

· 学科进展 ·

微纳系统材料、制造与器件物理研究进展

封松林* 王曦 王跃林 曹俊诚 李昕欣 龚谦 李铁

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

[摘要] 本文基于“微纳系统材料、制造与器件物理”国家自然科学基金创新研究群体的研究成果,系统综述了纳米材料与纳米效应、纳米传感器件物理与器件设计、基于 MEMS 的纳米制造技术以及高性能微纳传感器、红外及 THz 波段探测等方面的研究进展,并简要介绍了本创新研究群体研制出的超微量快速检测微纳传感器及其应用。

[关键词] 纳米材料, 纳米效应, 微纳制造, 微纳传感器

随着世界经济快速发展,人类活动对自然影响越来越大,由于人类的工业活动,温室气体排放呈指数增长,自然灾害、环境污染、食品安全事件和人为突发事件防不胜防,自然环境监测、突发事件应急监控的需求越来越迫切;世界范围内贫富差距加剧、民族冲突、意识形态矛盾、恐怖事件越来越频繁,要地、人口稠密区、公共场所的监控需求也越来越迫切。“微纳系统材料、制造与器件物理”创新研究群体针对上述背景,以烈性爆炸物(如 TNT 等)、有毒有害化学物质(如沙林等)、毒品和环境有害物等的超微量快速检测为突破口,系统地开展纳米材料与纳米效应、纳米传感器件物理与器件设计、基于 MEMS 的纳米制造技术以及高性能微纳传感器、红外及 THz 波段探测等几个层面的研究,取得的主要成果如下:(1) 研制出超微量快速检测微纳传感器,其中沙林检测分辨率比现有水平提高一个数量级,提高了检测的可靠性;(2) 实现了复杂环境下 TNT 和毒品快速检测;(3) 研制出 CO₂、沙林等气体检测微纳传感器,并在重要场合应用;(4) 建立了纳米材料和纳米制造技术规范,发现了新的纳米效应,提出相应的模型为我国进行其他微纳器件的研究提供效应、理论、设计和制造基础。

1 纳米材料与纳米效应

研究了低成本、具有高顶层硅均匀性的 SOI 材料,为纳米效应和器件研究提供了关键材料支持。

发展的纳米材料力-电-结构的制样和表征平台,可以对不同纳米材料在原子尺度下研究纳米结构的力电物理特性与晶格结构的关系,为相关材料在纳米器件中的应用提供了材料依据。针对红外检测中对激光器的需求,研制了 III-V 族/Ge/Si 融合微结构材料,并成功实现了激射,为未来利用中远红外谱进行分析奠定了基础。

1.1 面向微纳传感应用的 SOI 材料

SOI 材料独有的三明治结构为精确控制材料的多种物理参数提供了可能,应用 SOI 材料制造微纳传感器件将有助于器件性能提升、参数调控与工艺简化^[1]。注氧隔离技术(Separation by implanted oxygen: SIMOX)因其制备的 SOI 材料具有极佳的顶层硅厚度均匀性和埋氧层厚度均匀性,成为应用于微纳传感器的 SOI 材料主流制备技术之一。如何突破剂量窗口的物理限制,进一步降低氧离子注入剂量并提升埋氧层质量成为低成本 SIMOX 技术研究的热点和关键。在系统研究氧离子注入的缺陷调控机理及其内吸杂作用物理机制,我们提出了一种改进的两步氧离子注入工艺^[2]。第一步注入 $3.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 剂量的氧离子,形成氧沉淀层,第二步室温注入约 1% 的注入剂量 ($3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) 氧离子,能够自主在氧沉淀层上方形成由非晶硅组成缺陷层。此缺陷层在 SIMOX 高温退火过程中,将进一步转变为多晶,其晶粒界面形成氧扩散通道,能够有效促进氧元素的内扩散,加速埋氧层的形成与增厚。通过

* Email: fengsl@mail.sim.ac.cn

本文于 2014 年 1 月 2 日收到。

改进的两步氧离子注入工艺,增加约 1% 的注入剂量即可使埋氧层厚度增厚 30 nm,与注入剂量窗口

相比,降低了 20% 的总注入剂量,有效地突破了剂量窗口的物理限制,如图 1 所示^[2]。

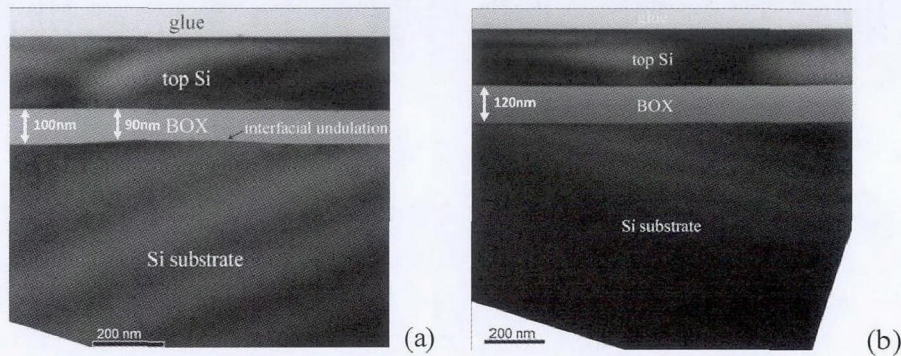


图 1 相同剂量,单步氧离子注入(a)与两步氧离子注入(b)制备的 SOI 材料剖面 TEM 照片对比(据文献[2])

在微纳传感器应用中,SOI 材料的埋氧层通常作为牺牲层腐蚀去除而释放出器件单元,一些特殊微纳传感器应用领域需要 SOI 材料具有厚埋层。超低剂量 SIMOX 材料的埋氧层厚度通常小于 200 nm,不能满足需求。但超低剂量 SIMOX 材料中薄埋氧层可以巧妙用作腐蚀阻挡层,结合键合技术,我们开发出用于厚埋层 SOI 材料制造的 SIMBOND 技术^[3,4]。SIMBOND 技术能够满足微纳传感器对于厚埋层的需求,但是由于其顶层硅的厚度受限于氧离子的注入能量,通常顶层硅厚度小于 0.2 μm 。某些特殊微纳传感器,需要顶层硅的厚度达到微米量级,或者更高,传统 SIMBOND 技术再次面临挑战。我们通过外延工艺与 SIMBOND 技术相结合,利用后续外延获得顶层硅厚度达到 1.5 μm ,埋层厚度达到 3 μm 的厚膜厚埋层 SOI,顶层硅的厚度均匀性

