高效信号辐射源和探测器件

黄燕^①, 王林^①, 胡伟达^①, 潘建珍^①, 郝加明^①, 徐刚毅^①, 陈建新^①, 尤立星^②,
孙晓玮^②, 王刚^③, 陈效双^{①*}, 陆卫^{①*}

① 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

② 中国科学院微系统与信息技术研究所, 上海 200050

③ 中国科学院电子学研究所, 北京 100190

* 通信作者. E-mail: xschen@mail.sitp.ac.cn, luwei@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2016-03-29; 接受日期: 2016-05-26

摘要 本文通过信号辐射源和探测器件的国内外研究现状, 从太赫兹/长波红外器件设计、仿真与测试技术、太赫兹/长波红外材料生长和器件研制、毫米波射频器件、真空/超导电子器件、人工电磁材料和器件等 5 个方面分析了信号辐射源和探测器件的发展趋势, 最后总结了需重点开展研究的科学问题.

关键词 太赫兹 长波红外 毫米波射频 真空电子 超导电子 人工电磁

1 国内外发展动态与现状分析

红外、太赫兹与毫米波所涵盖的电磁波段对国家安全、国民经济、人民生活有着非常重要的影响, 在这一波段的高效辐射源和探测器件的制备能力对一个国家综合实力的提升起决定性作用. 国际上始终将该技术视为高度敏感技术而对我国实行从未松懈过的禁运. 可以预期在未来几十年, 随着我国社会发展和技术进步, 国家对辐射源和探测技术的迫切性和先进性要求会越来越强烈, 为此形成了在我国发展辐射和探测物理这支交叉学科的难得机遇.

近年来, 由于材料生长技术、器件工艺技术的不断提高, 更由于凝聚态物理、光物理、红外物理、微电子学等学科的快速交叉发展态势, 使得高效红外、太赫兹与毫米波辐射的产生、放大、传播和探测技术形成了大量的新原理、新概念、新方法. 例如太赫兹量子级联激光器是 1~5 THz 波段最具竞争力的辐射源之一, 具有全固态结构紧凑、频率覆盖范围大、激光功率大、线宽窄、可批量制备等优势. 在太赫兹成像、通讯以及精细光谱分析等领域有广阔的应用前景. 红外、太赫兹与毫米波面向国家安全技术的需求, 例如, 随着半导体材料制备技术如分子束外延、金属有机化合物气相沉积的不断完善和人工微结构物理的快速发展, 涌现出了基于量子结构的新型半导体辐射和探测器件^[1~16]. 为此, 本研究领域的布置, 必将进一步强化我国辐射与探测物理学, 更好地支撑我国光电技术的持续发展.

引用格式: 黄燕, 王林, 胡伟达, 等. 高效信号辐射源和探测器件. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 1035–1052, doi: 10.1360/N112016-00070

图 1 (网络版彩图) 太赫兹波段在电磁波谱中的位置

Figure 1 (Color online) Terahertz and the spectral fingerprint

我国已围绕辐射和探测技术, 与国际同步发展了半导体物理学、光电子学、低维量子物理学等. 以量子效应为重要特征的辐射和探测物理学在国家的相关重要技术发展中起到了重要支撑作用. 同时, 在光子的有效调控方面获得了长足的发展, 为辐射和探测技术从现有的仅对电子进行操控发展到同时也对光子进行操控增添了新途径, 进而为辐射和探测技术发展提供了光子操控上的新维度. 基于重大的需求和面临的问题, 辐射和探测物理学上的新概念、新机理、新方法将直接引领我国辐射和探测技术水平. 国家在中长期规划中包含了辐射和探测技术领域中的对地观测技术、核心元器件技术等, 急需尽快开展高效辐射源和探测技术中的量子机理及其应用研究, 其焦点就在于进一步提升微波、太赫兹和长波红外辐射和探测能力, 特别是其中的辐射与探测器件高性能问题的突破.

信号辐射源和探测材料质量和器件性能决定着辐射源和探测技术的水平, 目前国内外的研究主要集中在以下几方面机理的研究: 辐射源和探测材料的光电转换性能, 也就是提高材料对光的吸收能力; 辐射源和探测器件的光电耦合效率, 主要是通过人工微结构的引入对光场分布的控制, 优化光电的耦合; 器件光生载流子的输运过程的控制, 主要涉及到器件电流和噪声的控制; 光电信号的放大过程, 主要是通过放大电流响应的机理^[17~31]. 随着科技的飞速发展, 从可见光到红外、太赫兹和毫米波乃至电磁波谱的任意波段, 高效的辐射源和探测技术使得人类的“视觉”能力得到了大幅度扩展(图 1). 高效信号辐射源和探测器件技术已经从传统的模拟强度走向量子计数的可分辨, 并带动了通信、传感、遥感等多领域的技术进步. 同时各领域的技术进步也对高效信号辐射和探测技术提出了更高的要求. 高效信号辐射源和探测器件技术的研究目标是: 研究新型长波红外、太赫兹和毫米波材料和器件, 填补传统光学与光电子学在新频谱波段的关键技术空白, 为通信、传感、探测、成像等应用提供新技术手段. 辐射源和探测波段在长波红外、太赫兹和毫米波显得特别重要, 鉴于这些波段器件的制备能力对一个国家综合实力的重要作用, 国际上始终将该技术和产品视为高度敏感技术. 例如, 提高光电的有效耦合效率成为辐射源和探测技术发展中的核心研究内涵之一, 引发了从光子传输行为的操控上解决耦合效率的新研究途径等. 下面分别从 5 个方面对国内外的研究现状进行阐述.

1.1 太赫兹/长波红外器件设计、仿真与测试技术

太赫兹波段一般定义为 0.1~10 THz 电磁波频率区域, 位于微波电子学和远红外光子学探测/发射波长之间, 由于缺少相应的辐射源和探测技术, 该波段发展一直相对滞后, 形成一个技术空白. 随着人们对太赫兹波特性的认识, 近年来, 基于太赫兹的探测、发射源技术研究引起了国内外的广泛关注, 包括美国、日本、法国等发达国家在内将太赫兹技术提升为战略性的高度. 以太赫兹技术为核心的国家安全、生物医学、材料科学及高速无线通讯领域元器件和系统开发引起国内外的高度重视, 形成了一系列重大创新的太赫兹原理性突破和光电新技术. 太赫兹辐射、探测机理研究和器件工艺设计对材料器件的各种物理量的优化, 对获得高效太赫兹器件至关重要, 分为电子学和光子学两方面. 电子学中主要运用密度泛函理论和格林函数方法模拟量子受限结构在外场下的微观输运过程. 光子学中主要运用

图 2 (网络版彩图) 基于等离子元增强耦合的半导体导电层光电导太赫兹高速探测器和调制器

Figure 2 (Color online) Graphene-based active metamaterials and plasmonic effect. (a) Graphene-based high-Q Fano resonator, the electromagnetic-induced transparency can be given rise through structural asymmetry; (b) the negative differential resistance is observed in resonant tunneling of double layer graphene, which is benefiting for THz amplification; (c) strong THz absorption due to the plasma wave excitation and resulted photoconductive phenomena due to its nonlinearity

有限元和有限差分域等方法研究器件的微腔结构中的光子调控、非线性光学以及光与物质的强耦合作用等, 设计能显著提升性能的太赫兹器件. 在器件测试方面光学测试技术主要包括运用时域光谱、锁相锁模技术、扫描探针技术等深入研究太赫兹器件的损耗/增益特性、激光线宽与噪声、光电响应、暗电流机理, 研究太赫兹量子受限结构中电子与光子在实/相空间的分布^[32~47]. 国内已经有相关基于电子学的测试平台, 除此之外, 发展太赫兹波段的读出电子学在进一步拓展器件的太赫兹应用方面越来越受到重视, 对探测器件的信号要求具有较高的灵敏度并具备高效抑制器件的背景噪声的能力.

