



光纤通信有源器件的发展现状

王启明¹, 赵玲娟², 朱洪亮², 韩勤¹, 成步文¹

- (1. 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 100045;
2. 中国科学院半导体研究所中国科学院半导体材料科学重点实验室, 北京 100045)

摘要: 光纤通信技术的飞速发展使其成为当今信息社会的重要支柱。其发展的基石是有源和无源半导体光电子器件。综述了几种主要的有源光电子器件的研究现状及其发展趋势, 包括高速调制 DFB 激光器及其集成芯片、EDFA 泵浦源用 980 nm 半导体高功率激光器、化合物半导体光电探测器、硅基长波长光电探测器等。

关键词: 光纤通信; 有源器件; DFB 激光器; 泵浦激光器; 光电探测器; 雪崩光电探测器

中图分类号: TN36

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016141

Progress in active devices for optical fiber communication

WANG Qiming¹, ZHAO Lingjuan², ZHU Hongliang², HAN Qin¹, CHENG Buwen¹

1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100045, China
2. Key Laboratory of Semiconductor Materials, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100045, China

Abstract: The rapid progress of optical fiber communication makes it become the key technology for the information society. The active and passive optoelectronic devices are the foundation of the optical communication. The progress and development trend of the key active optoelectronic devices were reviewed, including DFB laser, photonic integrated circuit, 980 nm high power laser for EDFA pumping, compound semiconductor photodetector and Si-based long wavelength photodetector.

Key words: optical fiber communication, active device, DFB laser, pumping laser, photodetector, avalanche photo diode

1 引言

自从 1966 年高锟(Charles K Kao)博士提出石英光纤可以作为光传输介质以后,研制和开发光纤通信有源半导体光子器件的工作,如雨后春笋大量涌现。其中,用于光纤低损耗窗口传输的激光器,从 0.85 μm 处的 GaAs/AlGaAs 短波长多模激光器,发展到了 1.3 μm 和 1.55 μm 处的 InGaAsP/InP 分布反馈(DFB)长波长单模激光器,时至今日,随着有源光

子阵列与无源光波导、光合波分波器的单片集成芯片的实现,开创了以光子集成电路(PIC)为核心的光网新时代。

在光网中实现对光载波产生、调制、放大和检测功能的器件,主要包括激光器、光调制器、光放大器、光接收器和波长变换器等。DFB 激光器和电吸收调制激光器(EML)是当今波分复用(WDM)光纤通信网络系统中不可或缺的关键器件,广泛应用于 2.5 Gbit/s、10 Gbit/s、25 Gbit/s 和 100 Gbit/s(4×25 Gbit/s)的光网系统中。

光通信激光源的突破口首先是石英光纤的第1个低损耗窗口即0.85 μm 短波长处。20世纪70年代初,采用液相外延技术,在GaAs基同质外延基础上,利用AlGaAs的高异质势垒,有效地阻挡住了GaAs有源区载流子的泄漏,同时又对传输光起到了空间限制的波导功能,研制成功GaAs/AlGaAs异质掩埋结构(BH)激光器,开拓了短距离光通信应用领域。

针对石英光纤的第2个低损耗窗口同时也是零色散的1.31 μm 激光器以及更低损耗的第3个窗口的1.55 μm 波长激光器的强烈需求,美国华裔学者谢肇金采用InGaAsP/InP材料体系和液相外延技术,在20世纪70年代末首先研制出用于光通信的长波长激光器。光纤通信开始从0.85 μm 波段向1.31 μm 和1.55 μm 波段迈进。80年代,分子束外延(MBE)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)等薄层量子阱超晶格生长技术取得了突破,多量子阱(MQW)以及应变MQW结构器件的制作成为现实,至80年代中期,含布拉格光栅的长波长DFB单模MQW激光器研制成功,长途光纤通信干线网开始建设。90年代,2.5 Gbit/s和10 Gbit/s的高速直调DFB激光器(DML)以及集成了外调制器的电吸收调制激光器(EML)都在商业上取得了快速发展,从而在20世纪末21世纪初将光纤通信事业推到了一个前所未有的高度。进入21世纪后,随着人们对信息量的无限追求,波分复用(WDM)、时分复用(TDM)以及纤分复用(FWDM)等Tbit/s甚至10 Tbit/s的超大容量光纤通信系统迅速发展,单纤单信道传输码率已突破了10 Gbit/s的门槛,向着更高速率的20~40 Gbit/s方向迈进。而高稳频宽带可调谐、高功率、无制冷DFB激光器的实现及其多路阵列集成、与无源合波/分波器集成以及与硅基混合集成的发展,对构建以多路复用为基础的实用化的Tbit/s级超大容量光通信系统做出了关键性的重大贡献。下面将简单介绍相关方面的最新发展。

2 光通信系统中宽带光载波的DFB激光器

2.1 光纤干线和网络中的高速率光载波激光器

时至今日,通信与网络干线系统中普遍使用的光载波激光器仍然是以InGaAsP/InP应变量子阱材料系为代表。量子阱的采用提高了有源材料的增益系数,降低了器件阈值电流和温度敏感性。而压应变的引入可使轻重空穴带分离,价带顶重空穴能级上升,轻空穴能级下降,增加了TE模的增益,降低了阈值电流密度,提高了微分增益系数,进而

也有利于提高张弛振荡频率和调制速率。之前20 Gbit/s以下系统中光载波对信息的载入是通过激光器的注入电流直接调制来实现的。但调制速率受激光器固有的张弛振荡的限制,一般只能达到25 Gbit/s,而传输距离又受激光器啁啾和光纤色散的影响,一般10 Gbit/s信号传输距离只能达到20 km。高速率以及更长距离的传输需要采用外调制技术。InGaAsP/InP量子阱材料中的带边激子吸收峰对入射光波的吸收存在强烈的调制效应,峰位随反偏电场移动,响应时间快达ps级别,可以研制出反偏工作的低功耗高速率电吸收光调制器(EAM),并且在工艺上很容易与DFB光源实现单片集成,成为电吸收调制DFB激光器(EML),信息载入则通过EAM实现。通过采用聚酰亚胺垫高电极或者行波电极方式,降低电回路的RC时限限制,提高调制带宽,EAM的调制带宽达到了30~40 GHz。中国科学院半导体研究所采用的选区外延(SAG)技术研制出调制速率达32 Gbit/s的EML,静态消光比达到30 dB,动态消光比达到8 dB。为了实现DFB和EAM的分别优化,随后开发出的选择区域外延双有源叠层(SAG-DSAL)技术^[1],吸收了对接生长技术、SAG和双有源叠层(DSAL)技术的优点,以单次外延多有源层替代多次外延的单片集成技术,外延生长出电吸收调制器(EAM)和激光器(LD)双有源区多量子阱波导层结构,如图1(a)所示,研制出了阈值为20 mA、输出功率10 mW和消光比为15 dB的EML管芯,如图1(b)所示。该技术还可进一步拓展实现单次外延多有源区与无源波导材料的集成,对提高集成器件成品率和降低芯片成本做出了贡献。

2.2 波分复用和路由寻址的多波长和宽带可调谐DFB集成激光器

波分复用(WDM)是实现超大容量信息传输的最重要的途径。实用化的单信道传输码率为40 Gbit/s,对此,1个10 Tbit/s的传输干线就必须由250个不同波长的单信道复用来实现。通过阵列波导光栅复用器AWG把诸多信道光聚集有效耦合到单一的单模光纤中进行传输。但从工艺上要制作出模距严格一致的波长各异的众多激光器难度极大。因此需要发展一种波长可适度调谐的DFB激光器,通过调谐实现模匹配需求,它也是下一代波长寻址接入网系统中的关键器件。国内外均有报道,采用DFB或分布布拉格(DBR)多段式激光器、取样光栅(SG)DBR激光器、超结构光栅(SSG)DBR激光器等可以实现不同波长范围的调谐。日本富士通报道,可调双波导(TTG)DFB激光器^[2]可以

