, and infrastructure associated with optoelectronics integration technology are also presented. The main research directions and the contents of optoelectronic devices and integration technology are also analyzed in detail with a view towards forward development in the next five years.

**Keywords** optoelectronic device, photonic integrated circuit, wide-band gap semiconductors, silicon photonics, hybrid integration



Ninghua ZHU received B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electronic engineering from the University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China, in 1982, 1986, and 1990, respectively. He is currently a professor at the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing, China. In 1998, he was with the Hundred-Talent Program, CAS, and was selected by the National

Natural Science Foundation as a Distinguished Young Scientist. He founded the Joint Photonics Research Laboratory between the Institute of Semiconductors, CAS, and the City University of Hong Kong in 1998, where he has served as deputy director. His research interests include modeling and characterization of integrated optical waveguides and coplanar.



Ming LI received a Ph.D. degree in electrical and electronics engineering from the University of Shizuoka, Hamamatsu, Japan, in 2009. In 2009, he joined the Microwave Photonics Research Laboratory, School of Electrical Engineering and Computer Science, University of Ottawa, Ottawa, ON, Canada, as a post-doctoral research fellow. In 2011, he joined the Ultrafast Optical Processing Group under the su-

pervision of INRS-EMT, Montreal, Canada, as a post-doctoral research fellow. In 2013, he joined the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, as a full professor, with the support of the Thousand Youth Talents program. He has authored over 150 high-impact journal and international conference papers. His current research interests include integrated microwave photonics and its applications, ultrafast optical signal processing, and arbitrary waveform generation.



Yue HAO was born in Chongqing in 1958. He received a Ph.D. degree in computational mathematics from Xi'an Jiaotong University in 1991. Currently, he is the vice president of Xidian University. His research interests include new-type wide-forbidden-band semiconductor materials and devices, micronanometer semiconductor devices, reliability of ultra-deep submicron small-

sized devices, and SoC design and its design methodology. He is a member of the Chinese Academy of Sciences, a senior member of IEEE, executive director of the Chinese Association of Electronics, chair of the executive councils of the Shaanxi Provincial Association of Electronics, the Trade Association of Integrated Circuits, and the Shaanxi Provincial Semiconductor Illumination Association.