太赫兹波段辐射、探测技术尤其是基于固态电子器件的芯片式结构主要局限于低频波段远不能满足太赫兹宽频范围的应用. 需要实现高速信号传递非制冷太赫兹探测以及非制冷固态太赫兹辐射源的技术, 在这个特殊电磁频率区域创新发展兼备电子和光子探测以及相关频率发射的新型原理器件非常重要, 像半导体 III-V 异质结构器件、二维材料 (石墨烯) 器件 (图 2) 等正成为国际光电子器件太赫兹波的前沿领域.

红外辐射源和探测决定着国家安全技术能力, 一直是国际上关注的焦点, 国内有不少研究所和大学在从事红外光源和探测器的研究和研制工作. 针对 12~15 微米长波红外碲镉汞器件作为主流红外光电子器件在我国的国家安全和空间技术发展中具有十分重要的地位, 因此对长波红外碲镉汞器件的性能改进研究就显得极为重要.

12.5 μm 及以上碲镉汞、半导体 III-V 族量子阱和超晶格长波红外器件由于带隙宽度更窄, 容易发生隧穿效应, 以及受到表面态缺陷的影响. 目前, 器件仿真模型主要有解析模型和物理模型. 不同电

图 3 (网络版彩图) 类石墨烯二维材料太赫兹探测, 二维电子体系与晶格的弱耦合实现了强的太赫兹热电子探测现象
Figure 3 (Color online) Terahertz detector based on the graphene-like materials

流机制大小的变化相应地反映在器件的关键特征参数上, 需要提取器件的相关物理参数, 这常用解析模型来分析. 通过建立物理模型, 结合数值模拟可以更加准确地获得影响器件性能的主导机制, 揭示制约器件性能的内在物理起源. 不同温度下分析器件特性对各种电流机制的判断也是非常有用的. 高分辨率的激光束诱导电流光学表征方法可以用来获得器件的电学特征.

1.2 太赫兹/长波红外材料生长和器件研制

材料生长工艺对于器件应用至关重要, 太赫兹波段工作器件对于材料生长工艺有着特殊的要求, 材料生长从体材料向低维材料发展, 在器件研制方面正在从被动式器件向主动可调式器件方面延伸, 也是目前国内外研究的焦点. 以 III-V 材料为基础的多量子阱结构外延生长以及高迁移率异质结半导体材料组分、界面特性已经取得了较大的进展. 目前, 宽禁带半导体、低维材料包括零禁带石墨烯、纳米线、量子点等为代表的新型材料, 为新一代太赫兹器件性能提供了重要支撑, 材料制备主要依赖分子束外延技术 [48~61].

材料性能分析主要依赖于表征技术; 材料的缺陷、界面和杂质与器件性能密切关联. 国内外太赫兹器件主要涉及太赫兹探测或发射器件的研究, 基于制冷的量子效应器件已经在探测和光子发射上取得了较大的进展. 目前的研究重点是实现太赫兹辐射和探测器件的室温工作. 在支持单片太赫兹器件集成方面, 以 III-V 族和石墨烯为沟道材料的新型太赫兹源和探测器件 (图 3), 基于等离子体波、热电子非制冷辐射源和探测器件, 力求进一步提高器件的探测/辐射温度和频率范围. 等离子体波是电子的集体激发模式, 受激发产生的等离子体波可以与太赫兹波发生共振, 并在电荷输运中表现为光电流和光电压响应. 同时, 在合适的载流子浓度下, 石墨烯的等离子体波共振频率恰好处在太赫兹波段. 其室温下的低散射特性更有利于石墨烯在太赫兹探测器中的应用.

1.3 毫米波射频器件

新兴学科自旋电子学利用控制电子的自旋而不是传统的电荷来制备各种新型固体器件, 已被广泛

图 4 (网络版彩图) 由中科院上海微系统与信息技术研究所研制的 0.3~0.4 THz 太赫兹固态有源倍频链锁相源, 输出功率达到 2.2 mW

Figure 4 (Color online) The output power of 0.3~0.4 THz solid-state terahertz source based on multiplier chains developed by Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology is 2.2 mW

地用于信息存储的应用. 随着对自旋电子学器件中动态响应过程的研究, 研究人员发现很多新的物理效应, 比如自旋转移力矩效应、自旋整流效应等, 并在此基础上发明了多种新型固态器件, 比如自旋二极管、自旋发电机和纳米振荡器, 实现了微波信号和直流电信号之间的相互转换 (图 4).

自旋电子学微波器件的整体性能尚不能与半导体器件媲美, 但在一些具体的技术指标上已接近或超过常用的半导体微波器件, 比如微波电压响应 (微波整流产生的直流电压与输入微波功率的比值). 半导体微波检测器只对微波的电场分量有直接响应, 而自旋电子学微波器件不但可以检测微波的电场分量而且还可以检测微波的磁场分量, 这一独特的性能对微波成像技术有着重要意义, 在医学成像中重要的核磁共振成像技术就是利用了物质对微波磁场的响应来实现的.

由于自旋电子学微波器件的广阔前景, 很多知名大学、研究所以及公司都开展了这方面的研究 [62~69]. 在 2005 年, 日本先进工业科学和技术研究院、日本大阪大学和佳能公司的合作研究首先在 *Nature* 杂志上提出了基于磁隧穿结的自旋二极管概念. 随后美国康奈尔大学、IBM 公司、日立环球存储科技公司、日本稻盛和夫前沿研究中心、加州大学欧文分校、意大利巴里理工、中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所等研究机构和公司纷纷提出改进器件性能的方案和技术, 终于在 2015 年将自旋电子学微波器件的电压响应率提高到 74500 mV/mW. 与此同时, 加拿大曼尼托巴大学在 2007 年发明了一种复合集成器件, 在 *Phys Rev Lett* 上首次提出了自旋整流和自旋发电机的概念, 并将它用于微波磁场的检测. 2012 年, 加拿大曼尼托巴大学与中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室合作, 利用自旋整流效应开发了基于自旋电子学的微波成像技术.

由于自旋二极管的工作原理是基于共振的自旋转移力矩效应, 为了克服这一窄频微波响应以及需要外加磁场的缺点, 2012 年, 加拿大曼尼托巴大学与兰州大学、葡萄牙 INESC 微系统和纳米技术研究所、加拿大蒙特利尔大学工学院以及美国 Everspin 公司合作, 提出了微波塞贝克整流效应的概念, 加拿大曼尼托巴大学等大学科学家以及美国 Everspin 公司继续合作, 提出了增强磁隧穿结中微波电压响应新方法. 利用这种宽频的微波检测技术, 加拿大曼尼托巴大学在 2014 年和 2015 年分别报道了基于自旋电子学的微波雷达成像技术和微波全息成像技术. 鉴于自旋电子学微波技术与器件的飞速发展, 2010 年左右, 美国政府开始支持奥克兰大学自旋电子学微波技术的应用研究.