优于 $\pm 3\%$ ^[5-7]。

智能剥离技术是一种更为高效的制造 SOI 的技术,于 1995 年由 M. Bruel 等人提出^[8]。其原理是利用 H^+ (或 He^+) 注入硅片或氧化片中形成气泡层,将注氢片与另一支撑片键合,经过适当的热处理使注氢片从气泡处裂开,形成 SOI 结构。有研究表明,体硅中埋嵌的 SiGe 应变层能够实现 H^+ 俘获,使得注入 H^+ 在 SiGe 层中聚集实现剥离^[9]。进一步研究表明,B 离子掺杂进入 SiGe 层将进一步提高 H^+ 俘获效率^[10],能够将 H^+ 注入剂量窗口降低至常规智能剥离技术的一半,即 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$,大大降低了制造成本。结合 SiGe/Si 之间选择性腐蚀,我们开发出用于超薄 SOI 材料制备的 Sim-split 技术,获得顶层硅厚度小于 20 nm 的 SOI 材料(图 2),满足特殊微纳传感器需求。

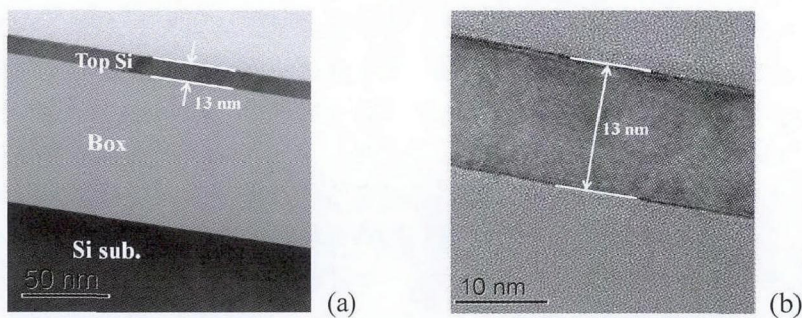


图 2 采用 Sim-split 技术制备的超薄 SOI 材料全局普通 TEM 照片(a)与局部高分辨 TEM 照片

1.2 纳米材料力-电-结构的尺度效应研究

了解材料在纳米尺度下的物理性质对未来纳米器件的研制非常必要。在对纳米材料物理性质众多的研究手段中,对纳米结构的力学加载研究是探索纳米结构物理本质的手段之一。实验上对纳米结构进行力学加载和测量极为困难。目前国际上主要利

用 AFM/探针技术和 MEMS 微执行器技术对纳米结构进行 TEM/SEM 原位机械加载从而获得纳米结构的力学特性。但目前国际上利用 AFM/探针技术对纳米结构进行机械加载的实验系统尺寸较大、可控性差且非常复杂。相比之下 MEMS 执行器具有可控性高、尺寸小、功耗低、等众多优点^[11,12]。

针对以上问题,我们设计并制备出了结构简单、容易制备、可用于 SEM/TEM 原位纳米结构机械加载的 MEMS 器件,见图 3。通过梳齿驱动器上产生的拉力 F 拉动三条支撑梁,纳米梁被拉伸,测力悬梁发生弯曲。测量纳米梁两个端点 A 和 B 的位移,可得到纳米梁的伸长量,测力悬梁的弯曲量。通过测

力悬梁的长度、宽度和厚的计算得到其弹性系数,可直接计算得到各纳米梁的杨氏模量^[13]。利用此器件对厚度分别为 100 nm, 75 nm, 55 nm, 45 nm 的单晶硅纳米梁开展了 TEM 内的原位拉伸实验,得到了对应不同单晶硅纳米梁厚度的杨氏模量值,为硅基材料的纳米器件设计提供了依据。

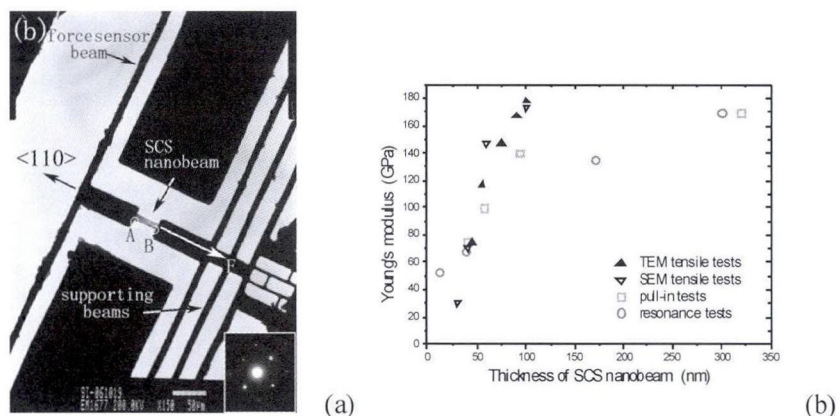


图3 TEM 原位拉伸测试中的 MEMS 芯片 (a) 与得到的杨氏模量-纳米梁厚度关系 (b)

我们得到的单晶硅纳米梁杨氏模量拉伸实验结果(▲TEM 拉伸实验,▽ SEM 拉伸实验)与弯曲(□pull-in 方法)^[14]、谐振实验结果(○)^[15]得到的结果均表现出随着纳米梁厚度的减小而减小的尺度效应,但谐振实验得到的杨氏模量表现出尺度效应最早,而拉伸实验最晚。

1.3 III-V 族/GeSi 融合微结构材料

针对危险品以及环境气体监测,中远红外谱分析可以提供痕量、高精度的检测。制造 MEMS 传感器的主体材料是 Si,但是由于 Si 材料是间接能带结构,发光性能很差,无法作为发光介质,因此需要在 Si 材料上集成高效的发光材料。III-V 族半导体材料具有优异的发光特性,已经广泛应用于半导体激光器和 LED 等领域。所以研究 III-V 族材料和 Si 材料的集成将拓展传统的 Si 材料在发光特性方面的性能,有望实现光、机、电等功能在材料层面的集成。

我们重点研究了在 Ge 衬底上 GaAs 材料的 MBE 外延生长。GaAs 和 Ge 晶体材料具有非常相近的晶格常数和热膨胀系数,是一个非常理想的 III-V/IV 族集成材料体系。但是,GaAs/Ge 材料体系面临的主要问题是避免在 GaAs 晶体外延过程中产生反相畴(Anti-phase domain),这是在 Ge/Si 衬底上外延 III-V 族材料的共性问题。我们利用气

源 MBE(GSMBE)系统,在外延中主要采用表面改性的技术抑制外延材料中的反相畴。材料的基本结构为在 Ge 衬底上外延 1 μm 厚的 GaAs 外延层材料。实验结果显示反相畴多少直接反映在表面菱形坑的多少。反相畴多,表面菱形坑密度大,反之,菱形坑密度小。通过工艺优化可以将表面菱形坑缺陷密度大幅度下降,由 10^8 cm^{-2} 下降到 10^5 cm^{-2} 量级,样品表面的平整度也得到很大提高,表面粗糙度仅为 0.28 nm,接近 GaAs 衬底同质外延的水平。从高分辨率透射电镜(TEM)图可以看出 Ge 衬底和 GaAs 材料在界面处晶格排列很完整。结果表明我们通过外延方式获得了高质量的 GaAs/Ge 融合材料^[16]。在 III-V/Ge 融合材料研究基础上,我们进一步研制成功了 Ge 基 InAs 量子点激光器。利用优化的 III-V/Ge 外延技术,我们在 Ge 衬底上外延生长了 InAs/GaAs 量子点激光器结构,制备了脊条激光器,器件在室温实现了激光(脉冲工作模式),工作波长为 970 nm(图 4)。

