



柔性电子技术中的半导体材料性能调控概述

王宙恒 陈颖 郑坤炜 李海成 马寅佳 冯雪

Review on property regulation of semiconducting materials in flexible electronics

Wang Zhou-Heng Chen Ying Zheng Kun-Wei Li Hai-Cheng Ma Yin-Ji Feng Xue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 164203 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210095

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210095>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于纳米发电机的触觉传感在柔性可穿戴电子设备中的研究与应用

Research and application of flexible wearable electronics based on nanogenerator in touch sensor

物理学报. 2021, 70(10): 100705 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202157>

正电子湮没谱学研究半导体材料微观结构的应用进展

Advances in applications of positron annihilation spectroscopy to investigating semiconductor microstructures

物理学报. 2017, 66(2): 027801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.027801>

柔性基周期性厚度梯度薄膜的应变效应

Strain effects of periodic thickness-gradient films on flexible substrates

物理学报. 2021, 70(1): 016801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201008>

常压等离子体对柔性多孔材料表面处理均匀性的研究进展

Treatment uniformity of atmospheric pressure plasma on flexible and porous material surface: A critical review

物理学报. 2021, 70(9): 099401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210077>

用于触觉感知的自供能可拉伸压电橡胶皮肤电子器件

Stretchable self-powered epidermal electronics from piezoelectric rubber for tactile sensing

物理学报. 2020, 69(17): 178701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200664>

柔性无机铁电薄膜的制备及其应用

Fabrication and applications of flexible inorganic ferroelectric thin films

物理学报. 2020, 69(21): 217708 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201365>

柔性电子技术中的半导体材料性能调控概述*

王宙恒¹⁾²⁾ 陈颖³⁾⁴⁾ 郑坤炜¹⁾²⁾ 李海成¹⁾²⁾ 马寅佳¹⁾²⁾ 冯雪^{1)2)†}

1) (清华大学航天航空学院, 应用力学教育部重点实验室, 北京 100084)

2) (清华大学柔性电子技术研究中心, 北京 100084)

3) (浙江清华柔性电子技术研究院, 浙江 嘉兴 314000)

4) (钱塘科技创新中心, 杭州 310016)

(2021年1月15日收到; 2021年2月25日收到修改稿)

利用柔性电子技术对半导体材料性能调控研究具有重大的科学意义及应用价值. 该研究一方面突破了传统应变工程中受限于无机材料硬而脆的特性, 且引入应变多为固定值的局限; 另一方面也为基于无机功能材料的可延展柔性电子器件在大变形环境下的性能评估提供了理论基础. 因此, 柔性电子技术为针对半导体材料或其他功能材料的应变调控提供了一种新方法, 将有望应用在诸多需要材料性能周期性改变的新颖领域之中. 本文将首先简介柔性无机电子技术, 并对其中的两大关键技术: 基于纳米金刚石颗粒的减薄及转印技术进行重点阐述, 并探究两大关键技术对半导体电子器件性能的影响; 随后介绍半导体材料近些年在应变-能带结构耦合关系方向的研究成果, 并以基于屈曲砷化镓纳米薄膜条带及量子阱结构的研究为例, 阐明柔性电子技术运用于半导体材料性能调控的独特优势; 最后展望应变调控半导体特性的应用方向与发展前景.

关键词: 可延展柔性电子, 半导体材料性能调控, 应变-能带结构耦合关系, 屈曲

PACS: 42.82.Cr, 71.70.Fk, 71.20.-b, 77.55.dj

DOI: 10.7498/aps.70.20210095

1 引言

柔性电子是在柔性衬底上大面积、大规模集成不同材料体系、不同功能元器件的柔性信息器件与系统, 其特点为可拉伸、可弯曲、可变形、质量轻、形态可变与功能可重构. 该技术结合了力学、材料、电子工程、微电子、生物医学工程等众多学科的技术, 所具备的独特的柔性及可延展性在信息、能源、医疗及国防等领域具有广泛的应用前景^[1-4].

柔性无机电子技术将传统无机半导体材料与柔性衬底集成, 并基于力学结构设计, 减小了器件变形过程中应变对无机功能单元的影响^[5]. 该技术涉及物理、电子、材料、微纳加工、大规模制造和系

统集成等多门学科, 需要综合考虑电场、力场、热场等多场耦合效应来发展柔性器件、电路、系统的设计理论和实现方法, 因此将为上述学科带来理论和实践上的新突破.

在物理层面上, 柔性无机电子技术的发展将拓宽传统半导体物理在应力条件下对能带和载流子输运机制的理解, 揭示受力形变条件下化学键、分子链及晶格结构的形变对其物理性质的影响规律. 同时, 可发现柔性电子材料和器件在受结构和外力影响的情况下新颖的微观和宏观物理效应, 发展出新的机理和应用.

在器件与系统层面上, 柔性无机电子技术的发展有利于揭示器件中关键材料的形变与器件物性的变化规律, 发展可延展柔性器件在大变形工作环

* 国家自然科学基金 (批准号: 11625207, 11902292) 和浙江省重点研发计划 (批准号: 2020C05004, 2019C05002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fengxue@tsinghua.edu.cn

境下的性能评价和失效分析标准; 发展基于柔性无机电子技术的集成方法学和系统设计理论有助于突破感知、计算、通信、能量和执行等覆盖信息技术全功能链的关键技术, 将在信号、激励、执行等层面实现信息与现有生物系统的无缝集成, 实现人-机-物的高度共融。

基于此, 本文将围绕柔性无机电子技术及半导体材料性能调控进行重点阐述, 详细介绍柔性无机电子技术中的两大关键技术: 减薄技术及转印技术, 并探究两大关键技术对半导体电子器件性能的影响; 随后就应变-能带结构耦合关系在低维半导体材料及间接带隙半导体材料中的应用进行概述, 针对目前外界手段所引入多为拉应力且应变多为固定值的局限性, 以屈曲模型的研究为例, 阐明柔性电子技术应用于半导体材料性能调控的独特优势, 为设计优化半导体器件提供新的思路 (图 1)^[6-10]。

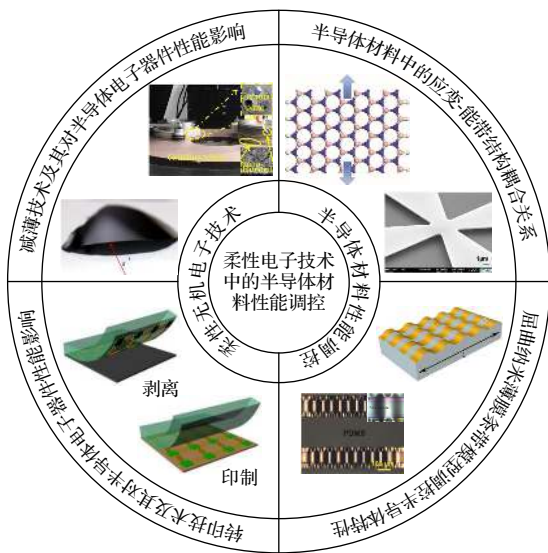


图 1 柔性无机电子技术与半导体材料性能调控相结合, 设计优化半导体器件^[6-10]

Fig. 1. Combine flexible inorganic electronics with the property regulation of semiconducting materials to design and optimize semiconductor devices^[6-10].

2 柔性无机电子技术

2.1 概述

柔性无机电子技术依托高性能的无机半导体材料, 可与传统的互补金属氧化物半导体 (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 电路相兼容, 通过结构优化, 使器件、电路与系统从形态上体现出可弯曲/可折叠/可延展等特性, 使得

柔性电子系统具有空间结构的高度适应性. 实现系统的柔性化可分为以下三种情况: 一是无机半导体器件或芯片等功能单元的柔性化; 二是对互连线进行结构设计实现柔性化; 三是通过异质集成将上述功能单元与互连线封装于柔性材料中. 接下来就以上三种情况所涉及的方法与技术进行相应介绍, 重点阐述基于纳米金刚石颗粒的减薄技术及转印技术, 并探究其对半导体电子器件性能的影响。

2.2 减薄技术及其对半导体电子器件性能的影响

半个多世纪以来, 集成电路一直遵循摩尔定律快速发展. 而随着晶体管尺寸的不断减小与集成度的不断提升, 制备超薄半导体器件以及有效解决散热问题是亟待解决的关键. 减薄技术无疑是解决该问题的有效途径之一: 一般来说, 本征衬底材料对于芯片不但没有功能用途, 甚至还会影响到散热和传输速度等性能参数. 对晶圆/芯片进行减薄, 去除基底材料, 可以有效减小芯片的封装体积、提高芯片散热效率, 进而提升系统的集成度。

半导体材料减薄后的曲率和减薄后材料的厚度以及减薄过程中产生的失配应变有关, 厚度越薄、失配应变越大, 曲率越大, 减薄后的半导体材料越容易碎裂, 从而更难获得超薄半导体材料. 材料的抗弯刚度同厚度成三次方关系, 制备柔性半导体材料的一大重要方向即是降低材料的厚度, 故厚度薄、曲率小的半导体材料是制备柔性半导体材料的理想状态, 根据变形模式与厚度、失配应变之间的关系可知, 减小失配应变才可以获得超薄、小变形的半导体材料^[9]。

目前的减薄技术主要包括湿法腐蚀^[11] 化学机械抛光^[12]、等离子腐蚀^[13]、研磨以及磨削^[14]等. 其中最常用的减薄技术为研磨、磨削以及湿法腐蚀等. 研磨及磨削技术避免了湿法腐蚀所引入的化学溶液腐蚀与损伤等, 且具备较高的加工效率、较低的成本与较高的成品率, 被广泛应用于半导体行业中. 然而, 一方面, 目前的研磨及磨削技术大多针对晶圆级进行减薄处理, 并没有办法减薄小尺寸的半导体芯片; 另一方面, 普通的化学抛光垫或砂纸颗粒太大, 无法实现高集成度、功能复杂芯片的精细研磨. 因此, 目前传统意义上的减薄工艺不适用于超薄半导体器件的发展, 更为重要的是定量研究在减薄过程中所引入的应变对器件性能影响有着

十分重要的意义。

金刚石是碳的一种结晶态，是一种原子晶体，由于碳原子体积小，原子间的共价键短、结合力强等，因而具有极高的硬度、耐腐蚀性和耐磨性。采用负氧平衡爆轰合成法可以得到粒度小、外貌为球形或类球形的纳米金刚石，这类金刚石多用于制作抛光剂，可以对半导体材料、光学材料、生物陶瓷等材料进行精密抛光。纳米金刚石高硬度和高模量的特性使其可以磨削半导体材料的表面，进而去除半导体器件的原始衬底。在减薄的过程中，纳米金刚石颗粒在均布压力的作用下会嵌入到芯片背面内部，同时附着有纳米金刚石颗粒的减薄盘的旋转方向同芯片的旋转方向相反，故而在旋转力的作用下，金刚石颗粒不停地磨削芯片背面，进而不断地减薄芯片。纳米金刚石颗粒的类球形形貌，可以有效减小纳米金刚石颗粒在磨削过程中对半导体芯片的损伤；减薄盘和芯片相反的旋转方向控制，保证了接触面积及研磨力的恒定，从而确保加工状态