1.4 真空电子器件、超导电子器件

真空电子器件方面, 2007 年, 美国 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 开始执

行几项亚毫米波及 THz 技术相关的发展计划, 其中包括了高频集成化真空电子器件计划 (HiFIVE), 目的是利用微加工技术获得高性能和高集成度的大功率真空电子放大器. 一个关键的评价指标是优质因子 (即功率带宽乘积), 最低目标是在 220 GHz 时达到 500 W·GHz. 与美国开展的集成化真空电子器件研究类似, 欧洲的太赫兹真空电子器件研究计划为 OPTHER (OPTically driven TeraHertz amplifiERs project), 致力于发展基于行波管原理的小型化太赫兹放大器 [70~80].

在 20 世纪 90 年代就研究出 225 GHz 脉冲 EIO, 输出功率 60 W. 美国在高频集成真空电子学计划 (HiFIVE) 的支持下, 开展了大量的 THz 行波管研究. 美国 NG (Northrop Grumman Corporation) 公司在美国国防高级研究计划局 (DARPA) 的高频集成真空电子学计划 (HiFIVE) 的支持下, 研制了 0.214 THz 折叠波导行波管用于功率模块中, 输出功率为 56 W, 带宽 5 GHz. 美国海军实验室采用 UV-LIGA 技术研制成功了 220 GHz 折叠波导放大器, 利用 218.4 GHz 的 EIK 和 214 GHz 的 EIO 作为驱动源, 获得 60 W 的输出功率, 瞬时带宽 15 GHz.

国内中电 12 所在 W 波段的行波管的研制方面取得了显著成绩, 于 2014 年研制成功 W 波段 100 W 脉冲行波管放大器, 220 GHz 行波管的研制也取得了阶段性成果. 中国工程物理研究院率先研制成功 220 GHz 折叠波导行波管, 单频点上输出功率 252 mW, 增益大约 14 dB. 电子科技大学也开展了 W 波段、140 GHz、220 GHz 甚至更高频段的行波管的理论分析和优化设计工作. 中科院电子所在 W 波段行波管的研制取得了阶段性的成果, 获得输出功率大于 40 W. 研制出了我国首只频率为 308 GHz 的折叠波导振荡器, 输出功率大于 2 W.

超导电子器件方面, 超导探测技术具有灵敏度高、噪声低、速度快等特点, 在极限灵敏度探测领域以及众多基于极限灵敏度探测前沿科学领域中扮演着非常重要的角色. 主要的超导电子器件包括: 超导纳米线单光子探测器件 (SNSPD)、超导相变边缘探测器 (TES)、超导微波动态电感探测器 (MKID)、超导热电子测辐射热仪 (HEB)、超导隧道结 (SIS) 等. 一些新兴交叉学科 (比如光子晶体、超材料、表面等离子体等) 和超导器件的结合也会产生新的光电技术应用领域.

超导纳米线单光子探测器件 (SNSPD) 目前国内外主要研究内容包括探测机理: SNSPD 的热点模型、本征探测效率以及其与光子能量的关联、时间抖动的起源、本征暗计数的起源与抑制、单光子探测的等效电学模型等. 器件材料与工艺: 不同超导材料、不同衬底材料的 SNSPD 的制备工艺和特性, 基于光学腔体结构以及介质反射膜结构的 SNSPD, 基于 Si、GaAs 衬底的光波导耦合 SNSPD, SNSPD 几何结构光学计算模拟以及其与探测效率的关系 (图 5), 不同波长的 SNSPD 特性, SNSPD 的背景暗计数抑制, 阵列 SNSPD 及 SFQ 读出电路等. 器件前沿应用探索: Si、GaAs 等不同衬底的 SNSPD 光子学集成研究、SNSPD 的系统集成以及 SNSPD 在量子通信、芯片检测、激光测距/成像、深空通信、生物荧光光谱方面应用研究 [81~95].

太赫兹、毫米波超导探测器 (MKID, HEB, SIS): 太赫兹、毫米波超导探测器主要包括相干探测器和非相干探测器. 相干探测器主要有超导 SIS 和 HEB 混频器, 实现太赫兹谱线的高灵敏度和高频率分辨率检测; 非相干探测器主要有超导 MKIDs 和 TES 探测器, 实现太赫兹频段的连续谱观测. 目前国内外研究主要集中在高能隙超导 SIS 和 HEB 混频器在更高工作温度下的特性研究, 超导 SIS 和 HEB 混频器中等规模阵列接收机研制, 超导 HEB 混频器与量子级联激光器的集成基于超导 MKIDs 的单片集成光谱仪, 超导 SIS 和 HEB 混频器、超导 MKIDs 探测器在天文、大气和安全领域的应用研究.

1.5 人工电磁材料和器件

近些年来, 人们发现通过设计具有特定结构的人工电磁材料可以有效地调控电磁波的行为. 光子

图 5 (网络版彩图) 超导纳米线单光子探测器和半导体单光子探测器在可见光到近红外波段探测效率比较

Figure 5 (Color online) Comparison of detection efficiencies of SNSPD with semiconductor SPD

晶体、人工超材料、等离子激元介质等人造电磁介质皆归于人工电磁材料领域的研究范畴^[96~110]。人工电磁材料对电磁波具有强大的调控能力,能够实现自然材料中难以想象的一系列物理现象,如光子带隙、负折射、异常超透射、超吸收和电磁隐身等。在过去的十多年中,人工电磁材料研究取得了很高的成就,光子晶体、负折射材料、隐射衣等人工电磁材料研究成果先后于 2000 年、2003 年和 2006 年被 *Science* 评为年度十大科技进展之一。2011 年再一次被 *Science* 杂志评为 21 世纪前十年的十大科技进展之一。

人工微纳结构材料是有序排列的功能材料,由于周期调制导致的能带结构和局域场,可以操控光子和光生电子的传输特性,带来独特的光电响应。随着科学技术的迅猛发展,人们对有序人工微纳结构光电效应的研究得到了极大的深化,所关注的电磁波波段也从微波推进到太赫兹、红外,直至可见光波段;借助于各种微加工手段,人工结构材料的特征尺寸从毫米减小到微米、纳米;所关注的科学问题从初期的光散射,到光与物质的耦合、光电之间的转换,以及非线性相互作用。近来国际研究表明,人工微纳结构材料的技术发展不仅为光电子材料的突破带来了新希望,基于光子晶体对光子传输和分布调控的新概念,通过对红外器件结构,使得单个像元对红外光的响应不发生变化,但是,产生噪声整个单元的总归大大减少,提高光电耦合和光电转换,性能得到大的增强。分光与探测一体化器件,光谱分光与探测一体化器件是集分光系统与探测于一体的新型器件(图见参考文献[98]),可以大幅促进光谱仪器的微型化,显著降低体积、重量和提高可靠性,引起国内外的广泛关注,正在竞相研究微型光谱仪,日本滨松公司研发出了基于凹面光栅的微型光谱仪, *Nature Photonics* 于 2013 年报道了基于无序光子芯片的紧凑光谱仪^[110],我国提出并实现了基于集成微腔的分光器件,可直接与探测器一体化形成最小的微型光谱仪,是很有前景的微型光谱仪形式。偏振分光阵列器件,偏振是光学中独立于强度、光谱、相位和空间之外的重要信息维度,可获得丰富的目标和环境信息。可从常规强度探测“看得见”的能力提升到“分得清”的水平。国际上近几年陆续开展了偏振分光阵列器件研究,并初步报道

了一些原型器件, 我国刚刚起步, 尚无实际器件报道.

2 发展趋势分析

通过以上的国内外研究现状, 可以预计到, 未来高效信号辐射源和探测器件的研究发展趋势将集中在以下几方面.