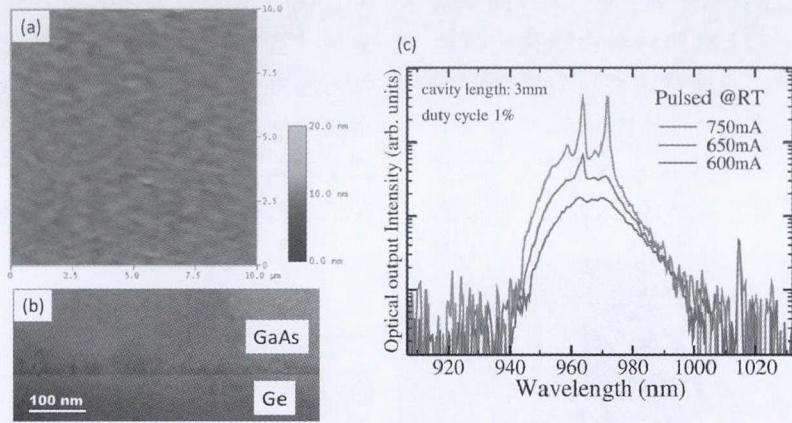


图 4 (a) Ge 衬底上 MBE 生长的 GaAs 薄膜材料表面形貌 AFM 图; (b) GaAs/Ge 界面处的 TEM 图; (c) Ge 基 InAs 量子点激光器室温脉冲激光光谱图。(据文献[16])

2 微纳融合制造技术

基于传统硅材料的工艺选择性,我们实现了基于 MEMS 方法硅纳米线尺寸的精确可控和批量加工,发展出(111)硅片硅纳米线的制造规范。

硅纳米线作为新型的一维半导体纳米材料,由于超高的比表面积,稳定可靠的电学特性,以及表面易修饰生物基团等特点,受到物理、化学以及材料等多学科领域的广泛关注。研究低成本、高产率、高质量且适合大批量制作的硅纳米线,是实现其大规模产业化的基础^[17-19]。

我们利用 Si(111)面的自停止腐蚀和硅纳米线的自限制氧化特性,成功地制造了一系列尺寸可控、高比表面积、具有三角形截面,直径从几十纳米到几

百纳米的尺寸可控的硅纳米线(图 5),最小尺寸可以达到 20 nm^[20]。其中,利用(111)硅片上{111}晶面族的分布特点,用单晶硅各向异性腐蚀的方法制备宽度为几百纳米的单晶硅薄壁结构,通过自限制氧化技术将薄壁的特定区域转化为单晶硅纳米线结构。整个工艺过程仅涉及一次光刻、一次 LPCVD 沉积、一次 KOH 各向异性腐蚀以及一次热氧化工艺,具有很高的工艺兼容性。

通过建立(111)硅片各向异性腐蚀模型,我们成功得到并验证了硅墙结构宽度与图形对准偏转角、腐蚀窗口深度、各向异性腐蚀时间的关系。利用控制其中的一个或多个工艺参数,成功实现了将微米量级的图形缩小到 200 nm 以下,并通过固定时间的氧化工艺,将硅墙进一步细化为硅纳米线。由于利用

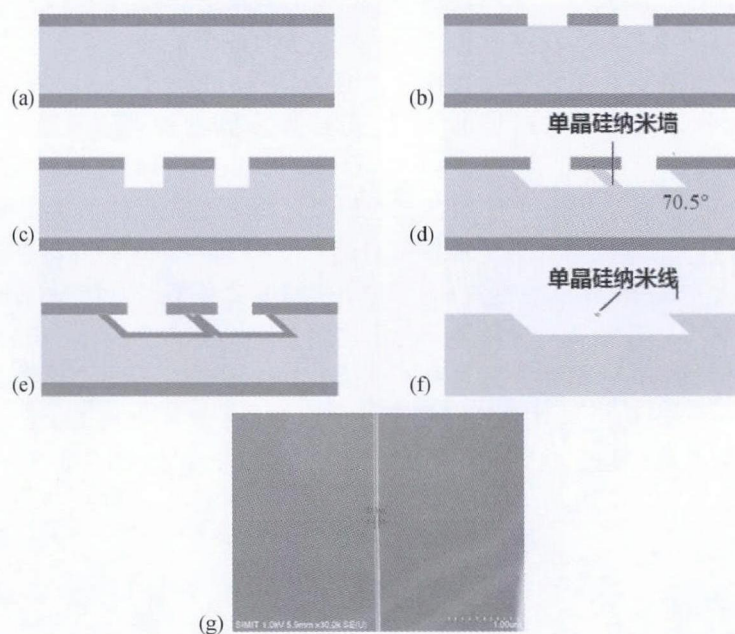


图 5 基于 MEMS 方法的硅纳米线制造工艺流程(a-f)及典型硅纳米线的流片结果(g)(据文献[20])

了具有较高平整度的{111}自停止面,单晶硅薄壁结构的均匀性和准直性都非常高,因而在自限制氧化过程中能够形成成品率、宽度一致性较高的单晶硅纳米线。

3 高性能微纳传感器

通过对硅纳米线 FET 传感器的系统研究,我们将传感器对 DNA 的检测限不断提升,达到 50aM 量级,为环境有害生物物质的检测提供了手段。我们还采用介孔硅敏感结构开发了一种面内谐振模式悬臂梁传感器新结构,实现了二氧化碳和水中重金属离子的检测,并在国际上首次提出了将纵向和横向分子作用的效应分离的传感模型,利用动态和静态两个悬臂梁组成阵列进行联合检测,实现了对化学同系物分子(一、二、三甲胺)的准确辨别。通过考虑多体效应,我们成功提高了 THzQWP 探测器的设计精度,并进一步制造出器件,实现了对隐匿物体的热辅助成像和 CT 成像,成功还原了样品横截面图像。

3.1 超高性能硅纳米线 FET 传感器

硅纳米线场效应晶体管(FET)器件与其他器件相比,在生化传感方面展示了很高的灵敏度和多元检测能力。超高的表面积/体积比,使硅纳米线对环境变化极其敏感;硅纳米线稳定、可重复的电学特性则保证了精确可靠的直接电读出;加上其电导率可调制,表面容易修饰生物识别基等特点使硅纳米线成为新一代生化传感器的重要代表^[21-25]。