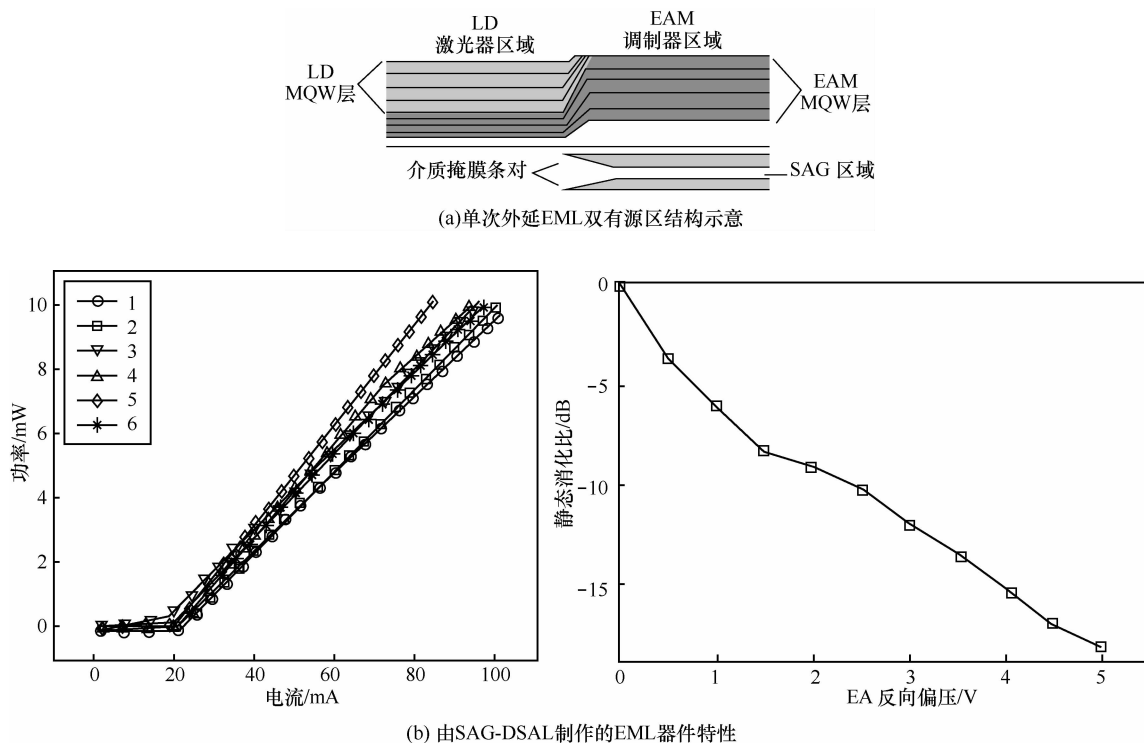


图1 选择区域外延双有源叠层(SAG-DSAL)技术制作的 EML 器件

实现连续无跳模的波长调谐。如图 2(a)所示,这种器件为纵向 PNP 结构,上部 PN 结含有源 MQW 波导,可提供稳定的增益;下部 NP 结包含 DFB 光栅和调谐(tuning)波导层,可通过注入电流改变有效折射率。工作中 TTG-DFB 激光器的光栅布拉格反射峰与激光谐振腔纵模变化始终同步,从而能实现无跳模宽波长范围(8 nm)的调谐,如图 2(b)所示。

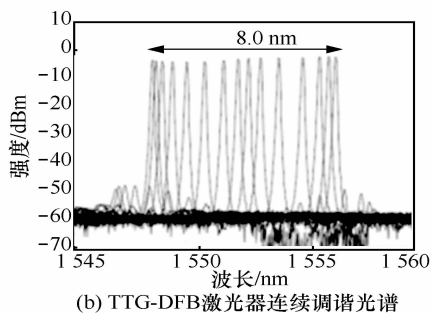
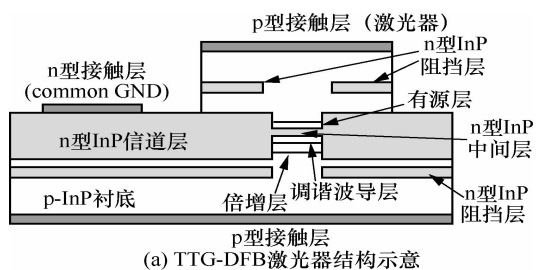


图2 可调双波导(TTG)-DFB 激光器

可调谐分布放大 (TDA)-DFB 激光器亦能实现连续无跳模的波长调谐^[3],其结构如图 3(a)所示。尽管这种器件具有多段式结构,但只有两个正面电极。通过有源段和调谐段波导层的交叉分布,布拉格反射峰和纵模光谱可以保持同步,从而避免激光模式的跳变。图 3(b)为 6 信道 TDA-DFB 激光器阵列与半导体光放大器 (SOA) 集成后获得的 110 个频率信道光谱(间隔为 50 GHz),每个 TDA-DFB 激光器的连续可调波长范围达到 7.5 nm。

2.3 窄线宽高稳频高功率 DFB 集成激光器

时分复用(TDM)技术是从光频域的不同初始相位上提取出多路载波光束,每路光束可分别独立地载入传输信息。把这些光束汇集输入传输光纤中,达到复用的目的。也可以缓解单一波分复用对激光器制作的苛刻要求,诸如放宽模距的调控精度等,因而也是实现超大容量信息传输的重要途径。一般单模光纤传输的入纤光功率为 3~5 mW,如果引入 10 个信道的时分复用,则对光载波激光器的光功率输出至少应达 500 mW 以上。早期有用 DFB 激光器与半导体光放大器(SOA)的单片集成来实现,但成品率低、代价高。中国科学院半导体研究所的团队采用大光腔结构和非对称结构以及较长的腔长,配合采用较低耦合系数的 DFB 光栅实现了 600 mW 的光输出,又改善了光束

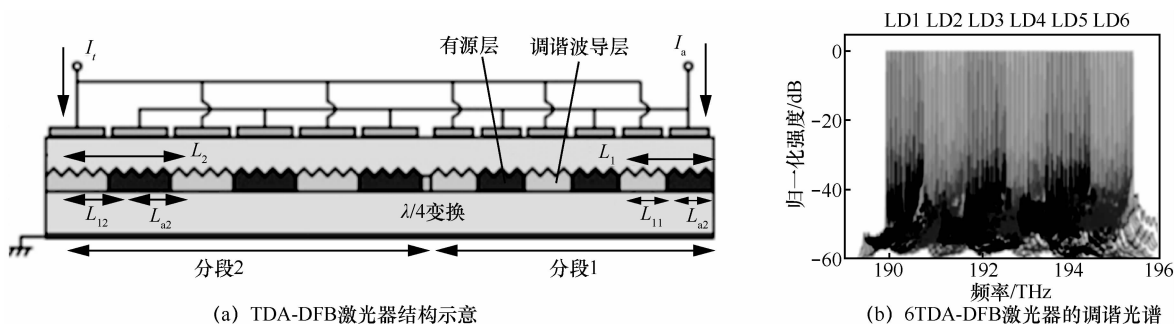


图3 可调谐分布放大(TDA)DFB激光器

质量,压窄了线宽,能够满足 TDM 应用的要求,同时在以空分接入的光网络终端系统中已得到实际应用。

2.4 多波长信道 DFB 载波激光器阵列模块化集成

实用化的波分复用系统中诸多激光源在时域中的高稳定性非常重要,同时它也是光通信系统硅基化光电混合集成的基础,已成为近些年来光子集成发展的热点。美国 Infinera 公司的光发射 PIC 芯片^[4]最具代表性,如图 4 所示为该公司成功开发的 1.6 Tbit/s 速率的 40 信道、每个信道满足 40 Gbit/s 码率的 WDM PIC 发射芯片结构及输出光谱。其结构中既包括有源器件,如可调谐 DFB 激光器、EAM、SOA 和 PD,也包括无源器件如弯曲波导(S-bend)、

阵列波道光栅(AWG)和模斑转换器(SSC)等 241 个元件。

国内 PIC 的工作起步较晚,直至 2014 年,中国科学院半导体所才报道了 100 Gbit/s EML PIC 发射芯片^[9]。如图 5 所示,该芯片为 10 个 10 Gbit/s 码率的 EML 与多模干涉耦合器(MMI)的集成,为使输出波长匹配于国际电信联盟(ITU)的要求,在每个激光器旁制作了 Ti 电阻波长调节器。整个 PIC 芯片包含的元件数为 31 个。难能可贵的是,该多波长阵列芯片是采用廉价的全息曝光光栅技术实现的。