2.1 太赫兹/长波红外器件设计、仿真与测试技术

随着太赫兹原理器件研究的深入, 未来微弱信号检测和处理是高灵敏太赫兹探测的重要动力, 系统设计的小型化是太赫兹器件广泛应用的主要趋势, 在此, 太赫兹传统探测、辐射源向高速响应、集成式、非制冷量子器件延伸, 并促进相关原理器件新的理论仿真设计和实验的紧密结合.

太赫兹器件的设计与测试技术. 传统太赫兹探测和辐射器件在工作温度和频率方面受到限制, 非制冷太赫兹辐射和探测作为未来重要的小型化太赫兹系统的核心部件, 使得太赫兹器件向非制冷新型原理器件拓展, 基于等离子体波固态太赫兹探测和辐射器件、热电子非制冷器件实现了传统器件所不能的工作频率、工作温度以及器件集成, 构建相关器件理论研究方法、器件工艺对于太赫兹系统的实用化是迫切需要的.

微弱信号检测相关电子学的开发成为太赫兹探测系统设计不可或缺的一部分, 除了探测器件之外, 基于读出电子学实现智能化信号采集、放大和处理是小型化太赫兹系统在天文物理、生物化学、成像等各方面研究的重要趋势, 且要求具有微弱信号处理能力的读出电路. 综合电子和光子调控, 探索突破激光器现有性能瓶颈的新材料、新结构、新物理. 在空间、时间与频谱维度上, 更精细地表征电子微观输运过程、光与物质的相互作用, 以及激光器的损耗与增益特性.

长波红外器件的设计与测试技术. 针对长波红外探测器件, 需要获得尽可能接近实际器件的物理参数, 才能建立精确物理模型, 进行数值仿真, 以分析器件性能. 但是往往一些物理参数是很难通过实验手段进行测量的, 因此可以借助于解析模型参数提取方法. 在基于解析模型所提取的关键参数基础上, 结合实验数据建立 (例如 $12\sim 15\ \mu\text{m}$) 长波器件的物理模型, 可以更加准确地分析不同温度下器件的暗电流机制, 以及光响应特性.

长波红外器件的特征参数与具体工艺过程 (尤其是表面钝化工艺) 的关联性和等效性的相关研究也甚少. 通过器件关键参数对外界条件依赖关系的探索, 结合激光诱导电流显微的表征方法, 分析不同钝化表面下器件的暗电流, 对明确具体钝化工艺影响暗电流大小的内在物理机制将具有重要的实际意义, 将为提高长波红外器件工艺处理的有效性提供有力的分析方法.

2.2 太赫兹/长波红外材料生长和器件研制

太赫兹/长波红外材料生长质量对于器件性能是至关重要的, 异质结外延生长以及化学气相沉积法 (CVD) 技术在未来各种固态太赫兹/长波红外器件的材料生长占据着主动地位.

基于异质结量子阱结构和二维纳米材料生长. 将开展高电子迁移率、高的载流子密度、低缺陷密度以及低的背景热噪声材料研究, 制备基于光子耦合的量子阱红外器件, 制备 II 类超晶格 InAs/GaSb 红外器件、发展以宽禁带半导体材料为主的太赫兹/长波红外材料 (InAs/GaSb 超晶格能带结构原理图见参考文献 [48]). 此外, 探索石墨烯类二维新型材料的单晶大面积 CVD 材料生长, 发展新一代太赫兹/长波红外器件 (图 6).

图 6 (网络版彩图) 一种基于多子探测机制室温工作纳米线红外探测器的原理示意图

Figure 6 (Color online) Schematic of novel InAs nanowire room-temperature visible/near-infrared photodetectors based on majority-carrier photodetection mechanism due to the photo-gating effect

基于碲镉汞长波红外器件材料生长. 衬底材料与碲镉汞材料的晶格匹配问题是影响碲镉汞材料生长的关键因素, 表面处理工艺则对 $12.5\ \mu\text{m}$ 碲镉汞长波红外器件性能具有极其重要的作用. 碲镉汞红外材料的生长方法主要有分子束外延 (MBE)、液相外延 (LPE)、化学气相沉积法 (CVD) 等.

太赫兹器件的制备. 主要研究内容涉及精密光谱分析的大功率单模太赫兹量子级联激光器及锁相激光器阵列; 太赫兹成像的近室温大功率激光器; 太赫兹计量的太赫兹光梳技术等. 同时, 基于高迁移率场效应管室温高灵敏度高速自混频太赫兹探测器是当前另一个研究热点. 通过对石墨烯进行微纳加工或制备双层石墨烯等手段, 形成 meV 量级的带隙, 使石墨烯非制冷超宽波段探测器的探测范围拓展至太赫兹波段, 发展石墨烯场效应管太赫兹探测器.

基于碲镉汞长波红外器件的制备. 该器件的性能主要取决于暗电流的抑制. 暗电流分本征暗电流和非本征暗电流. 非本征暗电流是由于表面漏电、陷阱隧穿、材料缺陷诱导漏电等材料和器件的工艺问题导致的暗电流. 非本征暗电流是可以通过材料改性、表面钝化、器件结构优化等电学操控的方法来抑制的.

基于量子阱结构等低维材料长波红外器件的制备. 通过设计新型耦合机制, 将正入射的红外光高效率地耦合进入量子阱激活区, 并改变光的传播方向, 极大地增加有效吸收长度, 增加光子的有效吸收, 提高量子效率; 或通过量子阱结构的改善和集成, 改善光生载流子的输运进而改善器件的暗电流特性, 从而提高器件的整体性能.

研究 II 类超晶格少数载流子和表面暗电流的机制, 以摸索提高少数载流子寿命和降低表面暗电流的途径. 利用 GaAs 作为替代衬底也是 II 类超晶格红外探测材料生长实现长波红外器件制备的有效途径之一 (图见参考文献 [53]).

2.3 毫米波射频器件

纵观毫米波/太赫兹电子学的研究, 学科方向发展趋势包括下面 3 个方面, 即 (1) 具有更高 f_T 与 f_{Max} 的毫米波/太赫兹电子学器件的研究; (2) 高速、低阻互联的在片毫米波/太赫兹单片集成技术 (TMICs); (3) 基于真空电子器件的等比例缩小而制成的高效率毫米波/太赫兹大功率放大器 (HPA). 从高性能半导体材料、核心半导体制造工艺流程、一体化封装、自动化测试设备等毫米波/太赫兹技术的系统化研究路线, 其目的在于发展: 毫米波/太赫兹集成电路及其系统应用, 最终实现一个实用化/工程化/产品化的现代毫米波/太赫兹固态电子系统.

2.4 真空电子器件、超导电子器件

高功率宽频带的行波放大器. 宽带行波管是电子对抗干扰机的首选放大器, 另外, 天线增益太高会使波束过窄不易瞄准地方雷达, 因此实际上只有靠提高干扰机的功率来改善干扰效果. 由于毫米波、短毫米波乃至太赫兹行波管及其制造技术涉及到国家的核心利益, 需要自力更生, 需开展宽带大功率行波管的研究工作.

返波振荡器研究. 返波振荡器是一类重要的功率源, 将主要研究突破小尺寸阴极制备、高频结构研制、高精度整管装配等关键技术, 研制出工作频率在 340 GHz 的振荡器, 实现输出功率大于 10 mW 的研究目标.

平面化集成真空放大器. 平面化集成真空放大器主要包括平面型行波管、平面型速调管以及各类平面型振荡器件. 整个管子只有电子枪是唯一不采用印制方法的部件, 使得管子具有体积小、加工工艺简单以及制作成本低的优势.