基于发展的硅纳米线加工技术,我们开展了纳米线表面硅烷化的单分子膜层自组装,实现具有超高灵敏度和良好特异性的硅纳米线 FET 传感器,能够检测出 1 fM 目标 DNA,且可区分相应的单碱基错配序列(图 6)^[26]。该方法比以往所报道的电化学、荧光等方法的核酸传感器的灵敏度 pM 级高几个数量级。

进一步我们通过将三棱柱假设为三角截面硅纳米线的理论模型,通过公式推导得到 FET 器件灵敏度受纳米线尺寸、载流子浓度、德拜长度、表面电荷密度以及电荷与纳米线表面的距离等多个因素影响(图 7)。在理论分析的基础上,我们从实验上验证了器件在栅压的亚阈值区域变化最敏感,低离子强度缓冲液和中等浓度探针密度有利于提高器件的灵敏度。在优化的实验条件下,将硅纳米线器件最低可检测至 0.1 fM^[27]。

在前面工作的基础上,我们进一步深入研究,将非标记的滚环扩增技术引入到硅纳米线 DNA 传感器中,进一步提高了器件的灵敏度和信噪比^[28]。从图 8 可知,通过滚环扩增技术产生的带负电的长单链 DNA 产物,增强了硅纳米线场效应管的信号响应,使器件对 1 fM 乙肝病毒序列检测的信噪比提升到 20 以上,可实现 50 aM DNA 靶标分子的响应,并且仍然可识别单碱基错配序列。该工作可为硅纳米线 FET 在环境检测等方面提供功能强大的工具。

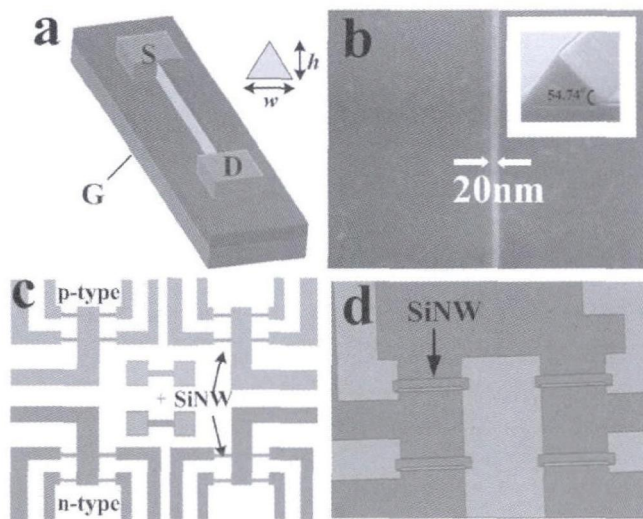


图 6 硅纳米线 FET 传感器

(a) 各向异性腐蚀硅纳米线的 FET 器件示意图。其中, w,h 分别代表纳米线的宽度和高度。S、D、G 分别代表源、漏以及栅电极;(b) 宽度小于 20 nm 的硅纳米线的扫描电镜(SEM)图,插图代表制得纳米线的横截面;(c) 芯片硅纳米线阵列示意图;(d) 四分之一硅纳米线阵列的光学显微镜图。(据文献^[26])

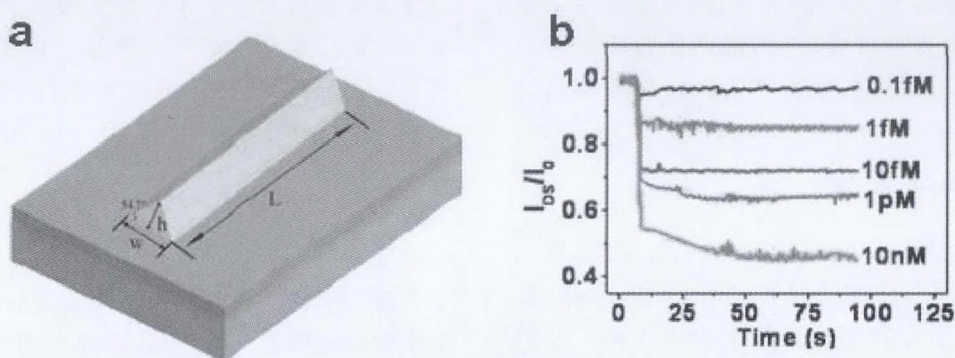


图7 (a) 三角形截面硅纳米线 FET 器件示意图。其中, w , h , L 分别代表纳米线的宽度, 高度和长度。
(b) 加入不同浓度的目标 DNA 后, 归一化电流-时间变化曲线。(据文献[27])

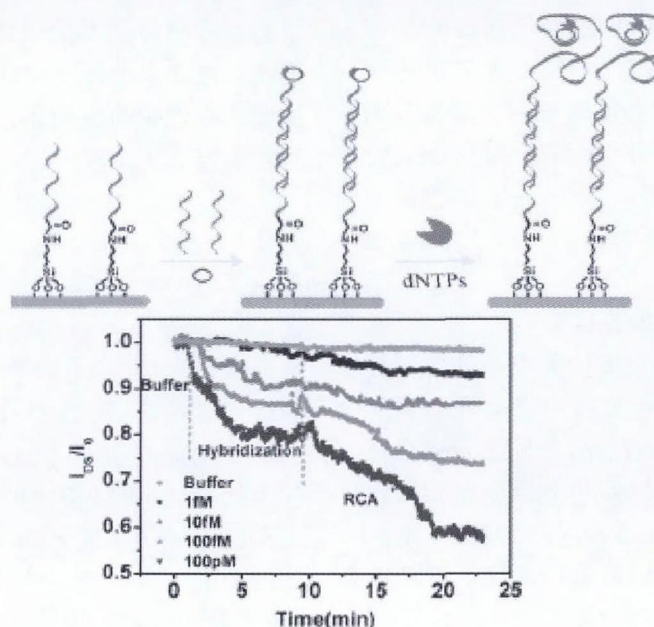


图8 硅纳米线 DNA 传感器非标记的滚环扩增技术原理示意图(上图)及滚环扩增技术对不同浓度的目标 DNA 的信号响应(下图)。(据文献[28])

3.2 高灵敏度悬臂梁生化传感器

自从悬臂梁生化传感器在 20 世纪 90 年代中期被提出以来, 由于其具有灵敏度高、响应迅速、无需标记物、易集成、可大批量生产、使用范围广等诸多优点而受到越来越多研究者的关注, 目前已经在医疗诊断、国防安全、环境监测等多个领域获得研究和应用。

我们首先研究了静态悬臂梁生化传感器的敏感机制, 提出了一种三层分子间作用模型, 半定量地给出了巯基化合物自组装过程中每层作用对表面应力变化的贡献^[29]。在该模型的指导下, 我们设计了多款静态悬臂梁生化传感器, 实现了对 TNT^[30-32]、DMMP^[33-34]、链亲和素^[35] 等的痕量检测。之后我们进一步扩展了该模型, 首次提出了应力产生是由分子层间的纵向作用和同层分子间的横向作用共同