同年,该研究所还首次报道了能让各个信道的波长间隔适用于 DWDM 系统用的 SAG 上波导限制层 (USCH)新

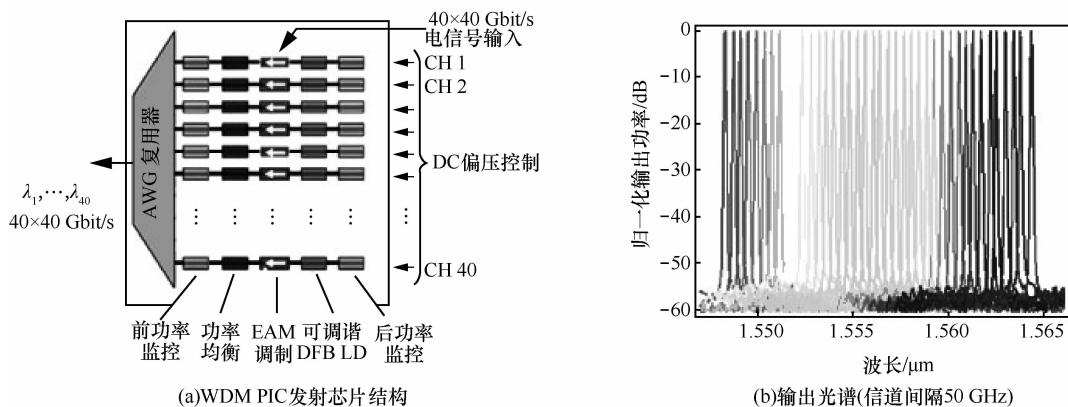


图4 1.6 Tbit/s 速率的 40 信道 WDM PIC 发射芯片

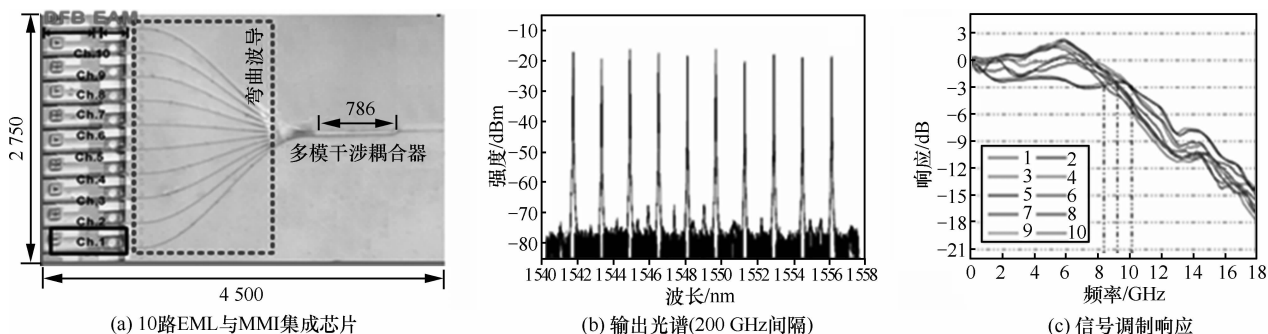


图5 100 Gbit/s 速率的 10 信道 EML PIC 发射芯片



技术,图 6(a)即该技术的原理示意,图 6(b)为由 SAG-USCH 技术在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段实现的波长间隔分别为 $0.2\ \text{nm}$ ($25\ \text{GHz}$)、 $0.4\ \text{nm}$ ($50\ \text{GHz}$) 和 $0.8\ \text{nm}$ ($100\ \text{GHz}$) 的多波长 DFB 激光器阵列光谱,亦采用全息曝光光栅技术完成。华中科技大学和光迅联合利用纳米压印和对接生长技术,在 2015 年研制出了 16 路 DFB 激光器阵列与 AWG 集成芯片,通道间隔为 $200\ \text{GHz}$ 。

3 中继放大器 (EDFA) 泵浦源用 $980\ \text{nm}$ 半导体高功率激光器

在光通信系统中,其损耗是限制光纤通信距离的主要原因之一。光放大器的应用,避免了光—电—光的转换时延太长和系统的复杂性,若用光放大器级连放大,传送距离还可更远。至今为止,成功研制的光放大器主要有喇曼光纤放

大器、半导体光放大器、EDFA (erbium-doped amplifier, 掺铒光纤放大器)。其中,EDFA 是光纤传输技术最突出的成就之一,是激光通信技术和光纤制造技术巧妙结合的产物,在光纤和光通信领域中得到了迅速而广泛的应用。在 $980\ \text{nm}$ 泵浦作用下,EDF (掺铒光纤) 的激光发射为三能级系统跃迁机制,参与工作的有 3 个能级: E_1 、 E_2 和 E_3 。在 E_1 和 E_3 能级之间通过受激吸收进行光泵浦,泵浦波长由 E_3 和 E_1 的能级差决定,受激吸收激发到 E_3 能级的电子,经弛豫到 E_2 能级后回到 E_1 能级发出 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长激光。因此 $980\ \text{nm}$ 泵浦激光器成为 EDFA 中除 EDF (掺铒光纤) 外最为重要的器件。20 世纪 80 年代末、90 年代初, InGaAs 应变量子阱的出现使 InGaAs 量子阱激光器得到飞速发展,成为制作半导体激光器最佳的材料体系,迄今为止大功率半导体激光器各方面性能的纪录,如最大功率、最高效率、最长

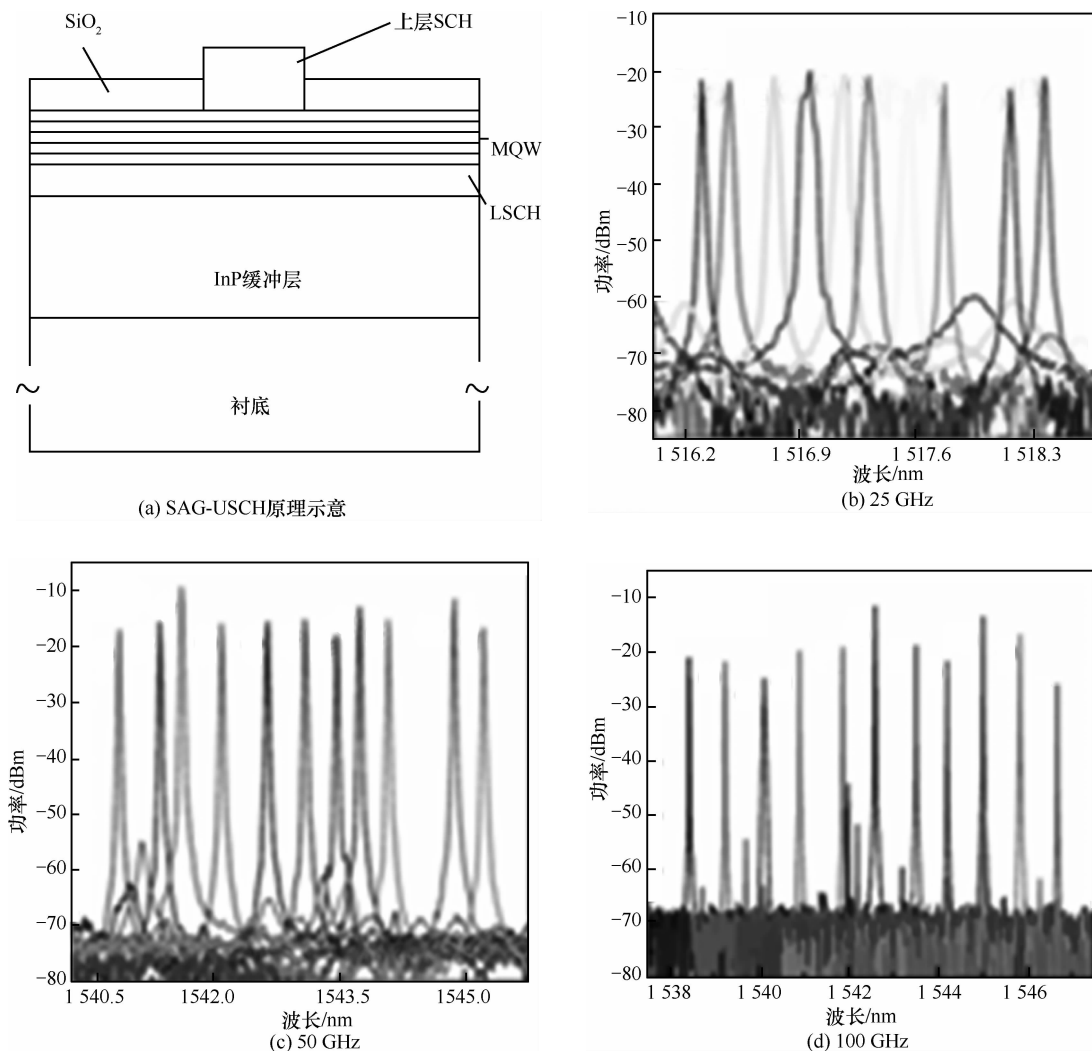


图 6 选择区域外延上波导限制层(SAG-USCH)技术

寿命等都由 InGaAs 保持。用于泵浦 EDFA 的 980 nm 大功率单模激光器同样有着非常优良的性能,并随着半导体量子阱材料生长技术、激光器芯片技术及封装技术的逐步完善,长寿命的 980 nm 激光器已非常成熟,国际上研制、生产大功率 980 nm 半导体激光器的公司主要有 Lumentum (原 JDSU 光器件部分)、3S Photonics、Oclaro、Furukawa 等。目前,国外已经有输出功率达到 1.05 W 的 980 nm 单模大功率光纤光栅泵浦源半导体激光器产品出售。图 7 为 3S Photonics 公司 14 pin 带制冷 1 050 mW 980 nm 泵浦激光器模块和 Lumentum 900 mW 14 pin 980 nm 泵浦激光器模块,二者均使用 fiber Bragg grating 锁定发射波长。