超导纳米线单光子探测器器件 (SNSPD). SNSPD 的未来发展将更加深入和注重高端技术, 在深入研究探测机理的基础上, 针对应用需求全面提升各项性能参数, 比如: 实现接近 100% 探测效率, 发展高速、阵列等新一代 SNSPD 技术.

太赫兹、毫米波超导探测器 (MKID, HEB, SIS). 超导 SIS 和 HEB 混频器的未来发展将更加注重多波束探测器阵列. 通过超导 MKIDs 探测器与射频滤波器的集成, 实现中等频率分辨率的单片光谱仪. 集中研究高能隙超导 SIS 和超导 HEB 混频器在更高工作温度下的特性研究, 超导 SIS 和超导 HEB 混频器与中频低噪声放大器的集成, 超导 HEB 混频器与 QCL 的低温集成技术, 开展超导 SIS、HEB 混频器和超导 MKIDs 探测器在天文、大气和安全领域的应用研究.

2.5 人工电磁材料和器件

利用人工电磁材料理念研究设计新型长波红外、太赫兹和毫米波段高效信号辐射源和探测器件也逐渐体现出其自身所具有的优势, 并将成为本领域学科发展的一个重要方向. 人工电磁材料对电磁波的调控能力几乎可以涵盖其各个方面, 包括电磁波的强度、偏振和相位. 因此, 不但可以非常高效地控制辐射源的工作方式, 而且在探测器件方面也可以更加全面清晰地获得被探测物体的信息.

人工电磁敏感材料制备及相关器件. 在材料方面制备具有特定波段响应的共振环、微腔, 在低维纳米材料包括石墨烯、碳纳米管、金属微结构阵列在内的强吸收材料, 围绕太赫兹/长波红外深亚波长耦合制备石墨烯微纳光子结构, 实现基于半导体表面等离激元的太赫兹或长波红外发射和探测效率器件.

人工电磁材料偏振探测器件. 不同的物体以及同种物体在不同的状态其所表现出的对电磁波偏振的响应反差很大. 将通过电磁人工的结构制备, 特殊光子微腔的制备, 获得电磁波的偏振的探测, 应

图 7 (网络版彩图) 表面等离子激元共振增强二维材料红外探测器的原理示意图

Figure 7 (Color online) Schematic of few-layer two-dimensional phototransistor with periodic Au nanoarrays

图 8 (网络版彩图) 红外窄带信号辐射源样品扫描电镜图 (俯视)

Figure 8 (Color online) Top-view SEM image of the fabricated narrow-band near-infrared emitter

用于辨别出具有偏振伪装的人造目标, 实现高目标探测和识别能力.

光电耦合增强的红外器件. 研制出一种基于低维材料场效应晶体管高增益外探测器, 以克服当前两种主要单光子雪崩红外探测器、经典红外探测器存在的不足. 另一方面, 将研制红外器件涉及到多子探测、光控栅效应等新型器件结构以及短沟道纳米线的弹道输运、一维或零维与二维材料光电特性耦合结构等, 探索新的探测机理与光电效应 (图 7).

分光与探测一体化器件. 分光与探测一体化器件研制是该领域学科方向发展趋势之一, 研制短波、中波和长波的红外分光与探测一体化器件, 获得成像探测逐渐向实时偏振成像探测和实时全 Stokes 实力偏振成像探测方向发展, 制备线偏振分光阵列器件、圆偏振分光阵列器件、线/圆偏振混成分光阵列器件等核心光学器件, 以及这些器件与相应探测器一体化的器件 (图 8).

3 需重点开展研究的领域与相关政策建议

基于以上国内外研究现状和趋势分析可以发现, 各学科交叉与融合越来越多, 我们可以聚焦在其中共性和关键的基础科学问题进行研究, 辐射源和探测技术的发展, 支撑国家在毫米波、微波、太赫兹、长波红外领域高技术的发展. 高效信号辐射源和探测器件涉及到辐射的产生、传输、探测等过程, 因此, 重大科学问题与优先资助领域以及与其他学科交叉的重大方向可以总结如下.

3.1 太赫兹/长波红外器件设计、仿真与测试技术

太赫兹材料与器件的设计, 构建相关器件理论研究方法. 太赫兹微弱信号检测和信息处理系统设计, 更精细地表征电子微观输运过程、光与物质的相互作用.

长波红外材料与器件接近实际器件的物理参数的获得, 建立精确物理模型, 进行数值仿真, 分析器件性能, 建立微纳米尺度的器件单元光电响应测试技术, 获得红外器件的高信噪比.

3.2 太赫兹/长波红外材料生长和器件研制

太赫兹材料生长和器件研制, 主要包括: 量子级联太赫兹材料与器件、太赫兹量子阱结构与器件, 基于场效应等离激元的太赫兹材料与器件.

长波半导体红外材料生长和器件制备, 包括 HgCdTe 长波探测材料与器件的制备器件, 表面等离子激元增强的量子阱长波红外器件, II 类超晶格红外材料与器件的制备, 新一代非致冷石墨烯超宽波段器件.

3.3 毫米波射频器件

研究自旋电子学微波器件并推动自旋电子学微波技术的发展, 突破自旋整流效应面对的重大关键技术和共性技术, 满足未来科学技术、医保安检以及国民经济的可持续发展的需求. 该领域的主要研究方向包括: (1) 自旋电子器件中自旋动力学过程的研究; (2) 自旋电子微波器件中自旋动力学过程的新型检测技术; (3) 高度敏感自旋电子学微波器件的研制; (4) 自旋电子学微波成像技术.

3.4 真空电子器件、超导电子器件

太赫兹真空电子、超导电子器件的共性和关键科学问题包括下面 5 个方面. (1) 高效率宽频带新型慢波系统的机理研究. 为了实现高功率输出必须提高注波相互作用效率, 有效地提高功率输出、增加器件工作带宽, 使得研制的器件在电子对抗和反隐身雷达等方面具有重要应用前景, 是目前亟待解决的科学问题. (2) 微型电子注及注波相互作用系统集成技术研究. 采取不同的方案将多个微型真空电子器件进行集成, 对于电子注的集成, 可以采用分布电子注系统; 对于分布式平面高频及注波相互作用系统, 则可以采用多个高频结构的串行或并行等. (3) 冷阴极关键技术研究. 在真空电子器件内部实际的真空环境下, 实现场致发射阵列阴极的高电流密度稳定工作, 分析电流密度和跨导 (阳极电流对栅极电压曲线的斜率) 等重要参量. (4) 高性能的超导纳米线单光子探测技术. 探索大光敏面 SNSPD, 高速、阵列 SNSPD. 探索片上集成 SNSPD 的光子学系统, 开展 SNSPD 在量子通信、量子计算/模拟、激光测距/成像等新兴领域前沿应用探索. 探索新型光耦合结构, 提高 TES 的耦合效率和集成度. 开展超导 TES 在天文、量子信息和计量领域的应用探索. (5) 低温微弱信号放大技术 (SQUID 电流放大器、参量放大器). 研究基于超导量子干涉器件 (SQUID) 的低温电流放大器和超导 Josephson 结参量放大器的芯片设计与制备、低温测量与性能表征以及封装集成技术, 实现低噪声微弱信号放大.

3.5 人工电磁材料和器件

利用新型微结构和具有特殊宏观序列人工电磁材料实现对长波红外、太赫兹波段电磁波的有效控制, 集成人工微结构材料增强太赫兹和长波红外器件的光电转换效率.