作用的结果^[36]。利用该模型, 我们发明了一种利用静态悬臂梁和动态悬臂梁联合检测区别化学同系物的方法^[37]。另外, 在对悬臂梁传感器的研究过程中, 我们还发现了一些纳米效应, 并利用这些敏感效应提高了传感器的灵敏度^[38,39]。

除了对悬臂梁结构的研究, 我们还对敏感材料的制备和组装进行了大量的研究。我们率先使用功能化介孔材料作为敏感材料, 制备了超高灵敏 TNT 爆炸物传感器^[40]; 采用纳米孔结构形成与内壁修饰同时进行的“一锅法”, 实现了多个传感器同时批量自组装生长功能化介孔薄膜材料^[41]; 使用功能化多壁碳纳米管作为敏感材料实现了对痕量 TNT 的实时在线检测^[42]; 使用氧化石墨烯-金纳米颗粒(GO-AuNPs)三维分层多孔状纳米结构制备了痕量三甲胺气体传感器^[43]; 使用金纳米颗粒-还原氧化石墨

烯纳米敏感材料改善了传感器的抗湿度干扰性能^[44]；采用超枝化聚合物材料实现了国际领先水平

的沙林毒气检测能力^[45]。部分研究成果如图 9 所示。

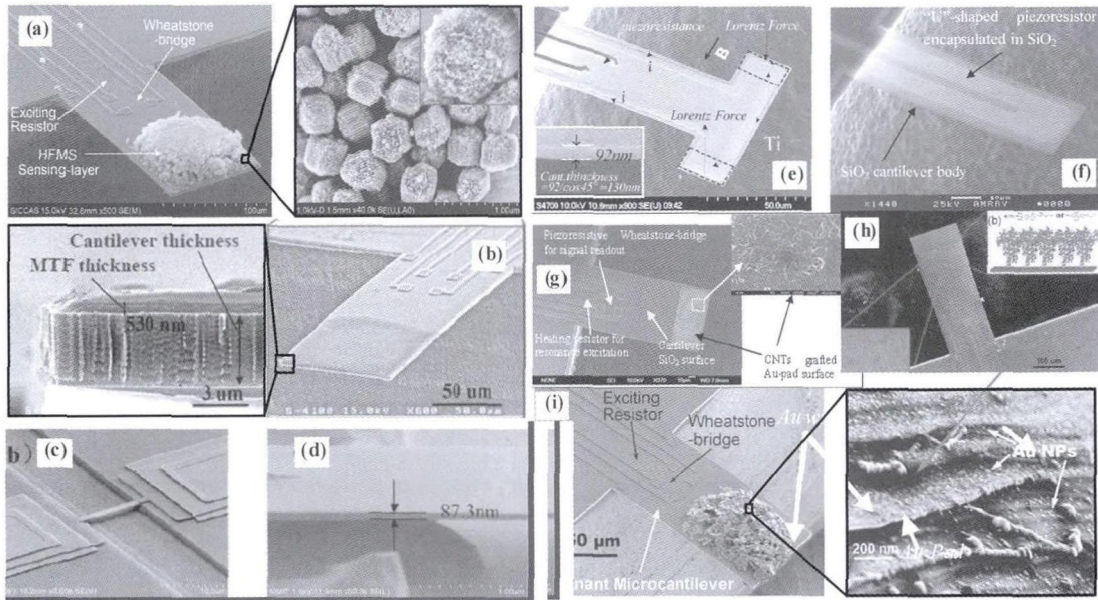


图 9 微纳悬臂梁传感器部分研究成果

(a) 功能化介孔材料作为敏感材料的微悬臂梁传感器^[40]；(b) 功能化介孔薄膜作为敏感材料的微悬臂梁传感器^[41]；(c,d) 纳米厚度两端固定支撑梁传感器^[39]；(e) “T”型纳米悬臂梁传感器^[38]；(f) 静态微悬臂梁传感器^[32]；(g) 功能化多壁碳纳米管作为敏感材料的微悬臂梁传感器^[42]；(h) 超枝化聚合物作为敏感材料的微悬臂梁传感器^[45]；(i) 氧化石墨烯-金纳米颗粒作为敏感材料的微悬臂梁传感器^[43]。

目前,我们已经研发出多种高性能的敏感材料,并掌握了纳米敏感材料在微悬臂梁表面微纳融合制造的方法,开发出多款高性能、便携、可现场快速检测的生化传感器,更多的研究成果可参考文献[46]和[47]。制作的沙林传感器仪表已经在上海世博会重点监控的地铁站以及世博会场馆区域获得试用。

3.3 THz QWP 器件及其成像

太赫兹 (THz) 探测器与 THz 辐射源一样,是 THz 技术应用的关键器件。基于半导体低维材料结构的 THz 量子阱探测器 (QWP)^[48-53] 是一种全固态的半导体探测器,具有探测灵敏度高、体积小和易集成等优点,成为本领域的研究热点之一。首个 THz QWP 由加拿大国家研究院的刘惠春教授于 2004 年研制成功^[48],并于 2005 年达到了背景限 (Background-limited) 工作性能。目前 THz QWP 在快速 THz 成像和 THz 通信等方面得到了应用^[54,55]。由于 THz QWP 结构简单,材料生长和器件工艺相对成熟,人们有望研制出焦平面阵列 THz 探测器,并得到实际应用。

在中红外 QWP 的设计中,通常不需要考虑多体效应等对器件性能的影响。而在 THz QWP 的设

计中,如果不考虑多体效应的因素,理论设计与实际结果存在较大的误差,为了克服这些缺点,我们模拟了 THz QWP 中载流子的动力学行为,系统研究了 THz QWP 中多体效应对器件性能的影响,对 THz QWP 进行了设计优化。图 10 为考虑交换关联势和去极化两种多体效应时,V266 和 V267 光响应峰的计算结果与实验结果比较。从图中可以看出,当不包括任何多体相互作用时,理论和实验间的响应峰值位置的能量差分别为 5.6 meV 与 4.8 meV。当考虑静态交换关联势后,能量差分别下降到 2.4 meV 和 2.6 meV。考虑动态极化效应进一步的完善了理论响应峰值位置,对于 V266 和 V267,能量差分别为 0.2 meV 和 1.1 meV。因此,在 THz QWP 设计中考虑多体相互作用是非常必要的。

在 THz QWP 中,由于子带间跃迁选择定则造成器件在正入射条件下无法正常工作,从而不利于焦平面阵列的构建。为了解决这一问题,我们开展了 QWP 光耦合器方面的研究。在解决正入射情况下电场偏振问题的同时,通过实现高的光耦合效率来增强器件对 THz 光子的吸收效率,进而实现正入射条件下可工作的高灵敏度 THz QWP。