的稳定，有效避免了减薄过程中常见的中凸及边塌现象。同时，通过控制金刚石颗粒粒径大小、金刚石颗粒浓度、均布压力以及减薄盘的转速，可以控制减薄速度并优化减薄质量，从而获得性能良好的超薄芯片。基于此技术，清华大学冯雪研究小组发展了一套无化学损伤、自动可控的柔性半导体器件制备流程，并据此制备了柔性可延展光电子器件及系统(图 2(a))，实现了血氧及血压的无创、长时间动态监测^[15,16]。

金属-氧化物半导体场效应晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET, MOS 管) 作为最基础的半导体器件在微电子领域发挥着极其重要的作用，利用纳米金刚石颗粒减薄技术可将其减薄至 10 μm 左右，通过光学显微镜观察 MOS 管的功能表面未发现明显的划痕或损伤，通过测试对比其减薄前后转移特性曲线以及输出特性曲线定量研究了减薄所引入的应变对 MOS 管的电学特性的影响(图 2(b))。转移特性曲

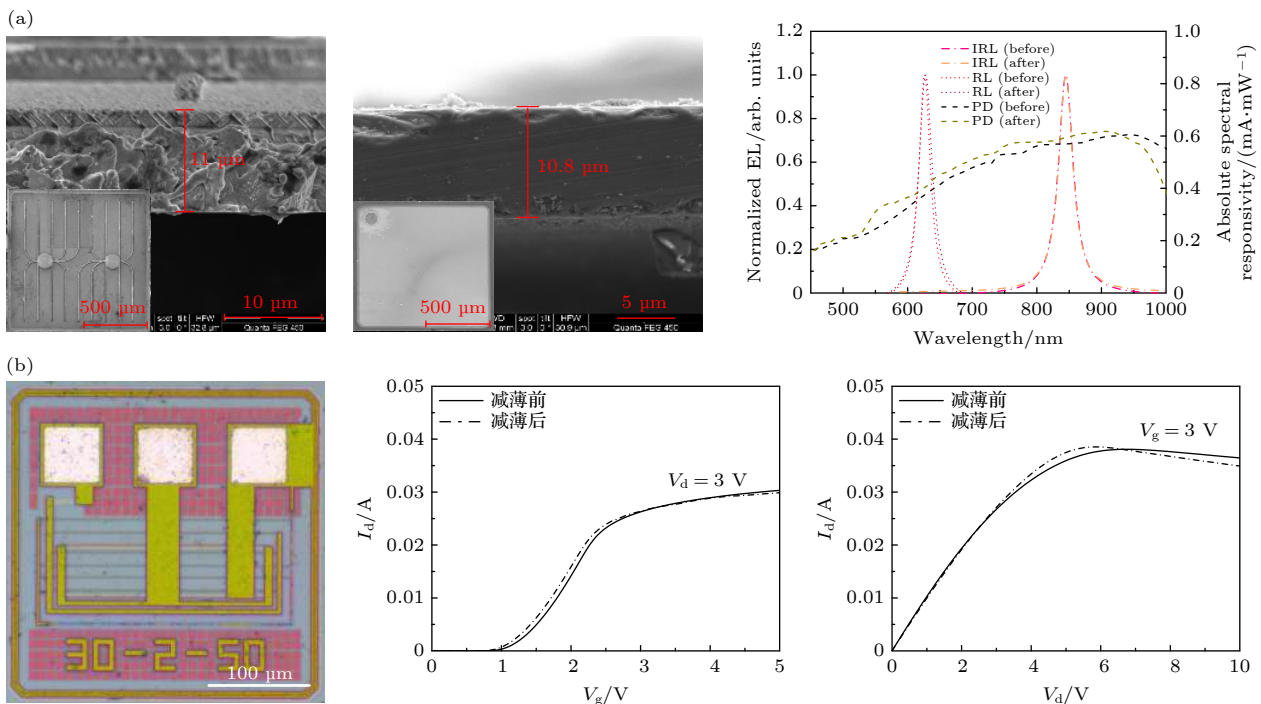


图 2 芯片减薄表征及性能测试 (a) 发光二极管(红光, 砷化镓)及光电探测器(硅)减薄后厚度方向和功能层表面 SEM 图片; 超薄半导体光电器件性能测试: 发光器件(红外光及红光 LED)的电致发光(electro luminescence, EL)光谱, 以及光电探测器的绝对光谱响应(absolute specular reflectance, ASR)^[15,16]。(b) MOS 管减薄后光镜图; 减薄前后转移特性曲线及输出特性曲线对比

Fig. 2. Characterization and properties of the thin-film semiconductors fabricated by thinning process: (a) SEM images show the thickness of the ultrathin red light LED and photodetector. Insets is the microstructure of the chips after thinning via the nano-diamond thinning process. Electroluminescence (electro luminescence, EL) spectra of light-emitting elements (infrared light and red light) and the absolute spectral responsibility (absolute specular reflectance, ASR) of photodetector used in the skin-like device^[15,16]; (b) optical image of the MOSFET after thinning process. The comparison of transfer characteristics at $V_d = 3\text{ V}$ and output characteristics at $V_g = 3\text{ V}$ of MOSFET between thin-film and original semiconductors.

线描述当漏极-源极电压为常量时,漏极电流 I_d 与栅极-源极电压 V_g 之间的函数关系;输出特性曲线描述当栅极-源极电压为常量时,漏极电流 I_d 与漏极-源极电压 V_d 之间的关系.观察可见,减薄前后的 MOS 管特性曲线基本重合,其开启电压、可变电阻区及恒流区等并没有发生明显变化,这充分说明纳米金刚石减薄技术将 MOS 管减薄至 $10\ \mu\text{m}$ 左右对其电学性能基本不会造成影响.

总之,基于纳米金刚石颗粒的减薄技术是一种高效的超薄半导体制备工艺.这种技术不仅可以针对半导体芯片进行减薄,同样可以应用于半导体晶圆的减薄,且基本不会影响到半导体器件性能,为发展超薄半导体器件提供了一条行之有效的途径.

2.3 可延展柔性结构设计

在实现了无机半导体器件或芯片等功能单元的减薄处理后,需要进一步针对互连线进行结构设计,从而确保集成电路在极大的拉伸应变下仍不出现裂纹并正常工作,于是,研究者们相继发展了基于屈曲模型的波浪结构法和岛桥结构法等.

在力学领域,对于柔性结构早有诸多理论研究.在这些理论之中,屈曲模型被认为是实现柔性、可延展结构的一种有效的途径.2006年,美国

西北大学 Rogers 研究小组^[5]通过预应变控制方法在聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 基底上制备了波纹状单晶硅条(图 3(a)),成功地通过屈曲结构实现了无机半导体材料柔性化.测试结果显示器件在承受较大变形的情况下电学性能无明显下降.波浪结构凭借易于制备、较大延展性等优点,被广泛应用于可延展电子器件制备中^[17-19].该工作为无机半导体器件可延展柔化奠定了基础.

由于在波浪结构中,薄膜和基体在变形中是完全粘合的,故其弯曲或拉伸性能受材料属性的影响较大. Sun 等^[20]对波浪结构进行了改进,仅让一部分薄膜与基体粘合,释放预应变后只有未粘合的薄膜发生屈曲,形成可控屈曲的波浪结构(图 3(b)).美国西北大学黄永刚研究小组^[21]对这种结构进行分析,进一步证明了该屈曲结构的波长和幅值与材料属性无关,拓宽了波浪结构在可延展柔性电子器件制备中的应用范围.

受可控屈曲的波浪结构的启发, Kim 等^[22,23]提出了岛桥结构法,进一步提高了半导体器件的柔性和延展性,并减小了拉伸过程中功能薄膜所承受的应变.在这种方法中,功能组件(岛)通过化学方法粘合在经过预拉伸的基体上,组件之间通过导线(桥)进行互连,导线与基体之间不发生粘合.

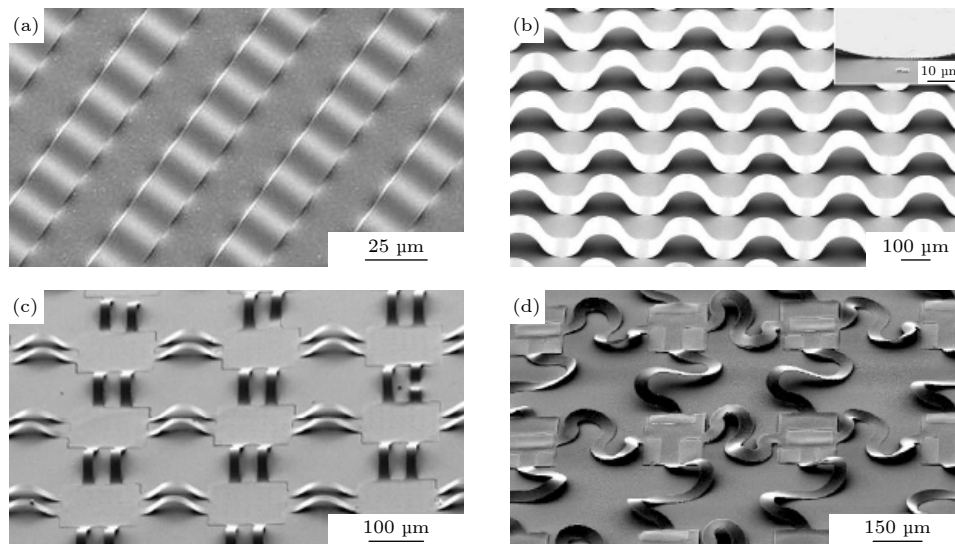


图 3 可延展柔性结构设计 (a) 单晶硅条带在 PDMS 基底上形成波浪结构的扫描电子显微镜照片^[5]; (b) 砷化镓纳米条带在 PDMS 基底部分粘合形成波浪结构的扫描电子显微镜照片^[20]; (c) 硅纳米薄膜在 PDMS 基底上的岛桥结构扫描电子显微镜照片^[22,23]; (d) 蛇形导线岛桥结构互连的可拉伸 CMOS 反相器阵列的扫描电子显微镜照片^[22,23]

Fig. 3. Designs of the flexible and stretchable structure: (a) SEM images of wavy, single-crystal Si ribbons^[5]; (b) SEM images of an array of gallium arsenide nanoribbons in buckled shapes where bonding to the PDMS substrate occurs only at the positions of the troughs, as illustrated in the top inset^[20]; (c) SEM image of a silicon nanomembrane in a buckled, mesh layout on PDMS^[22,23]; (d) SEM images of an array of stretchable CMOS inverters with noncoplanar bridges that have serpentine layouts^[22,23].