实现光谱分光与探测单元一体化的光电子器件, 研制偏振分光阵列器件, 包括线偏振分光阵列器件、圆偏振分光阵列器件、线/圆偏振混成分光阵列器件等核心光学器件, 以及这些器件与相应探测器一体化的器件. 实现高效红外单色辐射源及阵列, 包括红外发射膜与窄带多层膜结合形成的高效红外单色辐射源, 以及高效红外单色辐射源阵列.

4 小结

基于信号辐射源和探测器件的国内外研究现状, 本文从太赫兹/长波红外器件设计、仿真与测试技术、太赫兹/长波红外材料生长和器件研制、毫米波射频器件、真空/超导电子器件、人工电磁材料和器件等 5 个方面分析了信号辐射源和探测器件的发展趋势, 并提出了需重点开展研究的科学问题. 通过对本研究领域的细致梳理和布局, 必将进一步强化我国辐射与探测物理学的研究, 更好地支撑我国光电技术的持续发展.

参考文献

- 1 Viti L, Coquillat D, Politano A, et al. Plasma-wave terahertz detection mediated by topological insulators surface states. *Nano Lett*, 2016, 16: 80–87
- 2 Cai X H, Sushkov A B, Jadidi M M, et al. Plasmon-enhanced terahertz photodetection in graphene. *Nano Lett*, 2015, 15: 4295–4302
- 3 Titova L V, Pint C L, Zhang Q, et al. Generation of terahertz radiation by optical excitation of aligned carbon nanotubes. *Nano Lett*, 2015, 15: 3267–3272
- 4 Vicarelli L, Vitiello M S, Coquillat D, et al. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors. *Nature Mater*, 2012, 11: 865–871
- 5 Pechtel L, Song L, Schuh D, et al. Time-resolved ultrafast photocurrents and terahertz generation in freely suspended graphene. *Nature Commun*, 2012, 3: 646
- 6 Zak A, Andersson M A, Bauer M, et al. Antenna-integrated 0.6 THz FET direct detectors based on CVD graphene. *Nano Lett*, 2014, 14: 5834–5838
- 7 Berry C W, Wang N, Hashemi M R, et al. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes. *Nature Commun*, 2013, 4: 1622
- 8 He X W, Fujimura N, Lloyd J M, et al. Carbon nanotube terahertz detector. *Nano Lett*, 2014, 14: 3953–3958
- 9 Yan J, Kim M H, Elle J A, et al. Dual-gated bilayer graphene hot-electron bolometer. *Nature Nanotech*, 2012, 7: 472–478
- 10 Di Pietro P, Ortolani M, Limaj O, et al. Observation of dirac plasmons in a topological insulator. *Nature Nanotech*, 2013, 8: 556–560
- 11 Cai X, Sushkov A B, Suess R J, et al. Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene. *Nature Nanotech*, 2014, 9: 814–819
- 12 Koppens F H L, Mueller T, Avouris P, et al. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems. *Nature Nanotech*, 2014, 9: 780–793
- 13 Tong J Y, Muthee M, Chen S Y, et al. Antenna enhanced graphene THz emitter and detector. *Nano Lett*, 2015, 15: 5295–5301
- 14 Viti L, Hu J, Coquillat D, et al. Black phosphorus terahertz photodetectors. *Adv Mater*, 2015, 27: 5567–5572
- 15 Vitiello M S, Coquillat D, Viti L, et al. Room-temperature terahertz detectors based on semiconductor nanowire field-effect transistors. *Nano Lett*, 2012, 12: 96–101

- 16 Rinzan M, Jenkins G, Drew H D, et al. Carbon nanotube quantum dots as highly sensitive terahertz-cooled spectrometers. *Nano Lett*, 2012, 12: 3097–3100
- 17 Sirtori C, Barbieri S, Colombelli R. Wave engineering with THz quantum cascade lasers. *Nature Photon*, 2013, 7: 691–701
- 18 Burghoff D, Kao T Y, Han N R, et al. Terahertz laser frequency combs. *Nature Photon*, 2014, 8: 462–467
- 19 Xu G Y, Colombelli R, Khanna S P, et al. Efficient power extraction in surface-emitting semiconductor lasers using graded photonic heterostructures. *Nature Commun*, 2012, 3: 952
- 20 Rosch M, Scalari G, Beck M, et al. Octave-spanning semiconductor laser. *Nature Photon*, 2015, 9: 42–47
- 21 Geiser M, Castellano F, Scalari G, et al. Ultrastrong coupling regime and plasmon polaritons in parabolic semiconductor quantum wells. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 106402
- 22 Scalari G, Maissen C, Turcinkova D, et al. Ultrastrong coupling of the cyclotron transition of a 2D electron gas to a THz metamaterial. *Science*, 2012, 335: 1323–1326
- 23 Mahler L, Tredicucci A, Beltram F, et al. Quasi-periodic distributed feedback laser. *Nature Photon*, 2010, 4: 165–169
- 24 Vijayraghavan K, Jiang Y F, Jang M, et al. Broadly tunable terahertz generation in mid-infrared quantum cascade lasers. *Nature Commun*, 2013, 4: 2021
- 25 Walther C, Scalari G, Amanti M I, et al. Microcavity laser oscillating in a circuit-based resonator. *Science*, 2010, 327: 1495–1497
- 26 Vitiello M S, Consolino L, Bartolini S, T, et al. Quantum-limited frequency fluctuations in a terahertz laser. *Nature Photon*, 2012, 6: 525–528
- 27 Zanutto S, Mezzapesa F P, Bianco F, et al. Perfect energy-feeding into strongly coupled systems and interferometric control of polariton absorption. *Nature Phys*, 2014, 10: 830–834
- 28 Barbieri S, Gellie P, Santarelli G, et al. Phase-locking of a 2.7-THz quantum cascade laser to a mode-locked erbium-doped fibre laser. *Nature Photon*, 2010, 4: 636–640
- 29 Consolino L, Taschin A, Bartolini P, et al. Phase-locking to a free-space terahertz comb for metrological-grade terahertz lasers. *Nature Commun*, 2012, 3: 1040
- 30 Barbieri S, Ravaro M, Gellie P, et al. Coherent sampling of active mode-locked terahertz quantum cascade lasers and frequency synthesis. *Nature Photon*, 2011, 5: 306–313
- 31 Vitiello M S, Nobile M, Ronzani A, et al. Photonic quasi-crystal terahertz lasers. *Nature Commun*, 2014, 5: 5884
- 32 Lei W, Antoszewski J, Faraone L. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors. *Appl Phys Rev*, 2015, 2: 041303
- 33 Hall D J, Buckle L, Gordon N T, et al. High-performance long-wavelength HgCdTe infrared detectors grown on silicon substrates. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 2113–2115
- 34 Martyniuk P, Rogalski A. MWIR barrier detectors versus HgCdTe photodiodes. *Infrared Phys Tech*, 2015, 70: 125–128
- 35 Hu W D, Ye Z H, Liao L, et al. 128 x 128 long-wavelength/mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultralow spectral cross talk. *Opt Lett*, 2014, 39: 5184–5187
- 36 Boieriu P, Grein C H, Velicu S, et al. Effects of hydrogen on majority carrier transport and minority carrier lifetimes in long wavelength infrared HgCdTe on Si. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 062106
- 37 Jozwikowska A, Jozwikowski K, Antoszewski J, et al. Generation-recombination effects on dark currents in CdTe-passivated midwave infrared HgCdTe photodiodes. *J Appl Phys*, 2005, 98: 014504
- 38 Jozwikowski K, Kopytko M, Rogalski A, et al. Enhanced numerical analysis of current-voltage characteristics of long wavelength infrared n-on-p HgCdTe photodiodes. *J Appl Phys*, 2010, 108: 074519
- 39 Qiu W C, Hu W D, Lin T, et al. Temperature-sensitive junction transformations for mid-wavelength HgCdTe photovoltaic infrared detector arrays by laser beam induced current microscope. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 191106
- 40 Qiu W C, Hu W D, Chen L, et al. Dark current transport and avalanche mechanism in HgCdTe electron-avalanche photodiodes. *IEEE Trans Electron Dev*, 2015, 62: 1926–1931
- 41 Hu W D, Chen X S, Ye Z H, et al. Dependence of ion-implant-induced LBIC novel characteristic on excitation intensity for long-wavelength HgCdTe-based photovoltaic infrared detector pixel arrays. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2013, 19: 4100107
- 42 Martyniuk P, Antoszewski J, Martyniuk M, et al. New concepts in infrared photodetector designs. *Appl Phys Rev*,