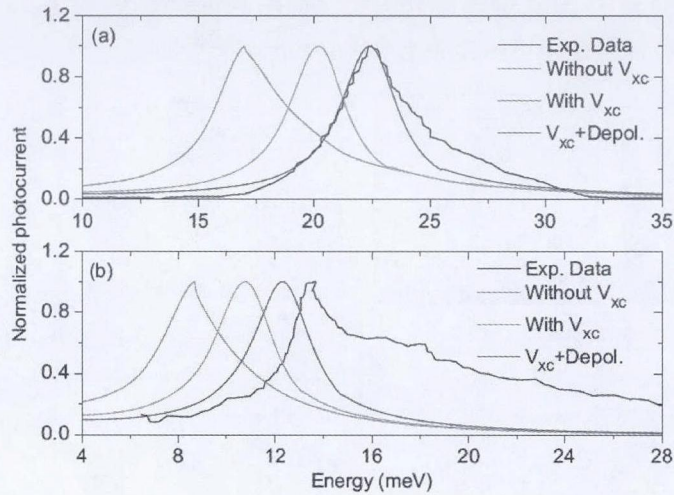


图 10 实验与理论的光电流谱比较, (a) V266, (b) V267(据文献[50])

我们根据经典衍射方程设计了一组一维金属光栅耦合 THz QWP, 采用傅里叶变换远红外光谱仪表征了这组器件的光电流响应谱, 并基于光谱数据, 采用校准的黑体辐射源标定了器件的峰值响应率。光栅器件的光谱与传统 45° 端面入射器件的光谱类似, 峰值响应率也达到了 THz QWP 的一般水平, 说明根据光栅方程设计的光栅可以有效的进行光耦合, 并实现较好的器件性能。根据一维金属光栅 THz QWP 的结构特征, 我们采用模式方法模拟得到了器件中的电磁场分布情况, 分析了光栅参数及器件结构对光耦合效率的影响, 并在此基础上提出了器件设计的优化方案。理论模拟表明, 当光栅周

期与入射光在器件材料中的波长相等时, 光耦合效率最大; 衬底无限厚时, 最优的光栅占空比为 50%; 光栅厚度对耦合效率影响较弱, 一般 GaAs 工艺中, 金属厚度生长不超过 $1 \mu\text{m}$, 在这个范围内, 不同光栅厚度造成的差异最大约为 1%。根据模式方法的模拟结果, 我们设计了一组器件结构相同、光栅周期不同的 THz QWP(图 11), 并表征了光电流谱和峰值响应率。结果表明, 设计光栅的周期使光栅的截止频率与器件峰值响应频率相当, 此时光耦合效率最大, 器件性能最高, 峰值响应率提升了接近 3 倍, 实现了光栅设计的优化, 为基于焦平面阵列的应用如高速 THz 实时成像等奠定了基础。

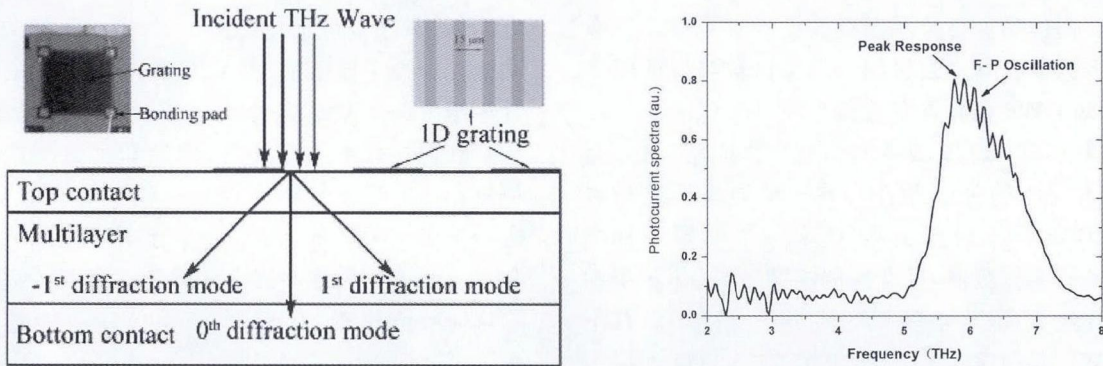


图 11 透射式一维金属光栅耦合 THz QWP 结构示意图和光电流谱(据文献[51])

THz QWP 是目前少数可以跟 THz 量子级联激光器(QCL)在频谱上匹配得很好的器件之一。无论从器件灵敏度还是探测频率范围, 都是探测 THz QCL 输出激光的首选探测器, 也是 THz 成像应用方面的重要器件。在主动成像方面, 我们采用椭球复制面反射镜组和二维电动平移台搭建了基于 THz QCL 和 THz QWP 的二维扫描成像装置, 完

成了二维扫描成像实验。实验中 THz QCL 采用的是连续激射模式, 样品放置于椭球复制面反射镜组的共焦平面, 通过二维电动平移台实现样品的移动, 达到 THz 光透过样品不同区域的目的。

我们测量了样品处 THz 激光光斑的尺寸, 光斑测量的步长为 0.125 mm , 测量得到的尺寸为水平方向 1.06 mm 和垂直方向 1.22 mm , 光斑成像

质量较好,对人民币水印二维扫描成像结果如图12所示。由图可知,人民币水印头像的THz图像轮廓明显,说明THz光适合于对可见光和红外光

等透不过的纸张等物质进行透射成像。最后对成像结果进行了数据分析,得到成像的最佳分辨率为0.5 mm。

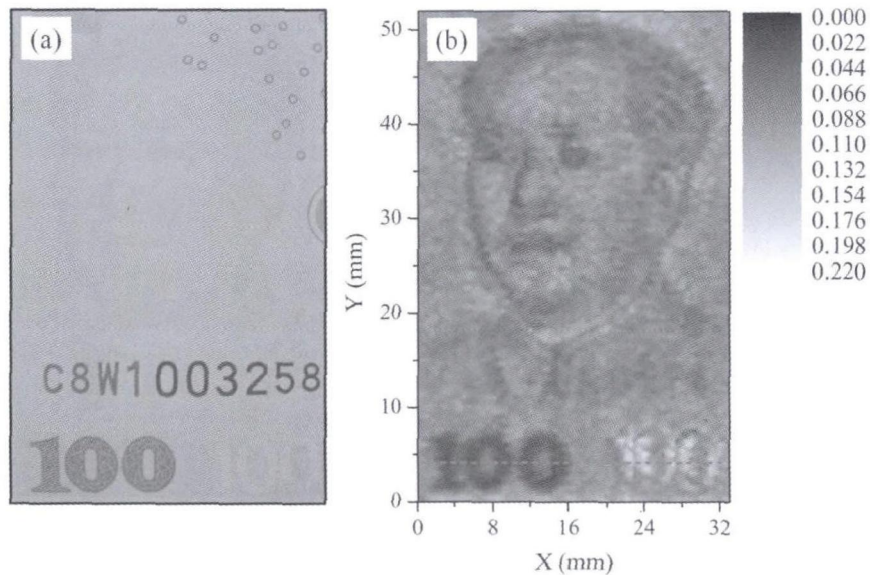


图12 (a) 人民币水印图案的光学照片;(b) THz扫描成像结果(据文献[55])