释放预应变后, 导线发生面外屈曲而拱起 (图 3(c)), 从而提高了柔性电子器件的延展性. 但是由于直导线的尺寸受到了岛与岛之间间距的影响, 因此结构的可延展性有限. 为继续提升延展率, Kim 等将互连部分设计为蛇形结构, 相比于直导线, 蛇形结构在相同的岛间距内长度更大 (图 3(d)). 故而当对器件进行拉伸时, 蛇形导线会发生更大的面外弯曲和扭转 (即面外屈曲), 从而承担了电子器件几乎全部的应变, 而其中的半导体功能组件几乎不承受应变, 最终器件的可延展性能可达到 100%. 研究者们基于岛桥结构发展了具有更小失真和更广视角的仿生电子眼相机 [24]、柔性 LED 显示器 [25] 等器件. 为了进一步提高柔性无机电子的柔性和延展性, 研究者在岛桥结构的基础上, 对蛇形线的几何构型进行拓展, 得到了多级分形互连导线结构等 [26], 并应用于锂电池的结构设计中, 实现了延展率为 300% 的可无线充电的锂电池 [27].

利用以上设计可以有效地提高器件整体柔性与可延展性, 将功能单元中的应变控制在材料失效极限以下, 从而降低了应变所引起的半导体性能改变, 使得电子器件可以承受拉伸、扭转、弯曲等复杂变形, 极大拓宽了柔性无机电子的应用范围, 现已成为微电子与集成电路革新性发展的方向之一.

2.4 转印技术及其对半导体电子器件性能的影响

在实现了器件的减薄处理及可延展柔性结构设计后, 需要将超薄半导体器件同可延展柔性互连线集成并封装于系统中. 在柔性无机电子技术中, 转印是实现异质集成必不可少的关键工艺. 转印技术是将不同功能、不同材料、不同尺寸的无机功能单元从源基底组装到柔性目标基底上最终形成柔性集成器件的过程, 该技术的核心是能够高效并行地将功能单元从源基底完整剥离, 并精确地按器件的结构有序地释放并搭接为具有特定功能的复杂系统 [28,29]. 目前应用最为广泛的即是基于印章的转印技术, 一般包括剥离与印制两个步骤: 剥离过程指的是用柔性印章将源基底上刻蚀完的薄膜器件 (空间有序的功能单元) 撕起; 印制过程指的是在经过对准后, 将之前柔性印章上所粘附的器件 (空间有序的功能单元) 印制在新的目标基底上. 整个过程如图 4(a) 所示.

转印过程涉及界面粘附调控和断裂的力学控制过程, 其力学机理为软印章、硬薄膜和基底三者间形成的两个界面的竞争断裂, 即两个或多个界面同时受到外力作用产生破坏倾向时, 界面强度的高低将决定哪个是首先破坏的界面, 因此如何调控界面的强度是转印技术进一步发展和完善的关键 [30,31].

通常用界面的临界能量释放率 G_{crit} (即单位面积界面破坏所需要的最小能量) 作为界面强度的衡量, 在剥离与印制过程中都是界面中强度较小者 (也即是临界能量释放率较小者) 首先发生破坏, 故

$$\text{剥离过程: } G_{\text{crit}}^{\text{film/substrate}} < G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}},$$

$$\text{印制过程: } G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}} < G_{\text{crit}}^{\text{film/substrate}}.$$

由于硬薄膜和基底均处于弹性变形状态, 所以二者间的界面称为弹性界面, 此界面的临界能量释放率 $G_{\text{crit}}^{\text{film/substrate}}$ 是由材料属性、界面粗糙度以及界面裂纹类型 (I 型、II 型、III 裂纹或不同程度的混合型裂纹等) 决定的常量, 而软印章变形过程中会产生粘弹性能量耗散, 故其临界能量释放率 $G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}}$ 和界面裂纹产生的速度有关 (可表示为 $G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}}(v)$), 从而可通过印章提起的速度来实现印章与器件界面粘附的强弱转化 [32,33]. 一般来讲, 随着提起速度的增大, 因应力来不及发生松弛, 界面的能量释放率将增大. Feng 等使用幂指数形式来描述印章与薄膜的临界能量释放率, 并获得了一个提起速度的临界值 v_c , 数学上该值是在 $G_{\text{crit}}^{\text{film/substrate}}(v_c) = G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}}$ 时得到, 物理上这个临界值标志着, 当提起速度满足 $v > v_c$ 时, 印章与薄膜间的能量释放率大于薄膜与基底间能量释放率, 薄膜与基底界面更容易发生分离, 从而实现薄膜的剥离; 而当提起速度 $v < v_c$ 时, 印章与薄膜之间的能量释放率小于薄膜与基底之间的能量释放率, 故印章与薄膜界面发生分离, 印制过程发生 (图 4(a) 的相图). 因此, 率相关印章转印技术总结起来是“快撕慢印”.

除以上介绍的率相关印章转印技术外, 近年来, 研究者们还发展了基于微结构的转印技术 [34]、基于形状记忆聚合物的转印技术 [35,36]、基于胶带的转印技术 [37]、基于磁控的转印技术 (图 4(b)) [38] 以及基于液滴的转印技术 (图 4(c)) [39] 等. 转印技术扩大了电子器件的应用范围, 利用其制备的电子器件表现出的优良性能, 在显示、能源、医疗健康及人机交互中等领域具有广泛的应用前景 [40-45].

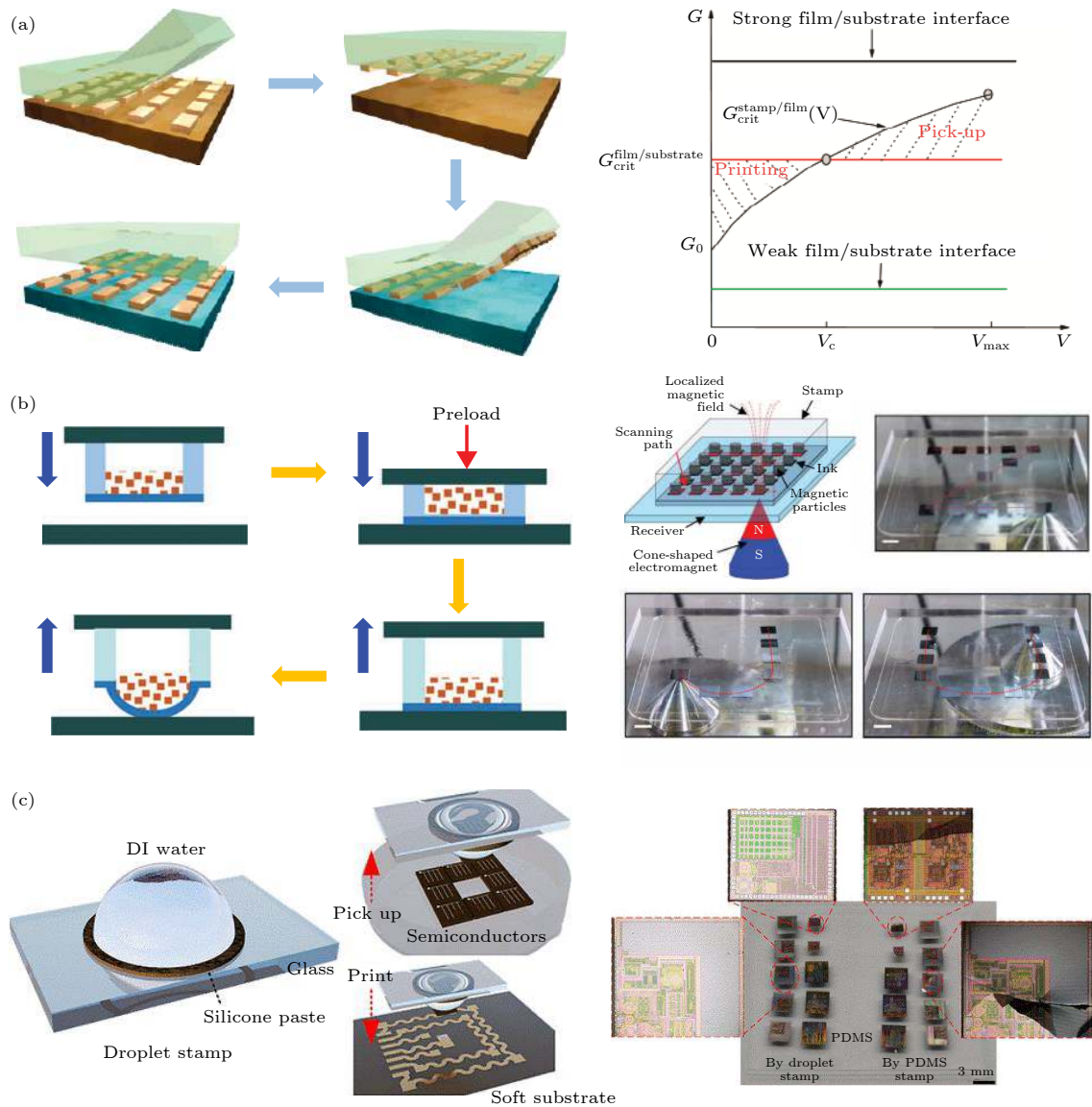


图 4 转印技术 (a) 基于率相关印章的转印技术 [32]; (b) 基于磁控的转印技术 [38]; (c) 基于液滴的转印技术 [39]

Fig. 4. Transfer printing techniques: (a) Kinetically controlled transfer printing [32]; (b) magnetically actuated transfer printing [38]; (c) transfer printing using droplet stamps [39].

但是目前在纳米器件的转印, 三维复杂曲面的转印和大规模、高效、精准转印方面仍存在巨大的挑战, 相信随着科技的发展, 研究者们将在不久的将来攻克掉这些难题.

2.5 柔性无机电子技术在健康医疗中的应用

基于上述设计方法与关键技术, 柔性无机电子器件近些年来已取得长足的进步 [46–48], 尤其在柔性传感领域, 凭借柔性和可延展性, 其可与皮肤、心脏、神经等共形贴合, 被广泛用于检测生物体生理参数, 如: 柔性无创血糖传感器 [49]、软硬材料上

制备的温度传感器 [50]、类皮肤压力传感器 [51]、超柔变形传感器 [52]、利用攀爬现象制备的可用于神经电刺激及电信号采集的螺旋电极 (图 5(a)) [53]、与软体手集成的高性能柔性触觉传感器 (图 5(b)) [54]、可延展柔性血氧及血压传感器 (图 5(c)) [16] 及高密度超薄超柔脑电极 [55] 等, 实现了血糖、温度、心率、血氧、血压及生物电信号等多种生理信息的精准监测.