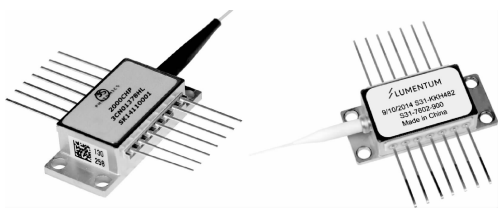


图 7 3S Photonics 公司 14pin 带制冷 1 050 mW 980 nm 泵浦激光器模块和 Lumentum 900 mW 14pin 980 nm 泵浦激光器模块

国内用于 EDFA 的 980 nm 大功率单模激光器的研究开始于 20 世纪 90 年代初,研究单位主要包括中国科学院半导体研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、武汉邮电科学研究院、北京工业大学、长春理工大学以及清华大学电子工程系等。其中,由清华大学电子工程系与中国科学院半导体研究所、武汉邮电科学研究院两个团队共同承担的“863”计划的相关重点项目——掺铒光纤放大器用 980 nm 半导体激光泵浦源,该项目中的尾纤输出功率最高值在 100~200 mW。目前国内 980 nm 半导体激光器尚无可靠的产品,与国外发达国家相比,还存在较大的差距,需要进一步加快成果转化。

980 nm 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 由于受到光纤激光器、固体激光器泵浦、激光显示等重要应用的牵引,其研究得到快速的发展。2001 年德国 UIm 大学采用大直径 (320 μm) 器件实现单管连续 890 mW,19 个直径 80 μm 器件列阵实现连续 1.4 W (相当于功率密度 1 kW/cm^2) 和纳秒窄脉冲 10 W 的光输出^[6]。美国加州大学采用 1 000 个直径 45 μm 的列阵实现脉冲 5 W 输出^[7]。2003 年美国 Novalux 公司利用连续 1 W 输出的 980 nm 垂直腔面发射激光器,通过腔内倍频获得了 42 mW 的蓝光高功率输出。美国 Sandia 国家实验室光泵浦垂直腔单管器件,实现 980 nm

波长输出,脉冲功率达到 4.4 W。

在国内,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在高功率 980 nm VCSEL 方面做了很多的研究工作,并取得系列突破性和国际先进的成果。2003 年采用 3 个应变补偿的 InGaAs/GaAsP 量子阱为有源区得到高性能的 987 nm VCSEL^[8];口径为 430 μm 的器件室温连续输出超过 1.5 W,激光峰半高宽仅为 0.8 nm,瓦级输出器件远场发散角低于 10°,特征温度超过 220 K。随后优化器件结构和工艺,将 0.98 μm 面发射半导体激光器的输出功率刷新到 1.95 W,脉冲输出 10.5 W,是当时国内外报道中的最高水平^[9]。2009 年研制出连续输出超过 2.5 W 的单管 (效率 20%) 和脉冲输出达到千瓦的高密度集成阵列^[10]。

4 光载波信息检测的半导体光—电接收器

基于 InGaAs/InP 材料体系的半导体光电检测器,以其精准的晶格匹配度以及直接带隙 In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料的高吸收系数,是光纤通信系统理想的检测器材料。

4.1 PIN 型光电检测器

在检测器系列中,PIN 型光电检测器是研究最为成熟以及商用最广泛的检测器,其器件结构由宽带隙 P 型和 N 型 InP 材料构成,中间 I 层为窄带隙 In_{0.53}Ga_{0.47}As 光吸收层。光吸收层为本征层,承受着 PN 结间的电场,光生载流子以饱和速度漂移并被两端电极分别收集。PIN 检测器具有制备工艺简单、量子效率高、暗电流低的特点。

PIN 检测器一般为面入射型,为了保证高量子效率而需要生长较厚的吸收层,因而其带宽受到限制,这是所有面入射器件不可避免的量子效率与带宽的相互制约关系。波导型检测器将光传输吸收与载流子的输运有效分离,能够很好地解决这种制约关系,在满足高响应度的同时还可以有效地减小器件的尺寸,降低器件电容及工作电压,利用这种结构可以实现微小电容结构的高响应器件,同时其侧面入的光结构使其非常适合于平面集成,为实现高度集成的高速光子学系统提供了一种很好的探测解决方案。1991 年,Kato K 等人^[11]为了增加波导检测器端面与光纤的耦合效率,提出了一种多模光波导结构,对入射 1.55 μm 波长获得了 68% 的量子效率,3 dB 带宽达到了 40 GHz。2002 年,Demiguel S 等人^[12]报道了一种带有 20 μm 长的平面多模波导结构的倏逝波耦合波导检测器,获得了 1.02 A/W 的响应度、48 GHz 的带宽以及 11 mA 的饱和电流。2005 年德国弗劳恩霍夫研究所的 Beling A^[13]报道了一种倏逝波耦



合 PIN 型波导探测器,如图 8 所示。在稀释波导之上构建一个 $2\ \mu\text{m}$ 宽的脊型单模波导结构,光通过单模波导传入向外延伸的光学匹配层中,继而进入 PIN 台面有源区被吸收。器件的响应度达到 $0.5\ \text{A/W}$, $3\ \text{dB}$ 带宽主要受到渡越时间的限制,达到 $120\ \text{GHz}$ 。

国内也多有对 InP 基波导探测器的研究,2013 年中国科学院半导体所报道了一种高线性度的倏逝波耦合波导探测器, $3\ \text{dB}$ 带宽达到 $40\ \text{GHz}$, 线性响应输出光电流超过 $20\ \text{mA}^{[14]}$; 2015 年报道了基于此种倏逝波耦合波导探测器的 $10\times 20\ \text{GHz}$ 的探测器阵列^[15]。

4.2 高饱和功率高速检测器

随着光纤通信网络的快速发展,人们不仅需要大量数据的快速传输,还希望能够随时随地通过无线网络传输大容量数据。光载微波通信(radio over fiber, RoF)技术的提出有效解决了多频段快速无线传输的问题,同时大大提高了信号覆盖能力,由于微波终端发射的是模拟信号,从覆盖面和保真度考虑,对光接收器件提出了新的要求——高饱和和光功率的宽带检测器。

以接收端光电检测器为例,无论是传统 PIN 结构还是高灵敏度的 APD 结构,随着入射光功率的不断增加,光电流会很快达到饱和值,而不再随着光功率线性增加。其主要原因是耗尽区内的空间电荷屏蔽效应:当耗尽区内(APD 结构中的倍增区)的光生载流子数量不断增长至超过背景掺杂时,载流子无法完全迅速被收集,因此逐渐在耗尽区内堆积(尤其是漂移速度较慢的空穴)并改变暗场时的电场分布,从而导致耗尽区电场被严重屏蔽,载流子漂移速度下降,器件响应度随即下降。

为减缓空间电荷屏蔽效应的影响,日本 NTT 电子实验

室^[16]首次提出了“单载流子”光电检测器(uni-traveling-carrier photodiode, UTC-PD)结构,其能带结构如图 9 所示。该结构改变了传统 PIN 结构中的能带结构,调换本征区与 P⁺区的材料,将本征区换成宽带隙 InP 材料,而 P⁺区采用光吸收材料 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 。光生载流子直接产生于 P⁺区,空穴不再经过耗尽的本征区而直接被 P 电极收集,只有电子漂移扫过本征区(收集区)。利用电子较高的漂移速度,甚至是过冲速度($2.0\times 10^7\ \text{cm/s}$),可以有效减缓载流子在本征区内的堆积,从而实现较高的饱和光功率。

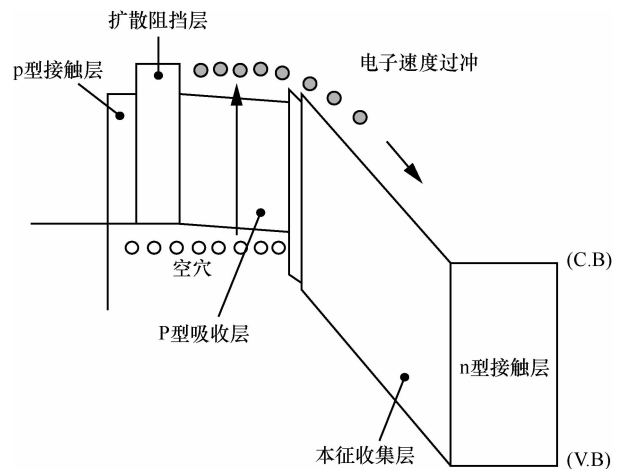


图 9 单载流子探测器能带示意

如何在保证带宽的前提下,提高 UTC 结构的响应度与饱和光功率是人们的主要研究方向。虽然加宽吸收区厚度可以提高光吸收效率,但由于光生电子需由扩散通过 P⁺吸收区到达收集区边界,过厚的吸收区宽度会大大增加电子的渡越时间,导致带宽下降。研究人员随即提出 P⁺区渐