4 总结和展望

微纳系统材料、制造与器件物理研究所涉及的范围宽,应用面广,面临众多挑战。在以往的工作中,我们围绕CO₂、CO和H₂S等气体检测需求,一是将应用面从沙林和TNT危险品检测推广到等环境气体监测。二是检测途径从微纳悬臂梁扩大到THz谱和热红外谱、中远红外谱分析方法,以满足CO₂、CO和H₂S等环境气体监测的需求。三是通过联合检测的方式提高检测的准确性,取得了一些突破,证明联合高效检测是可行的。

在后续的工作中,可以进一步从3个方向拓展研究工作,一是进一步将应用面从危险品、环境气体检测推广到食品安全、毒品检测等领域。二是材料研究从SOI材料、III-V族MBE材料拓展到Si基III-V族集成材料、有机半导体荧光传感材料。三是检测途径从微纳悬臂梁、THz谱、热红外谱、中远红外谱延伸到荧光检测方法,以满足食品、毒品多种物质的检测需求。通过上述需求牵引,全面提升纳米材料与纳米效应、纳米传感器物理与器件设计、微纳融合制造技术以及高性能微纳传感器等四方面研究工作的广度和深度。

致谢 本研究得到国家自然科学基金创新研究群体“微纳系统材料、制造与器件物理”(批准号

“60721004”)及第一次延续(批准号“61021064”)、第二次延续(批准号“61321492”)的连续支持。

参 考 文 献

- [1] Usenko AY, Carr WN, Silicon-on-insulator technology for microelectromechanical applications. *Semiconductor Physics, Quantum Electron Opt*, 1999, 1: 93—97.
- [2] Wei X, Xue Z, Wu A, et al. Investigation of Silicon on Insulator Fabricated by Two-step O⁺ Implantation. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56: 444—448.
- [3] www.simgui.com.cn.
- [4] Wei X, Wu AM, Chen M, et al. Fabrication of Thin-film Silicon on Insulator by Separation by Implanted Oxygen Layer Transfer. *J Vac Sci Technol B*, 2008, 26: L45—L47.
- [5] Wei X, Wu AM, Wang X, et al. Investigation on Silicon on Insulator Fabricated by Separation by Implanted Oxygen Layer Transfer. *J Electrochem Soc*, 2010, 157: H81—H85.
- [6] Wei X, Wu AM, Zhang B, et al. Thick-film Silicon-on-Insulator by Separation by Implanted Oxygen Layer Transfer. *ECS Trans*, 2009, 19: 311—316.
- [7] Wei X, Wu AM, Wang X, et al. Characterization and Analysis of Silicon on Insulator Fabricated by Separation by Implanted Oxygen Layer Transfer. *J Vac Sci Technol B*, 2010, 28: 163—168.
- [8] Bruel M. Silicon on Insulator Material Technology. *Electron Lett*, 1995, 31: 1201—1202.
- [9] Di ZF, Wang YQ, Nastasi M, et al. Effect of temperature on layer separation by plasma hydrogenation. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 254104.
- [10] Chen D, Zhang M, Liu S, et al. Sharp crack formation in low fluence hydrogen implanted Si_{0.75}Ge_{0.25}/B doped Si_{0.70}Ge_{0.30}/Si heterostructure. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 142102.