2.6 小结

综上所述, 一方面, 研究柔性无机电子技术中的减薄、转印关键技术及对半导体电子器件性能的

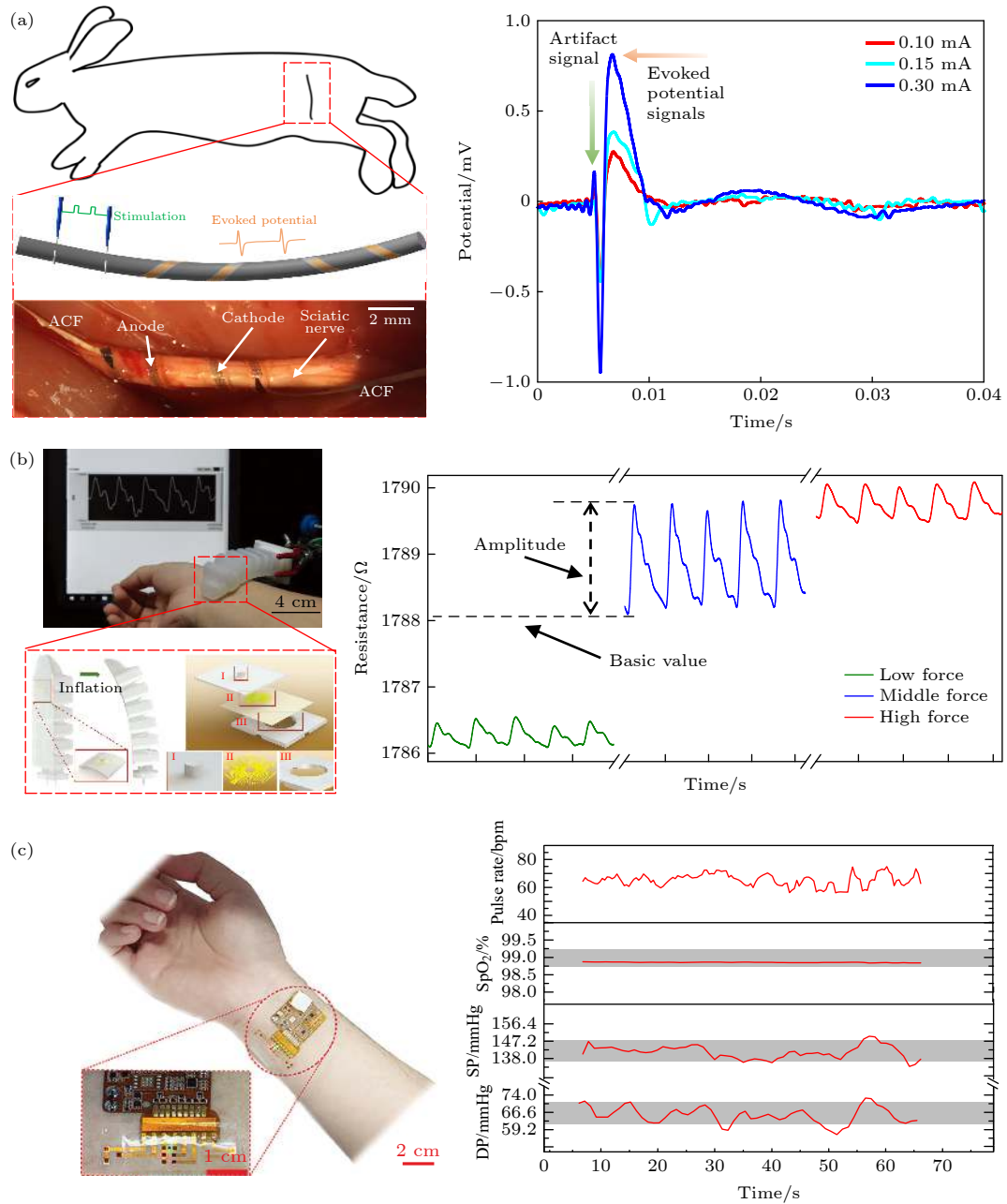


图 5 可延展柔性传感器在健康医疗中的应用 (a) 用于神经电刺激与电信号采集的螺旋电极 [53]; (b) 与假手集成的柔性触觉传感器 [54]; (c) 可延展柔性血氧及血压监测系统 [16]

Fig. 5. Applications of stretchable and flexible electronics: (a) Climbing-inspired twining electrodes using shape memory for peripheral nerve stimulation and recording [53]; (b) flexible tactile sensor integrated with a soft prosthetic hand [54]; (c) wearable skin-like optoelectronic systems for cuff-less continuous blood pressure monitor [16].

影响对于评估分析可延展柔性器件在大变形工作环境下的性能变化具有十分重要的意义, 结合可延展柔性结构设计将有望推动基于力学优化的半导体器件的结构设计, 从而有效规避变形等引起的器件性能改变; 另一方面, 通过合理设计结构引入单轴或双轴应变来调控半导体材料的物理性质, 进而设计优化半导体器件近些年受到诸多关注.

3 半导体材料性能调控

3.1 概述

随着集成电路的高速发展, 硅基 CMOS 器件特征尺寸不断缩小且集成度与复杂度急剧增强, 单个晶体管的尺寸越来越接近物理和技术的双重极限, 摩尔定律陷入瓶颈. 为延续摩尔定律, 应变硅

凭借其载流子迁移率高、能带结构可调, 并与硅的微电子技术相兼容等优异特性得到广泛关注与应用, 已成为高速高性能半导体器件与集成电路的研究发展重点^[56–59], 目前可以通过衬底引入双轴应变或半导体工艺引入单轴应变来增强载流子迁移率. 以上利用应变来调控材料(三维的块材、二薄的薄膜或者一维的量子点等多尺度多形态材料)宏观物理性质的过程称为“应变工程”. 目前, 应变工程已广泛应用于调控半导体能带、铁电及介电材料性能、多铁性薄膜电磁性能等领域^[60–64].

半导体材料的光电性质本质上取决于其能带结构, 主要包括能隙、态密度等, 因此正确理解半导体能带结构对于研究其光电特性尤为重要. 鉴于此, 江崎和朱兆祥等提出“能带工程”的概念, 即创造人工改性半导体材料能带的工程: 能隙作为半导体材料的本征特性之一, 源自于材料内稳定的周期性晶体势场. 故当晶体的晶格受到应变而发生畸变时, 原本稳定的周期性晶体场便发生改变, 材料的本征能隙也会相应地发生变化. 对材料的物理参数和几何参数进行设计和生长(如调节材料原子组分和各层材料的掺杂浓度、引入应变、生长异质结构等), 以改变其能带结构并调控材料能隙大小, 可以优化其电、光学性质, 从而获得性能更加优越的新器件材料^[65–69].

3.2 半导体材料中的应变-能带结构耦合关系

在能带工程中, 研究应变-能带结构间的耦合关系是重中之重. 将应变与材料能带结构相结合, 不仅会更深入理解材料特性并探索到新的物理现象, 而且对于人工设计半导体器件并调控其性能具有重要指导作用. 同时, 将原位应变调控技术和能带工程以及设计新型半导体功能结构相结合, 进一步实现材料光电性能的多参量调控, 也是未来研究的重点方向之一. 一直以来, 对半导体材料施加应力主要通过外延来实现, 即利用生长材料与基底的晶格不匹配所导致的位错获得本征内应力^[70,71], 这种方法简单且易于实现, 但所得到的应力是单一的双轴面内应力, 不存在梯度分布, 且一旦材料与基底体系确定后, 应力水平便固定不变.

随着微纳技术的发展, 部分半导体材料可以通过新型生长技术制备成纳米线、纳米管等低维材料, 并结合微观应力加载平台, 搭配精细化的实验测量仪器, 这给应变调控半导体特性带来了契机.

低维材料因某一维度的尺寸在分子乃至原子的尺度范围, 从而使得应变的引入强烈扰动材料的能带结构, 一定程度上对应变调控效应有放大的作用; 且低维材料如纳米线等屈服强度较块体材料或传统电子材料大大增强, 从而可以更有效地通过引入应变调控其电学及光学性能^[72–76]. Wei 等^[77]针对不同尺寸(直径)的氧化锌纳米线进行单轴拉伸研究其能隙的改变, 对直径 100 nm 的纳米线施加 7.8% 的拉应变, 其能隙改变量可达 110 meV (图 6(a)). Signorello 等^[78]对 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs 的核壳结构纳米线施加 3.5% 的拉应变时, 其带隙可以降低 296 meV, 为基于半导体纳米线的光电器件利用应变效应实现宽波段范围内的光学特性调控提供了非常好的借鉴思路, 其核壳结构的加载方式与能隙变化图如图 6(b) 所示. 除了研究应变对纳米线的调控, 诸多对于较为新颖的单原子层材料的应变调控同样受到关注. Qi 等^[6]研究了不同宽度的六方氮化硼纳米条带在施加不同的单轴拉伸下能隙的变化, 其中对宽为 6 nm 的条带施加 10% 的拉伸应变实现了其能隙从 3.5 eV 降低到 1.0 eV, 意味着六方氮化硼的能隙可以在弹性应变范围内降低至单晶硅的能隙水平, 为利用弹性应变工程调控二维纳米条带的光学及电学特性提供了新的思路. Conley 等^[79]对单层以及双层二硫化钼施加单轴拉应变均观测到了能隙改变量与应变之间的近似线性关系: 单层约 45 meV/%, 双层约 120 meV/%. Lloyd 等^[80]通过气压诱导双轴应变实现了单层二硫化钼薄膜能隙的连续可逆调控, 其中在微米大小的区域内可引入 5.6% 的双轴应变且能隙改变量达 500 meV(图 6(c)), 为研究双轴应变对其他二维半导体材料性能的影响提供了借鉴意义.