- 2014, 1: 041102
- 43 Zuo D, Qiao P F, Wasserman D, et al. Direct observation of minority carrier lifetime improvement in InAs/GaSb type-II superlattice photodiodes via interfacial layer control. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 141107
 - 44 Lee S J, Ku Z Y, Barve A, et al. A monolithically integrated plasmonic infrared quantum dot camera. *Nature Commun*, 2011, 2: 286
 - 45 Stanley R. Plasmonics in the mid-infrared. *Nature Photon*, 2012, 6: 409–411
 - 46 Chang C C, Sharma Y D, Kim Y S, et al. A surface plasmon enhanced infrared photodetector based on InAs quantum dots. *Nano Lett*, 2010, 10: 1704–1709
 - 47 Schuster J, Bellotti E. Numerical simulation of crosstalk in reduced pitch HgCdTe photon-trapping structure pixel arrays. *Opt Express*, 2013, 21: 14712–14727
 - 48 Razeghi M, Nguyen B M. Advances in mid-infrared detection and imaging: a key issues review. *Rep Prog Phys*, 2014, 77: 082401
 - 49 Chen G X, Haddadi A, Hoang A M, et al. Demonstration of type-II superlattice MWIR minority carrier unipolar imager for high operation temperature application. *Opt Lett*, 2015, 40: 45–47
 - 50 Hoang A M, Chen G, Chevallier R, et al. High performance photodiodes based on InAs/InAsSb type-II superlattices for very long wavelength infrared detection. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 251105
 - 51 Tian Z B, Schuler-Sandy T, Krishna S. Electron barrier study of mid-wave infrared interband cascade photodetectors. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 083501
 - 52 DeCuir E A, Meissner G P, Wijewarnasuriya P S, et al. Long-wave type-II superlattice detectors with unipolar electron and hole barriers. *Opt Eng*, 2012, 51: 124001
 - 53 Haddadi A, Ramezani-Darvish S, Chen G X, et al. High operability 1024×1024 long wavelength type-II superlattice focal plane array. *IEEE J Quantum Electron*, 2012, 48: 221–228
 - 54 Steenbergen E H, Connelly B C, Metcalfe G D, et al. Significantly improved minority carrier lifetime observed in a long-wavelength infrared III-V type-II superlattice comprised of InAs/InAsSb. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 251110
 - 55 Yang R Q, Tian Z B, Klem J F, et al. Interband cascade photovoltaic devices. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 063504
 - 56 Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays. *J Appl Phys*, 2009, 105: 091101
 - 57 Ting D Z Y, Hill C J, Soibel A, et al. A high-performance long wavelength superlattice complementary barrier infrared detector. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 023508
 - 58 Kim H S, Plis E, Rodriguez J B, et al. Mid-IR focal plane array based on type-II InAs/GaSb strain layer superlattice detector with nBn design. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 183502
 - 59 Mohseni H, Michel E, Sandoen J, et al. Growth and characterization of InAs/GaSb photoconductors for long wavelength infrared range. *Appl Phys Lett*, 1997, 71: 1403–1405
 - 60 Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Auger lifetime enhancement in InAs-Ga_{1-x}In_xSb superlattices. *Appl Phys Lett*, 1994, 64: 3160–3162
 - 61 Smith D L, Mailhot C. Proposal for strained type-II superlattice infrared detectors. *J Appl Phys*, 1987, 62: 2545–2548
 - 62 Risacher C, Güsten R, Stutzki J, et al. First supra-THz heterodyne array receivers for astronomy with the SOFIA observatory. *IEEE Trans Terahertz Sci Tech*, 2016, 6: 199–211
 - 63 Dahlberg K, Kiuru T, Mallat J, et al. Mixer-based characterization of millimeter-wave and terahertz single-anode and antiparallel schottky diodes. *IEEE Trans Terahertz Sci Tech*, 2014, 4: 552–559
 - 64 Grossman E N, Leong K, Mei X B, et al. Low-frequency noise and passive imaging with 670 GHz HEMT low-noise amplifiers. *IEEE Trans Terahertz Sci Tech*, 2014, 4: 749–752
 - 65 Seeds A J, Shams H, Fice M J, et al. TeraHertz photonics for wireless communications. *J Lightwave Tech*, 2015, 33: 579–587
 - 66 Zamora A, Mei G, Leong K M K H, et al. A submillimeter wave InP HEMT multiplier chain. *IEEE Microw Wirel Comp Lett*, 2015, 25: 591–593
 - 67 Samoska L A. An overview of solid-state integrated circuit amplifiers in the submillimeter-wave and THz regime. *IEEE Trans Terahertz Sci Tech*, 2011, 1: 9–24
 - 68 Chattopadhyay G. Technology, capabilities, and performance of low power terahertz sources. *IEEE Trans Terahertz Sci Tech*, 2011, 1: 33–53