- [11] Gaidarzhy A, Zolfagharkhani G, Badzey RL, et al. Evidence for quantized displacement in macroscopic nanomechanical oscillators. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 030402.
- [12] Namazu T, Isono Y, Tanaka T, Evaluation of size effect on mechanical properties of single crystal silicon by nanoscale bending test using AFM. *J Microelectromechanical Syst*, 2000, 9: 450—459.
- [13] Jin Q, Li T, Zhou P, et al., Mechanical Researches on Young's Modulus of SCS Nanostructures. *J Nanomater*, 2009, 6: 319842.
- [14] Sadeghian H, Yang CK, Goosen JFL, et al., Characterizing size-dependent effective elastic modulus of silicon nanocantilevers using electrostatic pull-in instability. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 221903.
- [15] Li X, Ono T, Wang YL, et al., Ultrathin single crystalline-silicon cantilever resonators: fabrication technology and significant specimen size effect on Young's modulus. *Appl Phys Lett* 2003, 83: 3081—3083.
- [16] Gong Q, Gao XQ, Wang K, et al., InAs quantum dot lasers grown by gas source molecular beam epitaxy on Ge substrates, 30th North American molecular beam epitaxy conference. Banff, Canada, 2013.
- [17] Pandraud G, Veldhuis G, Berenschot JW, et al., Micromachining of high-contrast optical waveguides in h111 silicon wafers. *IEEE Photon Tech Lett*, 2000, 12: 308—310.
- [18] Oosterbroek RE, Berenschot JW, Jansen HV, et al. Etching methodologies in <111>-oriented silicon wafers. *Journal of Microelectromech Systems*, 2000, 9: 390—398.
- [19] Cristea C, Kusko M, Tibeica C, et al. Design and experiments for tunable optical sensor fabrication using (111)-oriented silicon micromachining. *Sens Actuat A*, 2005, 113: 312—318.
- [20] Yu X, Wang Y, Zhou H, et al. Top-Down Fabricated Silicon-Nanowire-Based Field-Effect Transistor Device on a (111) Silicon Wafer. *Small*, 2013, 9: 525—530.
- [21] Xia Y, Yang P, Sun Y, et al. One-Dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Applications. *Adv Mater*, 2003, 15: 353—389.
- [22] Zheng G, Patolsky F, Cui Y, et al. Multiplexed Electrical Detection of Cancer Markers with Nanowire Sensor Arrays. *Nature Biotechnol*, 2005, 23: 1294—1301.
- [23] Elfstrom N, Juhasz R, Sychugov I, et al. Surface Charge Sensitivity of Silicon Nanowires, Size Dependence. *Nano Lett*, 2007, 7: 2608—2612.
- [24] Hahn J-I, Lieber CM Direct Ultrasensitive Electrical Detection of DNA and DNA Sequence Variations Using Nanowire Nanosensors. *Nano Lett*, 2004, 4: 51—54.
- [25] Luo L, Jie J, Zhang W, et al. Silicon Nanowire Sensors for Hg²⁺ and Cd²⁺ ions. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 193101.
- [26] Gao A, Lu N, Dai P, et al. Silicon-Nanowire-Based CMOS-Compatible Field-Effect Transistor Nanosensors for Ultrasensitive Electrical Detection of Nucleic Acids. *Nano Lett*, 2011, 11: 3974—3978.
- [27] Gao A, Lu N, Wang Y, et al. Enhanced sensing of nucleic acids with silicon nanowire field effect transistor biosensors. *Nano Lett*, 2012, 12: 5262—5268.
- [28] Gao A, Zou N, Dai P, et al. Signal-to-Noise Ratio Enhancement of Silicon Nanowires Biosensor with Rolling Circle Amplification. *Nano Lett*, 2013, 13: 4123—4130.
- [29] Zuo G, Li X A. three-layer model of self-assembly induced surface-energy variation experimentally extracted by using nanomechanically sensitive cantilevers. *Nanotechnology*, 2011, 22: 045501.
- [30] Zuo G, Li X, Zhang Z, et al. Dual-SAM functionalization on integrated cantilevers for specific trace-explosive sensing and non-specific adsorption suppression. *Nanotechnology*, 2007, 18: 255501.
- [31] Li P, Li X. Silicon dioxide microcantilever with piezoresistive element integrated for portable ultrasensitive gaseous detection. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 074104.
- [32] Chen Y, Xu P, Li X. Self-assembling siloxane bilayer directly on SiO₂ surface of micro-cantilevers for long-term highly repeatable sensing to trace explosives. *Nanotechnology*, 2010, 21: 265501.
- [33] Zuo G, Li X, Li P, et al. Detection of trace organophosphorus vapor with a self-assembled bilayer functionalized SiO₂ microcantilever piezoresistive sensor. *Anal Chim Acta*, 2006, 580: 123—127.
- [34] Li P, Li X. A single-sided micromachined piezoresistive SiO₂ cantilever sensor for ultra-sensitive detection of gaseous chemicals. *J Micromech Microeng*, 2006, 16: 2539—2546.
- [35] Chen Y, Xu P, Liu M, et al. Bio/chemical detection in liquid with self-sensing Pr-Oxi-Lever (piezo-resistive SiO₂ cantilever) sensors. *Microelect Eng*, 2010, 87: 2468—2474.
- [36] Yang T, Li X, Chen Y, et al. Adsorption induced surface-stress sensing signal originating from both vertical interface effects and intermolecular lateral interactions. *Analyst*, 2011, 136: 5261.
- [37] Yu H, Yang T, Chen Y, et al. Chemo-mechanical joint detection with both dynamic and static microcantilevers for interhomologue molecular identification. *Analytical Chem*, 2012, 84: 6679—6685.
- [38] Xia X, Li X. Nano-thickness integrated resonant cantilevers with surface-stiffening scheme for ultra-sensitive detection of trace chemicals. the 22nd IEEE Conference on Micro Electro mechanical Systems (MEMS 2009), Sorrento, Italy. Jan. 25—29, 2009, 328—331.
- [39] Chen Y, Xu P, Li X. Axial-stressed piezoresistive nanobeam for ultrahigh chemomechanical sensitivity to molecular adsorption. *Anal Chem*, 2012, 84: 8184—8189.
- [40] Xu P, Yu H, Li X. Functionalized mesoporous silica for microgravimetric sensing of trace chemical vapors. *Anal Chem*, 2011, 83: 3448—3454.
- [41] Yu H, Xu P, Xia X, et al. Micro-/nanocombined gas sensors with functionalized mesoporous thin film self-assembled in batches onto resonant cantilevers. *IEEE Trans Indust Elect*, 2012, 59: 4881—4887.
- [42] Xu P, Li X, Yu H, et al. Self-assembly and sensing-group graft of pre-modified CNTs on resonant micro-cantilevers for specific detection of volatile organic compound vapors. *J Micromech Microen*, 2010, 20: 115003.
- [43] Xu P, Yu H, Li X. *In situ* growth of noble metal nanoparticles on graphene oxide sheets and direct construction of functionalized porous-layered structure on gravimetric microsensors for chemical detection. *Chem Comm*, 2012, 48: 10784—10786.
- [44] Yu H, Xu P, Lee DW, et al. Porous-layered stack of functionalized AuNP-rGO (gold nanoparticles-reduced graphene oxide) nanosheets as a sensing material for the micro-gravimetric detection of chemical vapor. *J Mater Chem A*, 2013, 1: 4444.

- [45] Liu Y, Xu P, Yu H, et al. Hyper-branched sensing polymer directly constructed on a resonant micro-cantilever for the detection of trace chemical vapor. *J Mater Chem*, 2012, 22: 18004.
- [46] Li X. Cantilever sensors equipped with nano sensing effects for ultra-sensitive detection of bio/chemical molecules. *Transducers 2009*, Denver, CO, USA. June 21—25, 2009, 1620—1625.
- [47] Li X, Lee D. Integrated microcantilevers for high-resolution sensing and probing. *Measure Sci Tech*, 2012, 23: 022001.
- [48] Liu H C, Song CY, SpringThorpe AJ, et al. Terahertz quantum-well photodetector. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 4068.
- [49] Cao JC, Chen YL, Liu HC. Effect of optical phonons on the spectral shape of terahertz quantum-well photodetectors. *Superlatt Microstruct* 2006, 40: 119.
- [50] Guo XG, Tan ZY, Cao JC, et al. Many-body effects on terahertz quantum well detectors. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 201101.
- [51] Zhang R, Guo XG, Song CY, et al. Metal-grating-coupled terahertz quantum-well photodetectors. *IEEE Electron. Dev Lett*, 2011, 32: 659.
- [52] Zhang R, Guo XG, Cao JC, et al. Asymmetric Fabry-Perot oscillations in metal grating-coupled terahertz quantum well photodetectors. *IEEE J Quantum Electron*. 2012, 48: 1214.
- [53] Guo XG, Cao JC, Zhang R, et al. , Recent Progress in Terahertz Quantum-Well Photodetectors. *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* , 2013, 19: 8500508.
- [54] Zhou T, Zhang R, Guo XG, et al. , Terahertz imaging with quantum-well photodetectors. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24: 1109.
- [55] Tan ZY, Zhou T, Cao JC, et al. Terahertz imaging with quantum-cascade laser and quantum-well photodetector. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25: 1344.

Material, Fabrication and Device Physics on Micro-Nano Systems

Feng Songlin Wang Xi Wang Yuelin Cao Juncheng
Li Xinxin Gong Qian Li Tie

(*Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050*)

Abstract In recent years, aiming at the detection on trace level of high explosives (e. g. TNT), chemical toxins (e. g. sarin), narcotics, and environmental gases with fast response, the innovative research groups have focused on the topics of nano materials and nano effects, physics and design of the sensors, nano fabrication based on MEMS technology, and high performance sensors, produced the micro-nano fused sensors with ultra sensitivity and good reliability, and applied them in important affairs.

Key words Nano material, Nano effect, Micro-nano fabrication, Micro-nano sensor