另一方面, 研究应变-能带结构间的耦合关系将有望突破间接带隙半导体材料在光发射领域的受限. 通过对间接带隙半导体材料如锗, 施加相应的应变, 增加其光激发效率, 可以拓展其在光电发射器件领域应用的潜能^[81–85]. Sánchez-Pérez 等^[86]将不同厚度的锗纳米薄膜转印至柔性聚酰亚胺薄膜 (polyimide, PI) 上, 并通过加压的方式引入双轴应变, 最大应变在 2% 左右. 研究发现, 随着施加的拉应变的增加, 厚度为 40 nm 的锗薄膜的光致发光强度明显增强, 其引入应变示意图及随应变变化的光致发光光谱图如图 7(a) 所示; Süess 等^[87]通过结构设计锗微桥应变结构, 将应变集中于窄桥

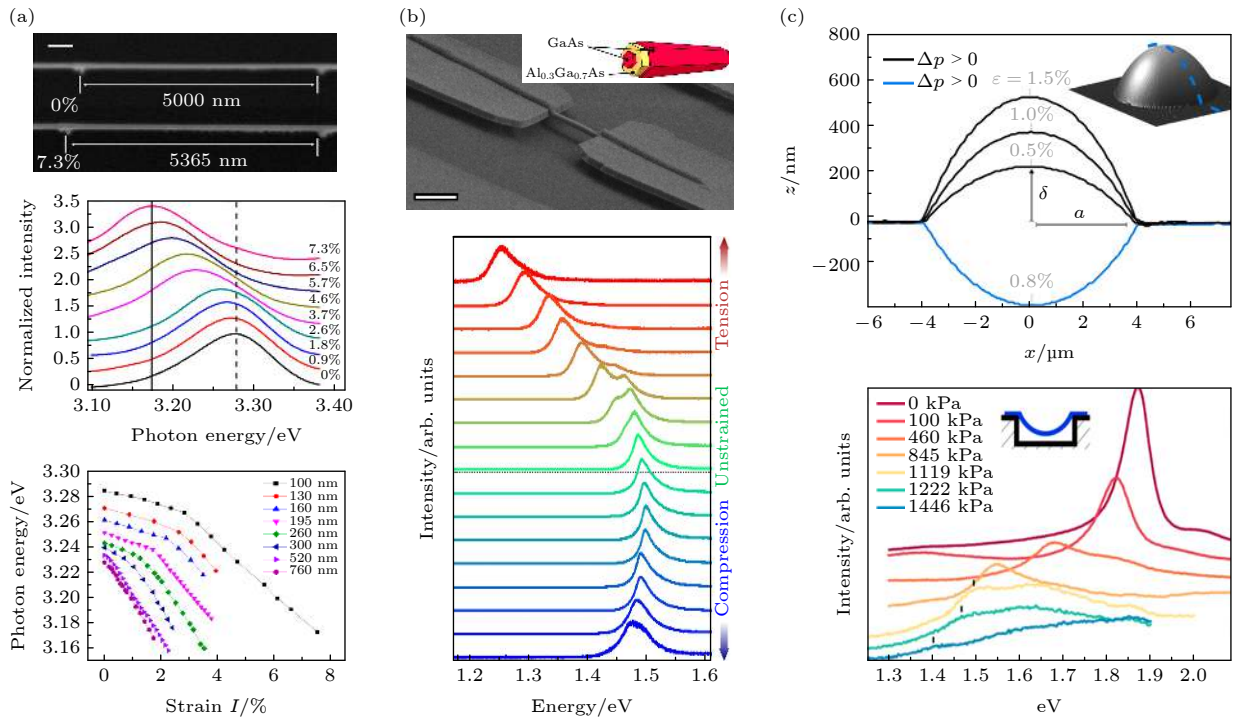


图 6 低维材料中的应变-能带结构耦合关系 (a) 单轴拉伸调控氧化锌纳米线^[77]; (b) 单轴拉压调控 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs 核壳结构纳米线^[78]; (c) 双轴应变调控单层二硫化钼薄膜^[80]

Fig. 6. Applications of strain effects on band structures to low-dimensional materials: (a) The shifts of the near-band-edge (NBE) peak for the 100 nm nano-wire (NW) by tension and the photon energy versus strain curves for ZnO NWs with different diameters^[77]; (b) schematic of a GaAs-Al_{0.3}Ga_{0.7}As-GaAs core-shell nanowire and photoluminescence (PL) spectra measured for different values of applied uniaxial stress^[78]; (c) the monolayer MoS₂ bulged up or down depending on whether Δp is positive or negative and in situ measurements of PL spectra for a monolayer device^[80].

区域,从而成功地在悬浮的锗微桥中引入了高达 3.1% 的单轴拉应变,实验测到其光致发光强度为体材料的 25 倍.该方法同 CMOS 工艺相兼容,且得到的应变值较大,因而受到了广泛的关注,锗微桥及光致发光光谱如图 7(b) 所示; Bao 等^[88]在微桥结构中的平板区域通过刻蚀弧形分布式布拉格反射器光栅来引入光反馈(图 7(c)),结合 1.6% 的单轴拉应变锗以及 Q 值大于 1100 的光学谐振腔,观察到了低温(80 K)的光抽运激射,且阈值功率仅为 3 kW/cm²,从而论证了拉应变的锗材料作为低阈值硅基激光器的可行性.

然而,以上所阐述的通过外界手段所引入的设计大多局限于拉应力且应变多为固定值,到目前为止,定量地引入压应力仍然是一大难题,而柔性电子技术的发展为此提供了契机.

3.3 屈曲纳米薄膜条带模型调控半导体特性

将屈曲模型同半导体材料性能调控相结合, Wang 等^[89]提出一种转印方法,将脆性的无法直

接拉伸或压缩的纳米级 Al_xGa_{1-x}As 条带集成至预拉伸的软基底上,释放预应变后利用结构屈曲得到了稳定的余弦形的波浪状周期结构,借助微区拉曼谱(μ -Raman)和微区光致发光谱(μ -PL)的表征手段,分析了一维屈曲模型下的 Al_xGa_{1-x}As 薄膜表面部分所受应变以及能隙随具体位置的分布规律.结果表明 GaAs 的能隙可以在结构上形成周期性的调控.该方法为连续应变调控脆性的半导体材料提供了技术和理论支撑,未来可以继续拓展应用在一些需要材料性能周期性变化的新兴领域之中.

研究所涉及的功能纳米条带 Al_xGa_{1-x}As 多层材料通过金属有机化合物化学气相沉积(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)生长在〈001〉取向的 GaAs 衬底上,其外延层自下而上分别是 Al_{0.9}Ga_{0.1}As (500 nm), GaAs (300 nm), Al_{0.5}Ga_{0.5}As (300 nm), GaAs (20 nm), 其中厚度为 500 nm 的 Al_{0.9}Ga_{0.1}As 底层用作刻蚀过程中的牺牲层.一方面,厚度为 300 nm 的 Al_{0.5}Ga_{0.5}As 层保证中性面距离上表面 340 nm,从而使得 300 nm

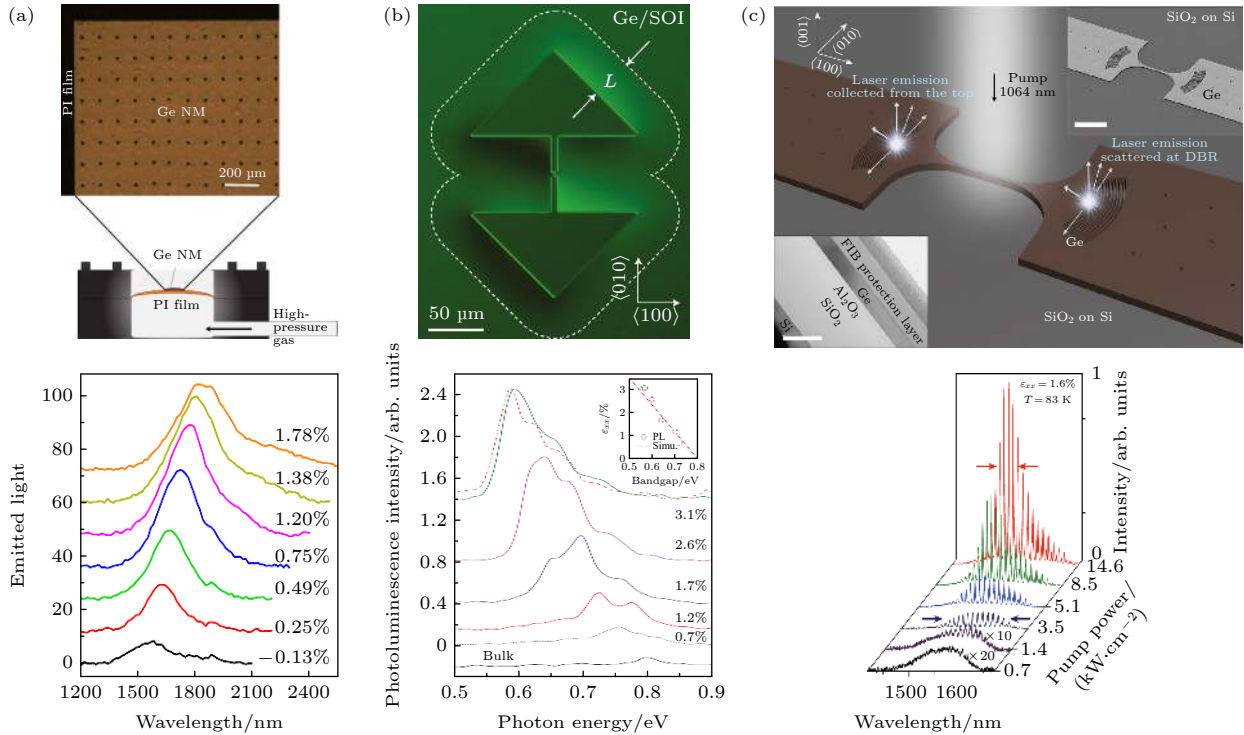


图 7 锗材料中的应变-能带结构耦合关系 (a) 双轴应变调控锗纳米薄膜^[86]; (b) 锗微桥应变结构及光致发光谱(室温)^[87]; (c) 单轴拉应变锗 DBR 激光器及不同泵浦光功率下的光致发光谱(80 K)^[88]

Fig. 7. Applications of strain effects on band structures to Ge material: (a) Ge nanomembranes(NMs) and schematic sample mount and PL spectra of a 40 nm thick Ge NM at different levels of biaxial tensile strain^[86]; (b) differential interference contrast light-microscopy image of a Ge/SOI structure and μ PL spectra taken from structures with increasing longitudinal strain up to 3.1% and excitation in the center of the constriction^[87]; (c) Schematic illustration of a typical Ge nanowire laser consisting of a strained nanowire surrounded by a pair of distributed Bragg reflectors (DBRs) on the stressing pads and power-dependent photoluminescence spectra of a 1.6% strained Ge nanowire with DBRs showing a gradual transition from broad spontaneous emission to multimode lasing oscillation (threshold, 3.0 kW/cm²)^[88].