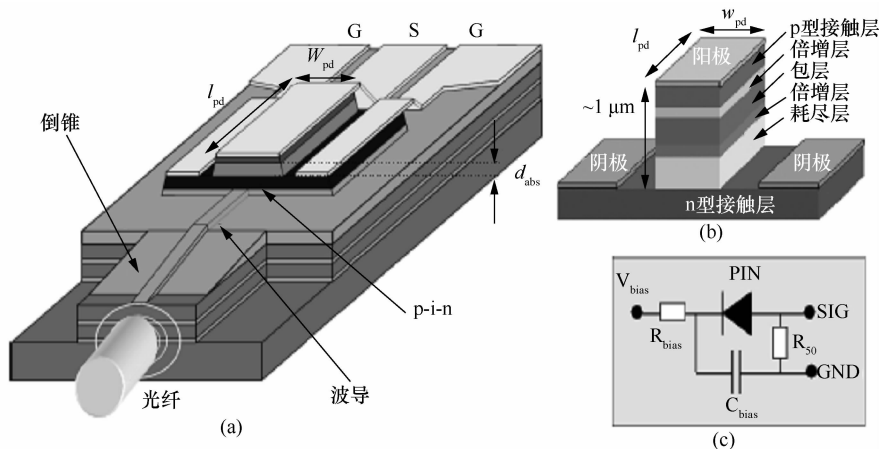


图 8 倏逝波耦合波导检测器示意

变掺杂的方法,制造出吸收区内价带的倾斜,使电子从单纯的扩散方式转为扩散—漂移联合运动方式,从而减小了吸收区内的渡越时间。在此基础上,美国维吉尼亚大学 Joe C Campbell 研究小组对 UTC 结构做出了改进,在 P+吸收区与收集层间加入一层本征或低掺杂的 InGaAs 吸收区与 N 型 InP 薄层,一方面通过加厚吸收层提高器件响应度,同时利用 N 型包层在本征吸收层中制造一个 P-N 结,反向电场使电子能快速通过该区域到达收集区边界。利用该方法,他们实现了饱和光电流为 134 mA、带宽为 20 GHz 的面入射 UTC-PD,其响应度高达 0.82 A/W。2014 年,他们采用级联方式集成 4 个相位匹配的 UTC-PD,并采用倒装封装散热衬底的方式,研制出 48 GHz 下 350 mA 饱和光电流的检测器阵列^[17]。

另一种改进方法是由中国台湾中央大学吴衍祥研究小组^[18]提出的“近弹道运输”(near-ballistic)UTC 结构。他们在收集区中插入一 P 型薄层,将收集区分隔成两部分,一部分是靠近收集区的低场区(弹道输运层);另一部分是靠近 N⁺接触的高场区(电场承受层)。通过调节两部分的电场强度,可实现电子以过冲速度扫过低场区域,从而进一步降低渡越时间,如图 10 所示。他们于 2012 年报道了在 110 GHz 带宽下饱和光电流 37 mA 的器件性能^[19]。

2013 年,清华大学报道了一种“背对背”式 UTC 结构,将两个 UTC 结构在 N 接触层背靠背对接,呈现出“PINIP”的掺杂结构,通过上下两个 P 接触与中间 N 接触实现两部分 UTC 结构同时探测的工作方式,在不牺牲带宽的前提下大幅提高了响应度。研究结果表明在 24 GHz 带宽下、饱和电流 62 mA 时,响应度可达到 0.86 A/W^[20]。

4.3 雪崩光电二极管

雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD)是一种高灵敏度的检测器结构。它通过载流子与晶格的碰撞电离效应引入内增益机制,使器件灵敏度大大提高,平均比 PIN 检测器高 5~10 dB。用于光纤通信接收器的 APD 通常工作于线性模式,此时倍增区的电势在击穿 VB 电压以下,一般具有十几到几十的增益。在器件结构上,早期 APD 采用同质结构,这种结构由于吸收和倍增均发生窄带材料,在高电场情况下,会产生很大的隧穿电流,使得器件性能难以提高。为了解决这一问题,人们提出了一种新型结构,即 SAM(separated absorption and multiplication)APD 结构,如图 11 所示。在这种结构中吸收区和倍增区相互分离,雪崩倍增发生在宽带隙材料中,而吸收则在窄带隙材料中完成,吸收区电场较小,产生的隧道电流也较小,从而达到降低暗电流的目的。为了进一步调节吸收层和增益层的电场分布,在器件设计中又引入了电荷层,发展了 SACM(separated absorption charge multiplication)结构,大大提高了器件各方面的性能。

对线性模式 APD 的研究主要围绕通过改善器件结构和材料降低过剩噪声及增加增益—带宽积两方面。从外延层的电学结构上讲,为降低吸收区和倍增区异质结界面处载流子的堆积从而提高器件带宽,通常需加入 InGaAsP 层平滑异质结处能带结构(SAGM)。另外,通过在倍增区中加入电荷层,可以更加灵活地调节器件内电场分布(SAGCM),使电场集中在倍增区中,同时保证吸收区的电场强度满足载流子高权重漂移的要求。从器件结构上,也可以采用平面型器件结构以降低暗电流。进一步地,为了降低扩散掺杂带来的边缘击穿效应,人们又在提出了两步扩散、刻蚀

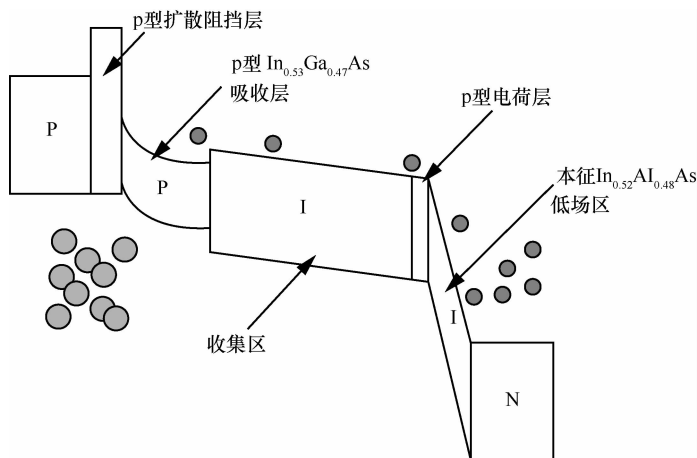


图 10 近弹道运输 UTC 能带示意

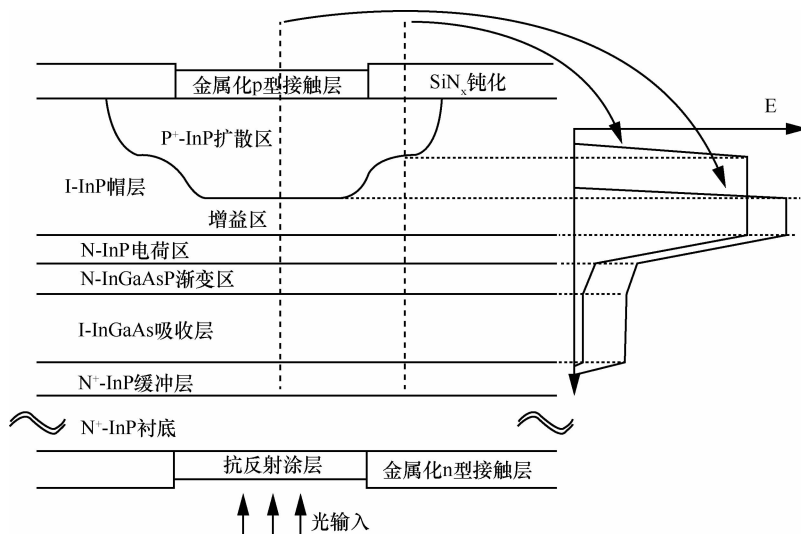


图 11 分离吸收过渡电荷倍增雪崩光电检测器外延结构示意图

坑与浮动扩散保护环等平面结构。2003 年韩国世宗大学^[21]报道了采用刻蚀坑与浮动扩散保护环相结合的平面型 SAGCM-APD 器件, 获得了 80 GHz 的增益—带宽积和约 10 GHz 的最大带宽。

由于 APD 的噪声和带宽在倍增材料 k 值 (低电离率载流子与高电离率载流子的电离率比值) 越低时性能越优, 而 InP 相对较高的 k 值制约了 100 GHz 以上的增益—带宽积。随即, 人们提出用 In_{0.52}Al_{0.48}As 材料作为低 k 值的倍增层代替 InP 材料。2010 年阿尔卡特朗讯与泰雷兹联合实验室 III-V 实验室报道了平面型 InAlAs 倍增层的 APD 器件, 获得了 11.8 GHz 的最大带宽和 240 GHz 的增益—带宽积, 其单位增益下的外量子效率高达 0.73, k 值在 0.13~0.15^[22]。

为进一步降低过剩噪声, 人们开始改善倍增区的结构, 通过将宽、窄带隙材料相间的异质结构作为倍增区能带结构。载流子在宽带隙材料中不发生雪崩倍增, 但可以积累较高的能量, 以便在窄带隙材料中能够迅速引发碰撞电离, 从而降低碰撞电离在空间上的不均匀性。这种设计被称为碰撞电离 (impact ionization engineering, I₂E) 设计原理, k 值可低到 0.1^[23]。