- 69 Antes J, Boes F, Meier D, et al. Ultra-wideband single-balanced transmitter-MMIC for 300 GHz communication systems. In: Proceedings of IEEE Mtt-S International Microwave Symposium (ImS), Tampa, 2014. 1–3
- 70 Siegel P H. Terahertz technology. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2002, 50: 910–928
- 71 Armstrong C M. The truth about terahertz. *IEEE Spectrum*, 2012, 49: 36–41
- 72 Rosker M. Terahertz Device Characterization and Security Applications. In: Proceedings of MTT Terahertz Workshop. 2007
- 73 Shur M. Terahertz technology: devices and applications. In: Proceedings of the 31st European Solid-State Device Research Conference, Grenoble, 2005. 13–21
- 74 Booske J H, Dobbs R J, Joye C D, et al. Vacuum electronic high power terahertz sources. *IEEE Trans Terahertz Sci Tech*, 2011, 1: 54–75
- 75 Zhang Z. Research progress of THz traveling wave tubes. *Laser Infrared*, 2012, 42: 250–257
- 76 Ryskin N M, Karetnikova T A, Rozhnev A G, et al. Development and modeling of a sheet-beam sub-THz traveling wave tube. In: Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Beijing, 2015. 1–2
- 77 Paoloni C, Carlo A D, Brunetti F, et al. Design and fabrication of a 1 THz backward wave amplifier. *Terahertz Sci Tech*, 2011, 4: 149–163
- 78 Borisov A A, Budzinsky U A, Bykovsky S V, et al. The development of vacuum microwave devices in ISTOK. In: Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference, Bangalore, 2011. 437–438
- 79 Tucek J C, Basten M A, Gallagher D A, et al. 220 GHz power amplifier development at Northrop Grumman. In: Proceedings of the 15th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Monterey, 2014. 553–554
- 80 Liu W, Zhang Z, Zhao C, et al. Test of terahertz extended interaction oscillator. In: Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Beijing, 2015. 1–2
- 81 Hadfield R H, Johansson G. *Superconducting Devices in Quantum Optics*. Berlin: Springer, 2016
- 82 Marsili F, Verma V B, Stern J A, et al. Detecting single infrared photons with 93% system efficiency. *Nature Photon*, 2013, 7: 210–214
- 83 Saglamyurek E, Jin J, Verma V B, et al. Quantum storage of entangled telecom-wavelength photons in an erbium-doped optical fibre. *Nature Photon*, 2015, 9: 83–87
- 84 Renema J J, Gaudio R, Wang Q, et al. Experimental test of theories of the detection mechanism in a nanowire superconducting single photon detector. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 117604
- 85 Li H, Chen S, You L, et al. Superconducting nanowire single photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging. *Opt Express*, 2016, 24: 3535–3542
- 86 Yang X Y, Li H, Zhang W J, et al. Superconducting nanowire single photon detector with on-chip bandpass filter. *Opt Express*, 2014, 22: 16267–16272
- 87 Baryshev A, Baselmans J J A, Freni A, et al. Progress in antenna coupled kinetic inductance detectors. *IEEE Trans Terahertz Sci Tech*, 2011, 1: 112–123
- 88 Shurakov A, Lobanov Y, Goltsman G. Superconducting hot-electron bolometer: from the discovery of hot-electron phenomena to practical applications. *Supercond Sci Tech*, 2016, 29: 023001
- 89 Holland W S, Bintley D, Chapin E L, et al. SCUBA-2: the 10 000 pixel bolometer camera on the James Clerk Maxwell telescope. *Mon Not Royal Astron Soc*, 2013, 430: 2513–2533
- 90 Zhang W, Khosropanah P, Gao J R, et al. Quantum noise in a terahertz hot electron bolometer mixer. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 111113
- 91 Megrant A, Neill C, Barends R, et al. Planar superconducting resonators with internal quality factors above one million. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 113510
- 92 de Visser P J, Baselmans J J A, Bueno J, et al. Fluctuations in the electron system of a superconductor exposed to a photon flux. *Nature Commun*, 2014, 5: 3130
- 93 Bakurskiy S V, Klenov N V, Soloviev I I, et al. Theoretical model of superconducting spintronic SISFS devices. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 192603
- 94 Calkins B, Lita A E, Fox A E, et al. Faster recovery time of a hot-electron transition-edge sensor by use of normal metal heat-sinks. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 241114
- 95 Yates S J C, Baselmans J J A, Endo A, et al. Photon noise limited radiation detection with lens-antenna coupled microwave kinetic inductance detectors. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 073505

- 96 Zheludev N I. The road ahead for metamaterials. *Science*, 2010, 328: 582–583
- 97 Costantini D, Lefebvre A, Coutrot A L, et al. Plasmonic metasurface for directional and frequency-selective thermal emission. *Phys Rev Appl*, 2015, 4: 014023
- 98 Luo L, Chatzakakis I, Wang J G, et al. Broadband terahertz generation from metamaterials. *Nature Commun*, 2014, 5: 3055
- 99 Hao J M, Zhou L, Qiu M. Nearly total absorption of light and heat generation by plasmonic metamaterials. *Phys Rev B*, 2011, 83: 165107
- 100 Hao J M, Wang J, Liu X L, et al. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 251104
- 101 Hao J M, Yuan Y, Ran L X, et al. Manipulating electromagnetic wave polarizations by anisotropic metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 251104
- 102 Qu C, Ma S J, Hao J M, et al. Tailor the functionalities of metasurfaces based on a complete phase diagram. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 235503
- 103 Liu X L, Tyler T, Starr T, et al. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 045901
- 104 Argyropoulos C, Le K Q, Mattiucci N, et al. Broadband absorbers and selective emitters based on plasmonic Brewster metasurfaces. *Phys Rev B*, 2013, 87: 205112
- 105 Schaich W L, Puscasu I. Tuning infrared emission from microstrip arrays. *Phys Rev B*, 2012, 86: 245423
- 106 Lu D, Kan J J, Fullerton E E, et al. Enhancing spontaneous emission rates of molecules using nanopatterned multilayer hyperbolic metamaterials. *Nature Nanotech*, 2014, 9: 48–53
- 107 Mattiucci N, D'Aguanno G, Alu A, et al. Taming the thermal emissivity of metals: a metamaterial approach. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 201109
- 108 Puscasu I, Schaich W L. Narrow-band, tunable infrared emission from arrays of microstrip patches. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 233102
- 109 Brucoli G, Bouchon P, Haidar R, et al. High efficiency quasi-monochromatic infrared emitter. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 081101
- 110 Redding B, Liew S F, Sarma R, et al. Compact spectrometer based on a disordered photonic chip. *Nature Photon*, 2013, 7: 746–751

Efficient signal emitters and detectors

Yan HUANG¹, Lin WANG¹, Weida HU¹, Jianzhen PAN¹, Jiaming HAO¹, Gangyi XU¹, Jianxin CHEN¹, Lixing YOU², Xiaowei SUN², Gang WANG³, Xiaoshuang CHEN^{1*} & Wei LU^{1*}

¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

² Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

³ Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

*E-mail: xschen@mail.sitp.ac.cn, luwei@mail.sitp.ac.cn

Abstract This paper summarizes recent progress in studies on signal emitters and detector devices. The studies are grouped into five aspects: design of THz/LWIR devices, development of simulation and testing technology, research on THz/LWIR material growth and devices, progress made in millimeter wave RF devices, vacuum/superconducting electronic devices, and advances in artificial electromagnetic materials and devices. Potential important future directions in this area are also discussed.

Keywords terahertz, LWIR, millimeter wave radio frequency, vacuum electron, superconducting electronics, artificial electromagnetic material

lations.

Yan HUANG was born in 1979, in Jiangsu. She received a Ph.D. degree in microelectronics and solid-state electronics from the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China, in 2008. Currently, she is an associate professor at the Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences. Her current research interests include infrared semiconductor materials simu-

tors with graphene and other materials. He is a member of the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences.

Lin WANG was born in 1985, in Zhejiang. He received a Ph.D. degree in microelectronics and solid-state electronics (with honors) from the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China, in 2013. Currently, he is an associate professor at the Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences. His current research interests include uncooled terahertz detectors with graphene and other materials. He is a member of the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences.

clude fabrication and characterization of infrared photodetectors/photodiodes/phototransistors. He is also serving as the associate editor of *Infrared Physics & Technology*, the executive editor of *Optical and Quantum Electronics*, a program committee member of SPIE DCS Defense and Security-Infrared Technology and Applications XLII, and a program committee member of the NUSOD.

Weida HU was born in 1979. He received a Ph.D. degree in microelectronics and solid-state electronics from the Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, in 2007. Currently, he is a full professor at the Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include

the associate editor-in-chief of the *Journal of Applied Physics*. He has been awarded the Distinguished Young Scholar of the National Science Foundation of China award, and won the second prizes for the National Natural Science Award and the National Invention Award.

Wei LU was born in 1962, in Zhejiang. He received a Ph.D. degree in microelectronics and solid-state electronics from the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China, in 1988. Currently, he is a full professor at the Shanghai Institute of Technology Physics, as well as the director of the Institute. His current research interests include optoelectronics, semiconductor physics, and solid spectroscopy. He is