厚的 GaAs 层始终承受一种应变状态; 另一方面是其间接能隙的特性不会干扰后续的 PL 谱测量. 顶层 20 nm 厚度的 GaAs 层保护 Al_{0.5}Ga_{0.5}As, 防止氧化. 功能复合薄膜通过光刻与湿法刻蚀的方法实现图案化, 纳米条带的两端具有防止薄膜在牺牲层被钻蚀过程中漂走的锚固定结构, 通过氢氟酸钻蚀底部牺牲层, 获得两端半固定而中间条带悬空的“狗骨头”结构. 后续通过转印集成的方法将功能条带集成至预加热 120 °C, 150 °C 以及 180 °C 所实现的预应变分别为 1.8%, 2.4% 以及 2.9% 的 PDMS 衬底上, 待冷却至室温, 预应变释放, 即得到了波浪状结构的功能条带, 具体流程示意图如图 8(a) 所示. 使用光学显微镜以及 3D 形貌显微镜可观察到三个试件在不同预应变的软基底上所形成的纳米条带的屈曲结构 (图 8(b)), 该种屈曲模式同之前的硅条带以及其他半导体条带的屈曲后形貌相似^[20]. 在 3D 形貌图中反映实际屈曲的面外位移确实具有余弦函数形状, 借助 3D 形貌显微镜可以

准确地测量出余弦形状的屈曲形貌上的波长和振幅, 并将此同前述基于小变形假设的屈曲模型^[90,91]对比发现, GaAs 屈曲条带的波长与振幅结果均符合理论公式的预测. 故进一步证明了当材料体系确定后, 结构屈曲的形貌可由基底预应变来决定, 且依据后屈曲理论, 还可对释放预应变后的功能薄膜的屈曲模式通过机械拉伸或者压缩进行进一步的调控, 这为半导体材料在更大应变范围内的性能调控提供了一种方便而普适的方法.

为了直观地观察到屈曲结构所导致的 GaAs 能隙的改变, 研究中采用 PL 光谱观察到 GaAs 条带在一个周期内能隙的连续周期性变化 (图 8(c)). 图 8(c) 中反映一个周期的“谷”处呈现能隙的最大值, 而“峰”处为能隙的最小值, 从“谷”到“峰”, 能隙逐渐连续的变窄, 且呈现伴随屈曲结构一致的周期性改变.

研究发现由应变导致的 GaAs 的特性发生的周期性改变同屈曲形貌的周期性变化类似, 进一步

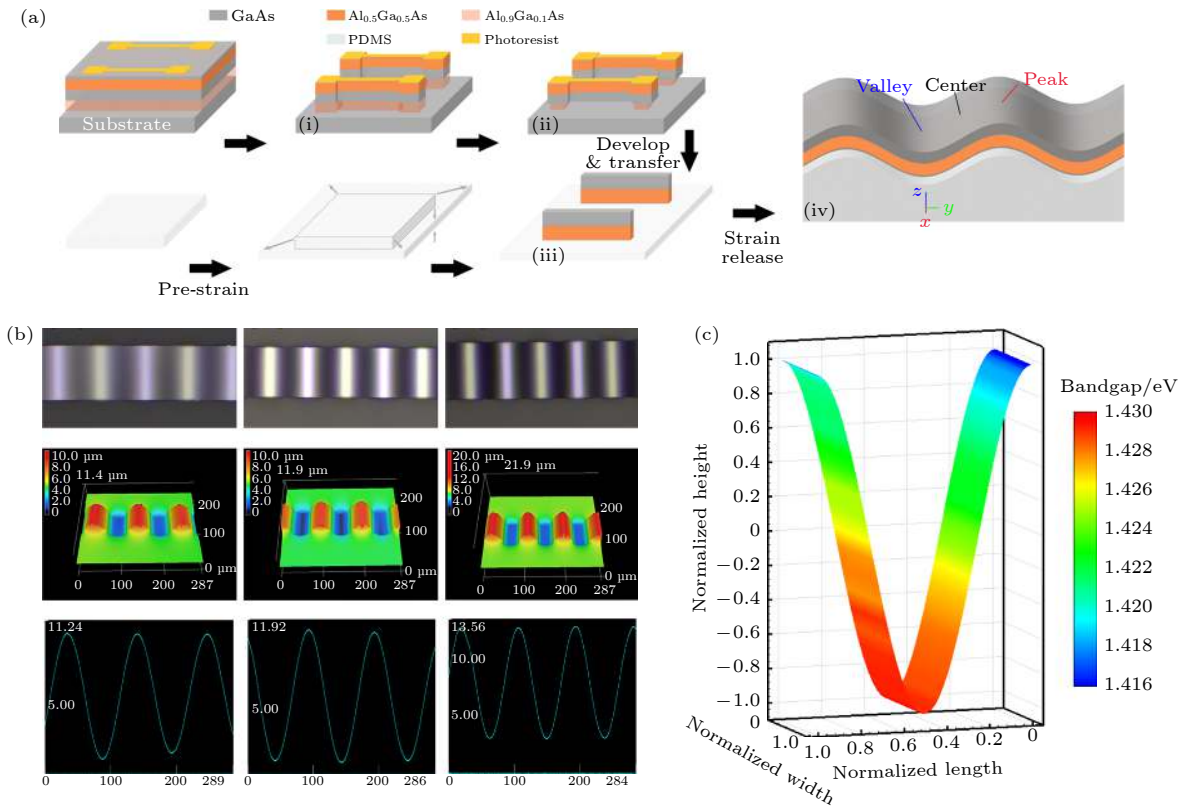


图 8 功能纳米条带屈曲图及能隙与形貌叠加图^[89] (a) GaAs 纳米条带屈曲制备流程图; (b) 屈曲条带光镜图及 3D 形貌图; (c) 单个周期内 GaAs 的能隙变化与形貌变化叠加图

Fig. 8. Buckling-based method for measuring the strain-photonic coupling effect of GaAs nanoribbons^[89]: (a) Schematic procedures of fabricating the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ wavy geometry on PDMS; (b) optical microscope image, 3D microstructure, and profile details of a single ribbon for three samples; (c) band gap mapping by PL scanning within one period in the wavy ribbon.

说明了研究所提出的这种一维屈曲形貌周期性改变材料禁带宽度的方法在未来有可能应用在某些要求同一材料必须具备周期性变化性能的区域之中。

屈曲结构在连续调控半导体量子阱结构中同样取得了较好的研究结果. Zhang 等^[92]进一步研究了 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱结构在一维屈曲下的连续周期性能带分布, 研究所涉及的量子阱结构通过分子束外延生长在 $\langle 001 \rangle$ 取向的 GaAs 衬底上, 自下而上分别是 AlAs (100 nm), $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (250 nm), GaAs (65 Å), $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (250 nm), 并在顶层沉积一层厚度为 80 nm 的金薄膜来调整量子阱结构的中性面位置, 使得 GaAs 层处于一种应变状态. 通过光刻与湿法刻蚀将整体结构刻蚀为“狗骨头”状, 并腐蚀牺牲层 AlAs, 将整体结构转印至预拉伸的 PDMS 薄膜上, 释放预应变即可得到量子阱结构的一维屈曲模式, 其制备流程图示意图如图 9(a) 所示. 样品以 13 μm 的等间距取点在连续波浪状结构中的能隙分布如图 9(b)

所示, 能隙同样呈现连续的周期性变化, 证实了该种屈曲结构实现了量子阱结构能隙的连续周期性调控.

实验最后进一步研究了在满足结构未断裂的基础上, 通过调节量子阱结构的相对位置 (r/d) 以及屈曲结构的波形 (A/L) 实现能隙调控的最大化. 将能隙的改变率同两个外界可控的无量纲量绘制于图 9(c) 中, 可发现在 $r/d = 73.3\%$ 且 $A/L = 30.7\%$ 时能隙改变率可达到 6.7%.

该实验通过简单而切实可行的屈曲结构实现了量子阱结构能隙的连续周期性调控, 测得一周期内能隙改变量可达 3.6 meV, 这为设计带隙可调的量子阱发射器提供了借鉴思路.

3.4 小结

通过以上综述应变-能带结构耦合关系在低维材料及间接带隙半导体材料中的应用, 凸显了应变工程及能带工程在半导体材料性能调控中的重要作用. 利用柔性电子技术中的转印技术结合屈曲纳

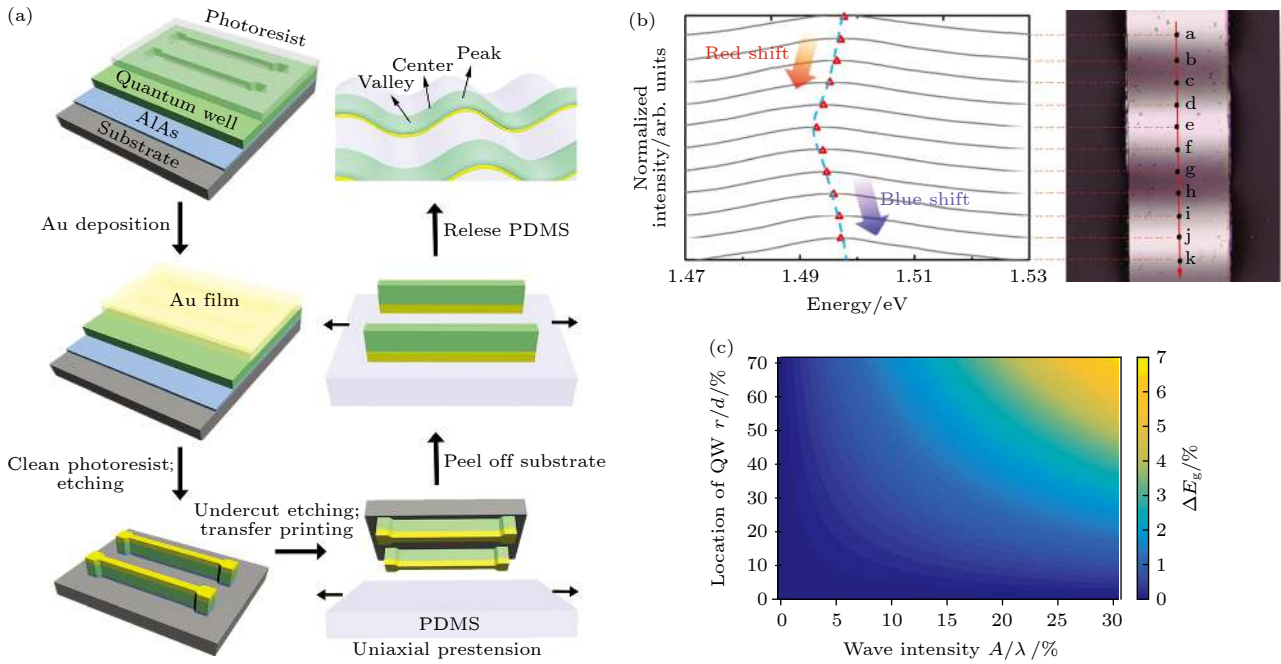


图 9 半导体量子阱结构的应变调控^[92] (a) $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱结构屈曲制备流程示意图; (b) 量子阱结构屈曲条带的能隙分布; (c) 量子阱结构实现能隙调控优化示意图

Fig. 9. Strain engineering in quantum well embedded in wavy nanoribbons^[92]: (a) Schematic procedures of fabricating the wavy quantum well nanoribbons (QWNRs) on PDMS; (b) strain effect on the photonic property of the wavy QWNR; (c) band gap variation of a single QWNR as a function of wave intensity A/λ and the location of QW r/d within the fracture limit of the nanoribbon.