线性模式的 APD 器件是光接收机中常用的检测器类型, 如何改善其性能的研究一直未停下脚步。其本质是如何在保证一定增益下获得尽量高的带宽以及尽可能低的噪声。最近, 日本 NTT 光子实验室又提出了一种新型“三台倒转 P 台面”APD 器件结构, 虽然是基于 InAlAs 倍增材料的 SACM 电学结构, 但改善了原本的台面型结构, 有效

降低了倍增层侧壁的表面电场强度, 大大提高了器件的稳定性与可靠性。研究制备出的单片集成四通道 APD 阵列在增益 $M=10$ 的情况下, 能够保证单个器件的高响应度为 0.9 A/W 与大带宽为 18 GHz, 可作为 100 Gbit/s 以太网光接收机芯片使用^[24]。

国内对于 APD 的研究从 20 世纪 80 年代就已经开始, 主要针对光纤通信方面的应用, 经过多年的研究, APD 性能不断提高。2012 年中国科学院半导体所报道了一种具有极低暗电流的平面型 InGaAs/InP APD, 直径 30 μm 的器件在室温下 90% 击穿电压下暗电流为 0.1 nA, 无减反膜时单位增益下响应度为 0.65 A/W^[25]; 2015 年又提出了一种新型的 APD 结构, 以 InAlAs 作为倍增材料, 并采用三级台阶型结构, 有效降低了器件表面电场强度, 直径 55 μm 的器件在室温下 90% 击穿电压下暗电流为 6 nA, 无减反膜单位增益光响应为 0.77 A/W^[26]。

目前, 国际上商用高速光电检测器的供应商主要有美国的 Finisar、Lumentum (原 JDSU 光器件部分), 日本的滨松公司, NTT 公司, 德国的 u2t 公司等。它们不仅在检测器的研究与商用转化上处于国际领先地位, 并且对很多新型高性能检测器的研究工作也处于国际领先水平。

国内的光电检测器生产研发机构主要包括武汉光迅科技、华工正源、深圳海思等公司, 研究单位包括清华大学、中国科学院半导体研究所、北京邮电大学、重庆光电技术研究所、华中科技大学等。在高速检测器研究方面, 国内已研制出 40 Gbit/s 波导检测器, 但尚未形成产品, 主要受限于高频封装。对于传统结构的检测器, 国内已实

现较好的产业化, PIN 传输速率可达 10 Gbit/s, APD 速率可达 2.5 Gbit/s, 但在高性能检测器商用产品方面, 仍然与国外有较大差距。

5 单片集成化接收机中的长波长硅基光电接收器

光纤通信波段的硅基长波长光电检测器的研究是从 SiGe 光电检测器开始的。由于 Ge 与 Si 晶格失配度达 4.2%, 生长高 Ge 组分的 SiGe 材料存在很大的挑战, SiGe 光电检测器的探测波长只能拓展到 1 310 nm 左右, 而采用 Ge 量子点材料, 可以将探测波长拓展到 1 550 nm, 但是这两种光电检测器由于在 1 310 nm 和 1 550 nm 波段材料的吸收系数很低, 器件的响应度差。为了提高响应度, 在王启明院士的指导下, 中国科学院半导体研究所研制出具有共振腔增强结构的 SiGe 和 Ge 量子点光电检测器^[27,28], 响应度提高了 3 倍, 但是离实际的应用要求还有一定距离。随着硅衬底上高质量 Ge 材料外延生长的突破, 硅基 Ge 光电检测器在短短几年内获得了快速发展, 并在硅基光电子集成接收机芯片中获得应用, 成为最主要的硅基光电检测器。

硅基锗光电检测器与 Si CMOS 工艺兼容, 而且在光通信和光互连波段有高的响应度, 是硅光子学的关键性器件。人们已经研制出了不同电学结构和光学结构的硅基锗光电检测器及其集成阵列, 按照其光学结构不同, 主要有面入射结构和波导结构两种, 适用于不同的应用场景。按电学结构和工作原理不同, 主要有 PIN 结构和 APD 结构

两种器件。下面分别做简单的介绍。

5.1 PIN 结构硅基锗光电检测器

PIN 结构器件可以实现高速、高响应、低暗电流, 是研究得最多、性能最好的硅基锗光电检测器结构。依照不同应用需求, PIN 结构硅基 Ge 光电检测器主要有面入射结构和波导结构两种。图 12 是面入射结构和波导结构的硅基 PIN Ge 光电探测器示意。

面入射结构光电检测器的响应度与光吸收层厚度密切相关, 而吸收层的厚度又决定了光生载流子的渡越时间, 因此响应度与响应速度之间存在着制约的关系。想要获得高的响应速度, 就得牺牲器件的响应度。例如, 为了提高带宽, 德国斯图加特大学将 Ge 吸收层的厚度降低, 同时将器件直径减小到 10 μm , 在 2009 年研制出 3 dB 带宽达 49 GHz 的面入射结构 Ge 光电检测器^[29]。虽然器件的带宽很高, 但由于光吸收层很薄, 器件响应度很低, 只有 0.05 A/W, 对应的量子效率只有 4%, 难以实用。需要根据应用的需求, 兼顾速率和响应度的需要, 不能只追求某一个指标。中国科学院半导体研究所于 2009 年研制出了国内首个硅衬底上的高速 Ge 光电检测器^[30], 对 1 310 nm 和 1 550 nm 波长的光响应度分别为 0.38 A/W 和 0.21 A/W, 在 0 V 和 -3 V 偏压下的 3 dB 带宽分别为 472 GHz 和 628 GHz。2013 年, 又研制出 SOI 衬底上的高速高响应锗光电检测器^[31], 直径为 20 μm 的器件对于 1 550 nm 波长光的响应度为 0.3 A/W, 响应带宽为 23.3 GHz, 直径 15 μm 的器件响应带宽达到 26.4 GHz, 兼顾了器件的响应度和响应带宽的需求。