米薄膜条带力学模型, 将半导体纳米薄膜条带集成到受预拉伸的柔性衬底上, 通过释放预拉伸应变形成屈曲形貌, 从而在空间上引入连续周期性变化的应变场, 可以实现半导体材料的能隙在结构上形成周期性的调控, 突破了传统应变工程中受限于无机材料硬而脆的特性, 且引入应变多为固定值的局限, 为针对半导体材料或其他功能材料的应变调控提供了一种新方法, 为设计优化半导体器件提供了新的思路。

4 总结及展望

综上所述, 将柔性电子技术同半导体材料性能调控研究相结合, 通过合理的结构设计与关键的微纳加工制备技术, 一方面可以降低甚至规避变形引起的器件性能改变, 另一方面可以通过引入合适的应变调控器件性能, 这不仅会更深入理解材料特性并探索到新的物理现象, 同样可以为基于无机功能材料的可延展柔性电子器件在大变形环境下的性能评估提供理论基础, 进而对于人工设计半导体器件并调控其性能具有重要的指导作用。

参考文献

- [1] Nathan A, Ahmood A, Cole M T, Lee S, Suzuki Y, Hiralal P, Bonaccorso F, Hasan T, Garcia-Gancedo L, Dyadyusha A, Haque S, Andrew P, Hofmann S, Moultrie J, Chu D, Flewitt A J, Ferrari A C, Kelly M J, Robertson J, Amaratunga G A J, Milne W I 2012 *Proc. IEEE* **100** 1486
- [2] Kim D H, Ghaffari R, Lu N, Rogers J A 2012 *Annu. Rev. Biomed. Eng.* **14** 113
- [3] Ma Y, Zhang Y, Cai S, Han Z, Liu X, Wang F, Cao Y, Wang Z, Li H, Chen Y, Feng X 2020 *Adv. Mater.* **32** 1902062
- [4] Hou X Y, Guo C F 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 178102 (in Chinese) [侯星宇, 郭传飞 2020 *物理学报* **69** 178102]
- [5] Khang D Y, Jiang H, Huang Y, Rogers J A 2006 *Science* **311** 208
- [6] Qi J, Qian X, Qi L, Feng J, Shi D, Li J 2012 *Nano Lett.* **12** 1224
- [7] Wang S D, Song J Z, Kim D H, Huang Y G, Rogers J A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 023126
- [8] Gassenq A, Guillois K, Dias G O, Pauc N, Rouchon D, Hartmann J M, Widiez J, Tardif S, Rieutord F, Escalante J, Duchemin I, Niquet Y M, Geiger R, Zabel T, Sigg H, Faist J, Chelnokov A, Reboud V, Calvo V 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 191904
- [9] Cai S, Zhang C, Li H, Lu S, Li Y, Hwang K C, Feng X 2017 *AIP Adv.* **7** 035221
- [10] Feng X, Yang B D, Liu Y M, Wang Y, Dagdeviren C, Liu Z J, Carlson A, Li J Y, Huang Y G, Rogers J A 2011 *ACS Nano* **5** 3326
- [11] Jiang H B, Xiong L, Zhu M N, Deng G, Wang X Q 2015 *Semicond. Optoelectron.* **36** 930 (in Chinese) [江海波, 熊玲, 朱梦楠, 邓刚, 王小强 2015 *半导体光电* **36** 930]

- [12] Chen C C A, Shu L S, Lee S R 2003 *J. Mater. Process. Technol.* **140** 373
- [13] Gurnett K, Adams T 2006 *III-Vs Review* **19** 38
- [14] Tang X Q, H P 2014 *Semicond. Technol.* **39** 442 (in Chinese) [唐晓琦, 淮璞 2014 半导体技术 **39** 442]
- [15] Li H, Xu Y, Li X, Chen Y, Jiang Y, Zhang C, Lu B, Wang J, Ma Y, Chen Y, Huang Y, Ding M, Su H, Song G, Luo Y, Feng X 2017 *Adv. Healthcare Mater.* **6** 1601013
- [16] Li H, Ma Y, Liang Z, Wang Z, Cao Y, Xu Y, Zhou H, Lu B, Chen Y, Han Z, Cai S, Feng X 2020 *Natl. Sci. Rev* **7** 849
- [17] Sun Y, Kumar V, Adesida I, Rogers J A 2006 *Adv. Mater.* **18** 2857
- [18] Choi W M, Song J Z, Khang D Y, Jiang H Q, Huang Y Y, Rogers J A 2007 *Nano Lett.* **7** 1655
- [19] Moon M W, Lee S H, Sun J Y, Oh K H, Vaziri A, Hutchinson J W 2007 *PANS* **104** 1130
- [20] Sun Y, Choi W M, Jiang H, Huang Y Y, Rogers J A 2006 *Nat. Nanotechnol.* **1** 201
- [21] Jiang H Q, Sun Y G, Rogers J A, Huang Y G 2008 *Int. J. Solids Struct.* **45** 2014
- [22] Kim D H, Song J Z, Choi W M, Kim H S, Kim R H, Liu Z J, Huang Y Y, Hwang K C, Zhang Y W, Rogers J A 2008 *PANS* **105** 18675
- [23] Kim D H, Xiao J L, Song J Z, Huang Y G, Rogers J A 2010 *Adv. Mater.* **22** 2108
- [24] Ko H C, Stoykovich M P, Song J, Malyarchuk V, Choi W M, Yu C J, Geddes I J B, Xiao J, Wang S, Huang Y, Rogers J A 2008 *Nature* **454** 748
- [25] Park S I, Xiong Y J, Kim R H, Elvikis P, Meitl M, Kim D H, Wu J, Yoon J, Yu C J, Liu Z J, Huang Y G, Hwang K, Ferreira P, Li X L, Choquette K, Rogers J A 2009 *Science* **325** 977
- [26] Zhang Y H, Fu H R, Su Y W, Xu S, Cheng H Y, Fan J A, Hwang K C, Rogers J A, Huang Y G 2013 *Acta Mater.* **61** 7816
- [27] Xu S, Zhang Y H, Cho J, Lee J, Huang X, Jia L, Fan J A, Su Y W, Su J, Zhang H G, Cheng H Y, Lu B W, Yu C J, Chuang C, Kim T I, Song T, Shiget K, Kang S, Dagdeviren C, Petrov I, Braun P V, Huang Y G, Paik U, Rogers J A 2013 *Nat. Commun.* **4** 1543
- [28] Carlson A, Bowen A M, Huang Y, Nuzzo R G, Rogers J A 2012 *Adv. Mater.* **24** 5284
- [29] Meitl M A, Zhu Z T, Kumar V, Lee K J, Feng X, Huang Y Y, Adesida I, Nuzzo R G, Rogers J A 2006 *Nat. Mater.* **5** 33
- [30] Kim-Lee H J, Carlson A, Grierson D S, Rogers J A, Turner K T 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 143513
- [31] Huang Y, Li H C, Chen Y, Cai S S, Zhang Y C, Lu B W, Feng X 2016 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **46** 044607 (in Chinese) [黄银, 李海成, 陈颖, 蔡世生, 张迎超, 陆炳卫, 冯雪 2016 中国科学: 物理学 力学 天文学 **46** 044607]
- [32] Feng X, Meitl M A, Bowen A M, Huang Y, Nuzzo R G, Rogers J A 2007 *Langmuir* **23** 12555
- [33] Chen H, Feng X, Huang Y, Huang Y, Rogers J A 2013 *J. Mech. Phys. Solids* **61** 1737
- [34] Kim S, Wu J, Carlson A, Jin S H, Kovalsky A, Glass P, Liu Z, Ahmed N, Elgan S L, Chen W, Ferreira P M, Sitti M, Huang Y, Rogers J A 2010 *PANS* **107** 17095
- [35] Eisenhaure J D, Rhee S I, Al-Okaily A M, Carlson A, Ferreira P M, Kim S 2014 *J. Microelectromech. Syst.* **23** 1012
- [36] Huang Y, Zheng N, Cheng Z, Chen Y, Lu B, Xie T, Feng X 2016 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** 35628
- [37] Sim K, Chen S, Li Y, Kammoum M, Peng Y, Xu M, Gao Y, Song J, Zhang Y, Ardebili H, Yu C 2015 *Sci. Rep.* **5** 16133
- [38] Linghu C, Wang C, Cen N, Wu J, Lai Z, Song J 2019 *Soft Matter* **15** 30
- [39] Li H, Wang Z, Cao Y, Chen Y, Feng X 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 1612
- [40] Lee J, Wu J, Shi M, Yoon J, Park S I, Li M, Liu Z, Huang Y, Rogers J A 2011 *Adv. Mater.* **23** 986
- [41] Song Y M, Xie Y, Malyarchuk V, Xiao J, Jung I, Choi K J, Liu Z, Park H, Lu C, Kim R H, Li R, Crozier K B, Huang Y, Rogers J A 2013 *Nature* **497** 95
- [42] Yan Z, Pan T, Xue M, Chen C, Cui Y, Yao G, Huang L, Liao F, Jing W, Zhang H, Gao M, Guo D, Xia Y, Lin Y 2017 *Adv. Sci.* **4** 1700251
- [43] Luo H Y, Linghu C H, Song J Z 2018 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **48** 094610 (in Chinese) [罗鸿羽, 令狐昌鸿, 宋吉舟 2018 中国科学: 物理学 力学 天文学 **48** 094610]
- [44] Li H, Cao Y, Wang Z, Feng X 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 4023
- [45] Chen Y, Zhang Y, Liang Z, Cao Y, Han Z, Feng X 2020 *npj Flexible Electron.* **4** 2
- [46] Feng X, Lu B W, Wu J, Lin Y, Song J Z, Song G F, Huang Y G 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014201 (in Chinese) [冯雪, 陆炳卫, 吴坚, 林媛, 宋吉舟, 宋国锋, 黄永刚 2014 物理学报 **63** 014201]
- [47] Li K, Chen L, Zhu F, Huang Y 2020 *J. Appl. Mech.* **88** 021011
- [48] Ning S, Chu D, Yang F, Jiang H, Liu Z, Zhuang Z 2021 *J. Appl. Mech.* **88** 051001
- [49] Chen Y, Lu S, Zhang S, Li Y, Qu Z, Chen Y, Lu B, Wang X, Feng X 2017 *Sci. Adv.* **3** 1701629
- [50] Cao Y, Zhang G, Zhang Y, Yue M, Chen Y, Cai S, Xie T, Feng X 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1804604
- [51] Han Z, Cheng Z, Chen Y, Li B, Liang Z, Li H, Ma Y, Feng X 2019 *Nanoscale* **11** 5942
- [52] Chen Y, Lu B, Chen Y, Feng X 2016 *IEEE Electron Device Lett.* **37** 496
- [53] Zhang Y, Zheng N, Cao Y, Wang F, Wang P, Ma Y, Lu B, Hou G, Fang Z, Liang Z, Yue M, Li Y, Chen Y, Fu J, Wu J, Xie T, Feng X 2019 *Sci. Adv.* **5** 1066
- [54] Liang Z, Cheng J, Zhao Q, Zhao X, Han Z, Chen Y, Ma Y, Feng X 2019 *Adv. Mater. Technol.* **4** 1900317
- [55] Viventi J, Kim D H, Vigeland L, Frechette E S, Blanco J A, Kim Y S, Avrin A E, Tiruvadi V R, Hwang S W, Vanleer A C, Wulsin D F, Davis K, Gelber C E, Palmer L, van der Spiegel J, Wu J, Xiao J, Huang Y, Contreras D, Rogers J A, Litt B 2011 *Nat. Neurosci.* **14** 1599
- [56] Aberg I, Cait Ni C, Hoyt J L 2006 *IEEE Trans. Electron Devices* **53** 1021
- [57] Mazure C, Cayrefourcq I 2005 *IEEE International SOI Conference Proceedings* Honolulu, USA, October 3–6 2005 p1
- [58] Acosta T, Sood S 2006 *IEEE Potentials* **25** 31
- [59] Ma J L 2012 *Ph. D. Dissertation* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [马建立 2012 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [60] Haeni J H, Irvin P, Chang W, Uecker R, Reiche P, Li Y L, Choudhury S, Tian W, Hawley M E, Craigo B, Tagantsev A K, Pan X Q, Streiffner S K, Chen L Q, Kirchoefer S W, Levy J, Schlom D G 2004 *Nature* **430** 758
- [61] Kim Y S, Choi J S, Kim J, Moon S J, Park B H, Yu J, Kwon J H, Kim M, Chung J S, Noh T W, Yoon J G 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 242907
- [62] Yang Y J 2013 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [杨远俊 2013 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]