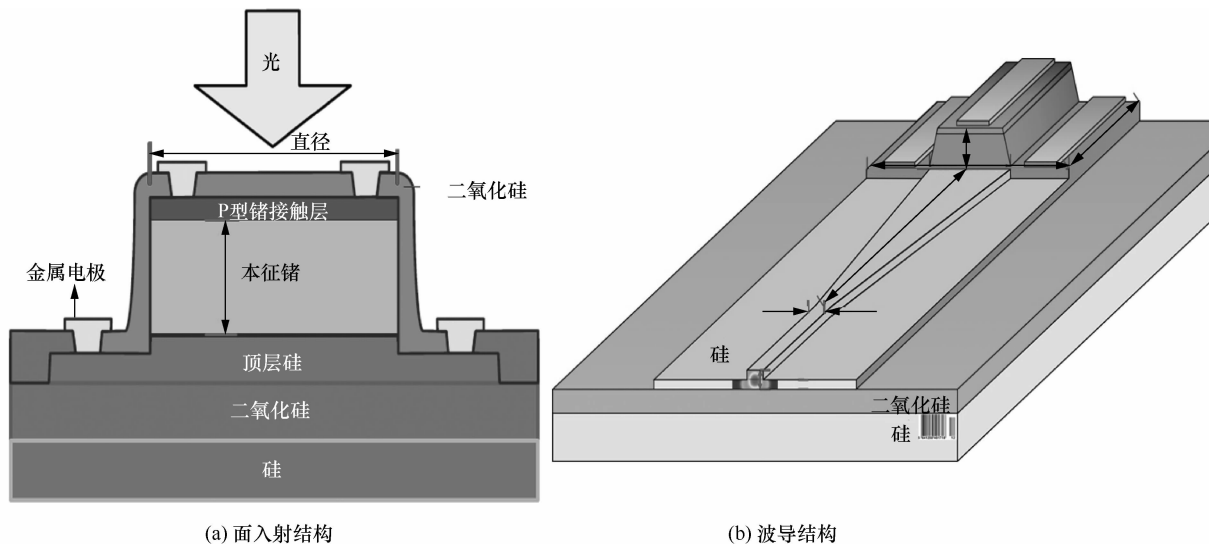


图 12 硅基 PIN Ge 光电探测器结构示意图



波导结构的 Ge PIN 光电检测器中光生载流子的输运方向可以设计成与光的传播方向垂直, 在实现足够的光吸收的同时保持了较小的载流子渡越时间, 解除响应速度与响应度之间相互制约的矛盾。再则, 波导结构光电检测器也是光子集成回路所必需的。波导型 Ge 光电检测器按光耦合方式有两类主要结构: 一种是 Butt 耦合结构, Ge 光电检测器的 Ge 吸收层材料与 Si 波导直接对接, 来自硅波导的光直接入射到端侧的 Ge 吸收层, 从而实现对光的探测; 另一种是消逝场耦合结构, Ge 检测器吸收材料处于硅波导的上面, 来自硅波导的光到达检测器后, 由于 Ge 的折射率比硅大, 光将通过消逝场耦合进入折射率比 Si 大的 Ge 吸收层, 实现对光的吸收探测。前者工艺比较复杂, 需要严格控制 Ge 外延区硅的腐蚀, 还需要进行化学机械抛光等工艺。优点是较小器件长度就可以充分吸收入射光, 由于器件尺寸小、电容小, 速度可以更快。而消逝场耦合结构工艺比较简单, 但是器件要求长一些, 以保障足够的光响应。代表性的工作如法国巴黎第 11 大学^[32]研制出的与硅波导 Butt 耦合的波导型 Ge 光电检测器, 器件长度为 15 μm , 3 dB 带宽在 -4 V 下达到 42 GHz, 1 520 nm 波长下的响应达到 1 A/W, 在保障高速工作的同时, 实现了高的响应, 但是暗电流密度比较大, 在 -1 V 下为 60 mA/cm², 并在偏压增加时迅速增大。2012 年, 他们研制的 Ge 光电检测器由于减小了本征吸收区的厚度, 在 0 V 偏压下实现了 40 Gbit/s 的探测速率, 暗电流密度为 80 A/cm²。为了进一步提高带宽, 人们也做了一些有益的尝试, 如采用 Gain peaking 技术, 在电极引线上增加电感^[33]或者设计合适的键合金线, 可以将器件带宽提高到约 60 GHz, 但响应度会有所降低。

5.2 Ge/Si 异质结雪崩光电二极管

APD (avalanche photo diode) 器件由于具有倍增效应, 可以对弱光进行探测, 可以降低对光探测模块中放大电路的要求, 甚至免去放大电路, 是光通信系统中的重要器件。由于硅的电子碰撞离化率远大于空穴的离化率、噪声低, 是最好的雪崩倍增材料, 但是由于其带隙决定了其不能对长波进行探测, 而 Ge 对 1 550 nm 和 1 310 nm 的光具有高响应, 所以, 人们提出了以 Ge 为吸收区、以 Si 为倍增区的 Ge/Si APD (Ge/Si SACM APD) 结构。它综合利用 Ge 在 1 550 nm 和 1 310 nm 高响应和硅材料优异的雪崩倍增特性, 实现对通信波段的弱光探测。Intel 公司在 2008 年 12 月 8 日宣布其研究团队在采用 Si 衬底上外延生长的 Ge 材料

成功研制出了基于硅的雪崩光电检测器, 其增益带宽积达到了创记录的 340 GHz, 尔后他们又将这一记录提高到 840 GHz^[34], 与其他化合物半导体的 APD 器件相比, 显示出了明显的优势。图 13 是他们研制的 Ge/Si SACM APD 的增益带宽积测试结果。Ge/Si SACM APD 也可以制备成波导结构, 如 Intel 研制出 Butt 耦合和消逝场耦合的 Ge/Si SACM APD, 70 μm 长的消逝场耦合 APD 器件带宽为 23 GHz, 在 10 Gbit/s 速率、误码率在 1×10^{-12} 以下时, 灵敏度为 -30.4 dBm。30 μm 长的 Butt 耦合结构 APD 的带宽为 29.5 GHz。新加坡微电子所研制出类似结构的波导结构 Ge/Si SACM APD 器件^[35], 3 dB 带宽为 20 GHz, 1 550 nm 波长下的响应为 22 A/W, 推算的灵敏度可达 -30.5 dBm。

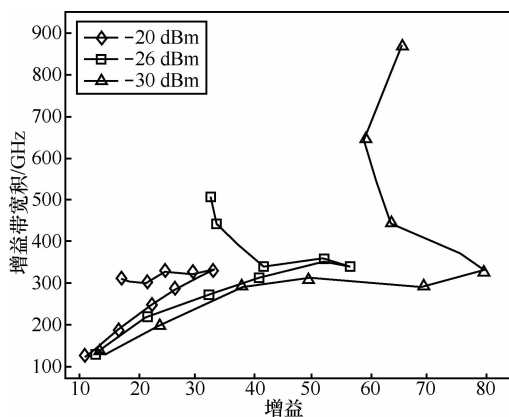


图 13 Intel 与 UCSB 合作研制的 Ge/Si SACM APD 的增益带宽积测试结果

再则, 利用硅衬底上制备的 Ge 材料, 可以制备出 MSM 结构和 PIN 结构的 Ge APD 器件。器件虽然制备在硅衬底上, 但 Si 材料并不参与光电检测器的工作。MSM 结构的 Ge APD 器件首先由 IBM 于 2010 年研制成功^[36]。他们采用快速熔融法制备 SiON 上的 Ge 薄层, 用叉指结构 W 金属与 Ge 接触形成一系列沿波导方向的肖特基结。当电压高于 Ge 击穿电压时, 就可以实现 APD 工作。由于接触电极间距只有 200 nm, 在 3.4 V 偏压下, 增益达到 10, 40 Gbit/s 的眼图可以很好地张开。横向 PIN 结构的 Ge APD 由法国巴黎第 11 大学首先报道^[37]。在 220 nm 的 SOI 上制备波导, 在波导的端头腐蚀 Si 到 40 nm 厚作为 Ge 外延区域, 外延 Ge 后通过化学机械抛光将 Ge 层减薄到 300 nm 厚, 制备横向结构的 PIN 器件, I 层宽度为 500 nm。器件在偏压在 5 V 下可以实现雪崩倍增。在无增益情况下, 3 dB 带宽大于 40 GHz, 增益为 17 时, 带宽达 11 GHz。值得一提的是, 对于一般 PIN 结构的硅基 Ge 光电检测器, 偏压加得足够高时, 也会发生雪崩倍

增,实现 APD 工作,也能满足某些方面的需求,但信噪比较差。如比利时的 IMEC^[38]研制的硅基 Ge 波导结构 APD 器件,其电学结构就是普通的 PIN 结构,在低偏压下,3 dB 带宽可以大于 50 GHz;在 6.2 V 偏压下,带宽为 10.4 GHz,增益为 10.2,增益带宽积达到 100 GHz。

综上所述,面入射结构的硅基 Ge PIN 光电检测器存在响应带宽与响应度之间的矛盾,需要根据实际应用需要找到平衡点,两者兼顾的典型器件性能是带宽 25 GHz 左右,1 550 nm 波长下的响应度约为 0.3 A/W。对于波导结构的硅基锗光电检测器,由于解除了响应度和带宽之间的制约,可以同时实现高响应度和高带宽,目前典型的研究结果是,带宽约 40 GHz,1 550 nm 波长下的响应度约为 1 A/W。另外,为了实现对弱光的探测,硅基锗 APD 器件研究也是近年的研究热点。为了降低倍增中的过剩噪声,器件一般设计成吸收区与倍增区分离的结构,增益带宽积高达 840 GHz。另外,为实现低偏压下工作的硅基 Ge APD 器件,人们也研制出了电极间距很短的硅基 MSM 结构和横向 PIN 结构 Ge APD 器件。

6 结束语

以上概要地展现和介绍了推动 21 世纪光纤通信系统迅速发展的主力——有源光电子器件和集成技术的概况。光纤通信的含义无疑已远远地超越了 50 年前的电信范畴。在传输信息的类别、传输功能的拓展、传输制式的多变、传输时域的加快和传输空域的扩大等方面,都有了前所未有的巨大跃变。数字光网络的实现、互联网的渗透与普及、量子密钥的采用、人工智能和虚拟现实的发展已使信息化社会迈向了智能化的新时代。

特大容量(Zbit/s)的数字化传输系统、ps 级实时光交换和路由、低噪声高灵敏宽带接收机以及数字与模拟融合的超快信息处理技术将陆续登上舞台。其中,诸如密集波分复用(DWDM)技术的采用、ps 级脉冲光频梳激光器、低噪声高灵敏的光电接收器、ps 级波长变换器以及低功耗路由光开关、多波长发射的单光子发射与接收器将再次成为推动智能化时代发展的主力军。

在光电子信息传输系统的产业化规模化发展进程中,硅基材料将在系统集成中占据高位。硅基集成光电子将成为未来发展的主流。关键在于可与硅基 CMOS 电路兼容集成的激光器的突破性发展。硅微电子处理器芯片内的光互连无疑将取决于在硅基芯片中构建微型光网络

的实现,它将对提升超快计算机运行速率做出划时代的奠基性贡献。

创新是人类社会发展的推动力,长江后浪推前浪是人类历史发展的真谛。

参考文献:

- [1] ZHU H L, LIANG S, ZHAO L J, et al. A selective area growth double stack active layer electroabsorption modulator integrated with a distributed feedback laser [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(20): 3627.
- [2] HAYAKAWA A, TAKABAYASHI K, TANAKA S, et al. Tunable twin-guide distributed feedback laser with 8-nm mode-hop-free tuning range, lasers and electro-optics [C]//2005 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, July 11-15, 2005, Tokyo, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2005: 628-629.
- [3] NUNOYA N, ISHII H, KAWAGUCHI Y, et al. Tunable distributed amplification (TDA-) DFB laser with asymmetric structure [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(6): 1505-1512.
- [4] WELCH D F, KISH F A, NAGARAJAN R, et al. The realization of large-scale photonic integrated circuits and the associated impact on fiber-optic communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4674-4683.
- [5] ZHANG C, ZHU H, SONG L, et al. Ten-channel InP-based large-scale photonic integrated transmitter fabricated by SAG technology [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64 (6): 17-22.
- [6] MILLER M, GRABHERR M, JAGER R, et al. High-power VCSELs arrays for emission in the watt regime at room temperature [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(3): 173-175.
- [7] FRANCIS D, CHEN H L, YUEN W, et al. Monolithic 2D-VCSEL array with 2 W CW and 5 W pulsed output power [J]. Electronics Letters, 1998, 34(22): 2132-2133.
- [8] YAN C, NING Y, QIN L, et al. A high power InGaAs/GaAsP vertical-cavity surface-emitting laser and its temperature characteristics [J]. Semiconductor Science and Technology, 2004, 19(6): 685.
- [9] YAN C, NING Y, QIN L, et al. High-power vertical-cavity surface-emitting laser with an extra Au layer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(8): 1599-1601.
- [10] CUI J, NING Y, ZHANG Y, et al. Design and characterization of a nonuniform linear vertical-cavity surface-emitting laser array with a Gaussian far-field distribution [J]. Applied Optics, 2009, 48(18): 3317-3321.



- [11] KATO K, HATA S, KOZEN A, et al. Highly efficient 40 GHz waveguide InGaAs p-i-n photodiode employing multimode waveguide structure [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(9): 820-822.
- [12] DEMIGUEL S, GIRAUDET L, JOULAUD L, et al. Evanescently coupled photodiodes integrating a double-stage taper for 40-Gb/s applications-compared performance with side-illuminated photodiodes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 20(12): 2004-2014.
- [13] BELING A, BACH H G, MEKONNEN G G, et al. Miniaturized waveguide-integrated p-i-n photodetector with 120-GHz bandwidth and high responsivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(10): 2152-2154.
- [14] LIU S Q, YANG X H, LIU Y, et al. Design and fabrication of a high-performance evanescently coupled waveguide photodetector[J]. Chinese Physics B, 2013(10): 614-618.
- [15] LV Q Q, YE H, YIN D D, et al. An array consisting of 10 high-speed side-illuminated evanescently coupled waveguide photodetectors each with bandwidth of 20GHz [J]. Chinese Physics Letters, 2015, 32(12).
- [16] ISHIBASHI T, KODAMA S, SHIMIZU N, et al. High-speed response of uni-traveling-carrier photodiodes [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36(10): 6263-6268.
- [17] CAMPBELL J C, BELING A, XIE X, et al. High-power, high-linearity photodiodes [C]//26th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM), May 11-15, 2014, Montpellier, France. New Jersey: IEEE Press, 2014: 11-15.
- [18] WU Y S, SHI J W. Dynamic analysis of high-power and high-speed near-ballistic unitraveling carrier photodiodes at W-band [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(13): 1160-1162.
- [19] SHI J W, HUANG C B, PAN C L. Millimeter-wave photonic wireless links for very high data rate communication [J]. NPG Asia Mater, 2011, 3(4): 41-48.
- [20] SHI T, XIONG B, SUN C, et al. Back-to-back UTC-PDs with high responsivity, high saturation current and wide bandwidth[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(2): 136-139.
- [21] HYUN K S, PACK Y, KWON Y H, et al. High speed and high reliability InP/InGaAs avalanche photodiode for optical communications [J]. Proceedings of SPIE-the International Society, 2003(4999): 130-137.
- [22] LAHRICHI M, GLASTRE G, DEROUIN E, et al. 240-GHz gain-bandwidth product back-side illuminated AlInAs avalanche photodiodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(18): 1373-1375.
- [23] DUAN N, WANG S, MA F, et al. High-speed and low-noise SACM avalanche photodiodes with an impact-ionization-engineered multiplication region [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(8): 1719-1721.
- [24] NAKAJIMA F, NADA M, YOSHIMATSU T. High-speed avalanche photodiode and high-sensitivity receiver optical subassembly for 100-Gb/s ethernet [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015: 1.
- [25] BIN L, HUAI-WEI Y, QIANG G, et al. Ultra low dark current, high responsivity and thin multiplication region in InGaAs/InP avalanche photodiodes[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(11): 118503-118505.
- [26] LI B, LV Q Q, CUI R, et al. A low dark current mesa-type InGaAs/InAlAs avalanche photodiode [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(1): 34-37.
- [27] LI C, HUANG C J, CHENG B, et al. SiGe/Si resonant-cavity-enhanced photodetectors for 1.3 μ m operation fabricated using wafer bonding techniques [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(3): 1718-1720.
- [28] LI C B, MAO R W, ZUO Y H, et al. 1.55 μ m Ge islands resonant-cavity-enhanced detector with high-reflectivity bottom mirror [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85 (14): 2697-2699.
- [29] KLINGER S, BERROTH M, KASCHEL M, et al. Ge-on-Si p-i-n photodiodes with a 3-dB bandwidth of 49 GHz [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(13): 920-922.
- [30] XUE H Y, XUE C L, CHENG B W, et al. Zero biased Ge-on-Si photodetector with a bandwidth of 4.72GHz at 1550nm [J]. Chinese Physics B, 2009, 18(6): 2542-2544.
- [31] LI C, XUE C, LIU Z, et al. High-bandwidth and high-responsivity top-illuminated Germanium photodiodes for optical interconnection [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(3): 1183-1187.
- [32] VIVIEN L, OSMOND J, FEDELI J, et al. 42 GHz p.i.n Germanium photodetector integrated in a silicon-on-insulator waveguide[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6252-6257.
- [33] GOULD M, BAEHR-JONES T, DING R, et al. Bandwidth enhancement of waveguide-coupled photodetectors with inductive gain peaking[J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7101.
- [34] BOWERS J E, DAI D, KANG Y, et al. High-gain high-sensitivity resonant Ge/Si APD photodetectors [J]. Proceedings of SPIE-the International Society, 2010, 7660(1): 76603H.
- [35] NING D, LIOW T Y, LIM A E, et al. High speed waveguide-integrated Ge/Si avalanche photodetector [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), March 17-21, 2013, Anaheim, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-3.

- [36] ASSEFA S, XIA F, VLASOV Y A. Reinventing germanium avalanche photodetector for nanophotonic on-chip optical interconnects[J]. Nature, 2010(464): 80-85.
- [37] VIROT L, CROZAT P, FEDELI J M, et al. Germanium avalanche receiver for low power interconnects [J]. Nature Communications, 2014(5): 4957.
- [38] CHEN H T, VERBIST J, VERHEYEN P, et al. High sensitivity 10Gb/s Si photonic receiver based on a low-voltage waveguide-coupled Ge avalanche photodetector [J]. Optics Express, 2015, 23(2): 815-822.

[作者简介]



王启明(1934-),男,中国科学院半导体研究所研究员、院士,主要研究方向为半导体光电子学。



赵玲娟(1964-),女,中国科学院半导体研究所研究员、博士生导师,主要从事 InP 基半导体激光器及光子集成芯片技术的研究工作,包括高速 DFB 激光器、电吸收调制器、半导体光放大器、半导体可调谐激光器、全光时钟恢复等光子信息处理器件、光生微波集成芯片以及宽带混沌光集成芯片的研究工作。



朱洪亮(1957-),男,中国科学院半导体研究所研究员、博士生导师,主要从事 InP 基光子集成芯片技术的研究工作,包括高速 DFB 激光器、电吸收调制 DFB 激光器、激光器阵列集成发射芯片等研究工作。



韩勤(1965-),男,博士,中国科学院半导体研究所研究员、博士生导师,主要研究方向为光电子材料、器件和多功能光电集成芯片,包括高速 III/V 族半导体光探测器、高饱和电流模拟光探测器、线性/盖格模式 APD 及焦平面 APD 阵列、高性能 III/V 族半导体光放大器和激光器;用于光纤通信、接入网和光互连的 InP 基及 Si 基多功能光电集成芯片。



成步文(1967-),男,中国科学院半导体研究所研究员、博士生导师,主要研究方向为硅基异质结构材料生长和器件研制,包括硅衬底上 SiGe、Ge、GeSn 等 IV 族材料的外延生长,并利用这些材料开展硅基高效发光器件、高速高灵敏度光电探测器、低功耗电光调制器、新型高迁移率 MOSFET 等光电子和微电子器件和芯片的研制。