- [63] Kim W J, Oh T, Song J, Ko E K, Li Y Y, Mun J, Kim B, Son J, Yang Z, Kohama Y, Kim M, Yang B J, Noh T W 2020 *Sci. Adv.* **6** 1539
- [64] Xu R J, Huang J W, Barnard E S, Hong S S, Singh P, Wong E K, Jansen T, Harbola V, Xiao J, Wang B Y, Crossley S, Lu D, Liu S, Hwang H Y 2020 *Nat. Commun.* **11** 3141
- [65] Fu D Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [傅德颐 2012 博士学位论文 (南京: 南京大学)]
- [66] Khan M A, Yang J W, Simin G, Gaska R, Shur M S, Loye H C Z, Tamulaitis G, Zukauskas A, Smith D J, Chandrasekhar D, Bicknell-Tassius R 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 1161
- [67] Schwarze M, Tress W, Beyer B, Gao F, Scholz R, Poelking C, Ortstein K, Günther A A, Kasemann D, Andrienko D, Leo K 2016 *Science* **352** 1446
- [68] Doi A, Shimano S, Inoue D, Kikitsu T, Hirai T, Hashizume D, Tokura Y, Taguchi Y 2019 *APL Mater.* **7** 091107
- [69] Wu F, Guo Z W, Wu J J, Jiang H T, Du G Q 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 154205 (in Chinese) [吴丰, 郭志伟, 吴家驹, 江海涛, 杜桂强 2020 物理学报 **69** 154205]
- [70] Kuo C P, Vong S K, Cohen R M, Stringfellow G B 1985 *J. Appl. Phys.* **57** 5428
- [71] Danan G, Etienne B, Mollot F, Planel R, Jean-Louis A M, Alexandre F, Jusserand B, Le Roux G, Marzin J Y, Savary H, Sermage B 1987 *Phys. Rev. B* **35** 6207
- [72] Li H, Tsai C, Koh A L, Cai L L, Contryman A W, Fragapane A H, Zhao J H, Han H S, Manoharan H C, Abild-Pedersen F, Nørskov J K, Zheng X L 2016 *Nat. Mater.* **15** 48
- [73] Akinwande D, Petrone N, Hone J 2014 *Nat. Commun.* **5** 5678
- [74] Li H, Contryman A W, Qian X F, Ardakani S M, Gong Y J, Wang X L, Weisse J M, Lee C H, Zhao J H, Ajayan P M, Li J, Manoharan H C, Zheng X L 2015 *Nat. Commun.* **6** 7381
- [75] Castellanos-Gomez A, Roldan R, Cappelluti E, Buscema M, Guinea F, van der Zant H S J, Steele G A 2013 *Nano Lett.* **13** 5361
- [76] Amorim B, Cortijo A, de Juan F, Grushine A G, Guinea F, Gutierrez-Rubio A, Ochoa H, Parente V, Roldan R, San-Jose P, Schiefele J, Sturla M, Vozmediano M A H 2016 *Phys. Rep.* **617** 1
- [77] Wei B, Zheng K, Ji Y, Zhang Y, Zhang Z, Han X 2012 *Nano Lett.* **12** 4595
- [78] Signorello G, Karg S, Björk M T, Gotsmann B, Riel H 2013 *Nano Lett.* **13** 917
- [79] Conley H J, Wang B, Ziegler J I, Haglund R F, Pantelides S T, Bolotin K I 2013 *Nano Lett.* **13** 3626
- [80] Lloyd D, Liu X, Christopher J W, Cantley L, Wadehra A, Kim B L, Goldberg B B, Swan A K, Bunch J S 2016 *Nano Lett.* **16** 5836
- [81] Boztug C, Sanchez-Perez J R, Cavallo F, Lagally M G, Paiella R 2014 *ACS Nano* **8** 3136
- [82] Petykiewicz J, Nam D, Sukhdeo D S, Gupta S, Buckley S, Piggott A Y, Vuckovic J, Saraswat K C 2016 *Nano Lett.* **16** 2168
- [83] Pilon F T A, Lyasota A, Niquet Y M, Reboud V, Calvo V, Pauc N, Widiez J, Bonzon C, Hartmann J M, Chelnokov A, Faist J, Sigg H 2019 *Nat. Commun.* **10** 2724
- [84] Sukhdeo D S, Nam D, Kang J H, Brongersma M L, Saraswat K C 2014 *Photonics Res.* **2** 8
- [85] Jiang J L 2019 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology)(in Chinese) [江佳霖 2019 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [86] Sánchez-Pérez J R, Boztug C, Chen F, Sudradjat F F, Paskiewicz D M, Jacobson R B, Lagally M G, Paiella R 2011 *PANS* **108** 18893
- [87] Stüss M J, Geiger R, Minamisawa R A, Schiefler G, Frigerio J, Chrastina D, Isella G, Spolenak R, Faist J, Sigg H 2013 *Nat. Photonics* **7** 466
- [88] Bao S, Kim D, Onwukaeme C, Gupta S, Saraswat K, Lee K H, Kim Y, Min D, Jung Y, Qiu H D, Wang H, Fitzgerald E A, Tan C S, Nam D 2017 *Nat. Commun.* **8** 1845
- [89] Wang Y, Chen Y, Li H, Li X, Chen H, Su H, Lin Y, Xu Y, Song G, Feng X 2016 *ACS Nano* **10** 8199
- [90] Jiang H, Khang D Y, Song J, Sun Y, Huang Y, Rogers J A 2007 *PANS* **104** 15607
- [91] Song J, Jiang H, Huang Y, Rogers J A 2009 *J. Vac. Sci. Technol. A* **27** 1107
- [92] Zhang J, Xu Y, Jiang Y, Bai L, Chen H, Li J, Wang L, Wu W, Song G 2018 *Nanoscale* **10** 12657

Review on property regulation of semiconducting materials in flexible electronics*

Wang Zhou-Heng¹⁾²⁾ Chen Ying³⁾⁴⁾ Zheng Kun-Wei¹⁾²⁾ Li Hai-Cheng¹⁾²⁾
Ma Yin-Ji¹⁾²⁾ Feng Xue¹⁾²⁾†

1) (*Ministry of Education Key Laboratory of Applied Mechanics, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Center for Flexible Electronics Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

3) (*Institute of Flexible Electronics Technology of Tsinghua University, Zhejiang, Jiaxing 314000, China*)

4) (*Qiantang Science and Technology Innovation Center, Hangzhou 310016, China*)

(Received 15 January 2021; revised manuscript received 25 February 2021)

Abstract

Flexible electronics technology plays an important role in regulating the properties of semiconducting materials, leading to the breakthrough in traditional strain engineering that is limited by the rigid and brittle inorganic materials and the fixed strain values. Thereby, the relevant research not only provides a new clue for strain regulation of semiconductor materials or other functional materials, but also lays a theoretical foundation for the performance evaluation of stretchable and flexible electronic devices based on inorganic functional materials in large-deformation environments. In this paper, the research progress of flexible inorganic electronics and strain effects on band structures, especially the property regulation of semiconducting materials in flexible electronics, is reviewed. Firstly, the nano-diamond particles based thinning process and the transfer printing are emphatically expounded with their influence on the properties of semiconducting electronics explored. In addition, the development and application of strain effect on band structure in recent years are introduced. In particular, the strain control based on buckling GaAs nanoribbon and buckling quantum well structure are studied to demonstrate the superior advantage of flexible electronics technology in the property regulation of semiconducting materials. The application and developing trend of strain engineering in the future are prospected finally.

Keywords: stretchable and flexible electronics, property regulation of semiconducting materials, strain effects on band structures, bulking

PACS: 42.82.Cr, 71.70.Fk, 71.20.-b, 77.55.dj

DOI: [10.7498/aps.70.20210095](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210095)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11625207, 11902292) and Zhejiang Province Key Research and Development Project, China (Grant Nos. 2020C05004, 2019C05002).

† Corresponding author. E-mail: fengxue@tsinghua.edu.cn