

基于双极性二维晶体的新型p-n结

张增星 李东

Novel p-n junctions based on ambipolar two-dimensional crystals

Zhang Zeng-Xing Li Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 217302 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.217302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.217302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

ZnSe 量子点敏化纳米 TiO₂ 薄膜光电子特性研究

Photoelectron characteristics of ZnSe quantum dots-sensitized mesoporous La-doped nano-TiO₂ film

物理学报.2017, 66(6): 067301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.067301>

原子层沉积法生长 ZnO 的性质与前驱体源量的关系研究

Investigation on the relationship between the properties of atomic layer deposition ZnO film and the dose of precursor

物理学报.2013, 62(14): 147306 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.147306>

光伏型碲镉汞探测器在波段内连续激光辐照下的两种不同过饱和现象的产生机理

Generation mechanism of two different over-saturation phenomena of photovoltaic HgCdTe detectors irradiated by CW band-in laser

物理学报.2013, 62(9): 097303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.097303>

Al₂O₃ 钝化及其在晶硅太阳能电池中的应用

The passivation of Al₂O₃ and its applications in the crystalline silicon solar cell

物理学报.2012, 61(18): 187303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.187303>

n-ZnO:Al/i-ZnO/n-CdS/p-Cu₂ZnSnS₄ 太阳能电池光伏特性的分析

Investigation of the photovoltaic performance of n-ZnO:Al/i-ZnO/n-CdS/p-Cu₂ZnSnS₄ solar cell

物理学报.2012, 61(18): 187304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.187304>

专题: 与硅技术融合的石墨烯类材料及其器件研究

基于双极性二维晶体的新型p-n结*

张增星† 李东

(同济大学物理科学与工程学院, 上海市特殊人工微结构材料与技术重点实验室, 上海 200092)

(2017年7月8日收到; 2017年8月9日收到修改稿)

二维晶体的特殊结构和新奇物理性能为构建新型纳米结构和器件, 实现半导体领域的突破性进展提供了可能. 本文首先介绍了双极性二维晶体的基本物理性能和相关范德瓦耳斯异质结的制备方法. 在此基础上, 主要综述了双极性二维晶体在新型电场调制二维晶体p-n结与异质p-n结以及非易失性可存储二维晶体p-n结等方面的应用、相关结构设计、电子和光电子等物理性能. 然后进一步介绍了该类新型p-n结在逻辑整流电路、场效应光电子晶体管、多模式非易失性存储器、整流存储器、光电子存储器、光伏器件等方面的潜在应用. 最后总结展望了该种新型p-n结在相关领域的可能发展方向.

关键词: 二维晶体, p-n结, 范德瓦耳斯异质结, 电性能和光电子性能

PACS: 73.40.Lq, 85.30.-z, 73.63.-b, 85.60.-q

DOI: 10.7498/aps.66.217302

1 引言

随着微电子技术的快速发展, 以硅为基础的半导体工艺面临越来越多的挑战, 因此, 探索制备新的材料和发现新的物理性能一直是凝聚态物理、材料科学、信息科学等多个学科研究的前沿领域. 近年来, 二维晶体及其新奇物理特性的不断发现为构建新型纳米结构、实现半导体器件的突破性进展提供了可能^[1]. 这些新型纳米结构表现出优异的物理特性, 有望用来发展高性能的电子与光电子器件, 或者用以弥补传统硅基半导体器件的不足, 拓展传统半导体器件的功能和应用领域.

作为最早发现的二维材料, 石墨烯是一种零带隙的半金属材料, 这将限制其在电子和光电子器件中的应用^[2]. 2011年, Kis等^[3]发现MoS₂二维晶体在室温下具有较高的载流子迁移率(可达200 cm²·V⁻¹·s⁻¹)和开关比率(~10⁸). 与石墨烯不同, 过渡金属二硫族化合物(TMDs), 如MoS₂, WS₂, MoSe₂, WSe₂等在单层时为直接带隙的半导

体材料, 在作为纳电子与光电子器件时具有明显的优势, 因而很快受到了广泛关注. 到目前为止, 除了石墨烯、TMDs外, 人们还获得了多种其他二维晶体材料, 如六方氮化硼(h-BN)^[4]、黑磷(BP)^[5,6]、硅烯^[7,8]等^[4,9-11]. 可以预见, 随着研究的不断深入, 将有更多的二维晶体及其物理特性会被发现, 为进一步设计制备纳米电子和光电子器件提供丰富的资源.

随着研究的逐步深入, 由二维晶体堆垛而成的范德瓦耳斯异质结开始受到研究人员的关注^[12-15]. 通过利用相互之间的范德瓦耳斯力相互作用, 二维晶体可以堆垛组合在一起形成原子级界面的范德瓦耳斯异质结^[16]. 通过利用二维晶体组成单元的不同性质, 可控构建具有新奇物理特性的新型人造结构. 众多的二维晶体为构建丰富多彩的范德瓦耳斯异质结提供了可能. 2010年Hone等^[17]报道了h-BN上面的石墨烯具有很高的载流子迁移率. 随后, Geim等^[18]发现封装在h-BN之间的石墨烯在室温下表现出微米尺度的弹道输运现象. 此后, Perali等^[19]发现h-BN隔开的双层石

* 上海市自然科学基金(批准号: 16ZR1439400, 17ZR1447700)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangzx@tongji.edu.cn

墨烯可在较高温度下实现超流; Wang等^[20]发现MoS₂/WS₂之间具有超快的电荷转移现象, 可望用于新型光电子器件; Withers等^[21]设计制备了二维晶体超晶格结构, 发现其可以用于发光二极管(LED)等. 这些发现极大地引起了人们对二维晶体范德瓦耳斯异质结或超晶格的研究兴趣, 一些新的物理特性也被逐渐揭示出来.

作为最基本的半导体结构之一, p-n结是半导体器件物理的基础, 被广泛用于二极管、晶体管、光电探测器、LED、光伏器件等. 二维晶体范德瓦耳斯异质结的发展为构建新型二维p-n结提供了可能. 通过耦合不同载流子类型的二维晶体, 多种异质p-n结被制备出来^[22-30]. 这些二维晶体在整流、光伏、LED、光电探测等方面表现出不错的性能. 此外, 通过栅电压的调控, 可以很容易地实现对二维晶体p-n结性能的调控. 这类研究有望拓展传统p-n结的功能和应用领域, 正在受到研究人员的广泛关注, 并有很多的相关报道. 本综述将主要针对一类由双极性(ambipolar)二维晶体组成的p-n结的物理性能和潜在应用进行讨论, 以期对相关研究

和应用提供帮助.

2 双极性(ambipolar)二维晶体

在传统的半导体材料中, 载流子主要由掺杂产生. 掺杂的引入会破坏原有半导体的晶体结构, 进而影响其物理性能. 此外, 掺杂一旦形成, 就很难再对其进行调控, 无法使其在p型和n型之间动态变化. 不同于传统的半导体材料, 某些二维晶体表现出双极性行为, 通过施加外部电场, 可以实现二维晶体载流子在p型和n型之间的动态调控. 图1(a)和图1(b)展示了双极性二维晶体在外加栅极电压下的调控示意图. 当施加一个合适的负栅极电压时, 基于电容器的工作机理, 空穴将聚集在沟道层中, 这时双极性二维晶体表现为p型(图1(a)). 随着栅极电压朝着0V方向移动, 沟道中聚集的空穴将逐渐减少. 当施加一个正栅极电压时, 电子将会逐渐聚集到沟道层中, 在合适的条件下, 双极性二维晶体将变成n型(图1(b)). 也就是说, 随着栅极

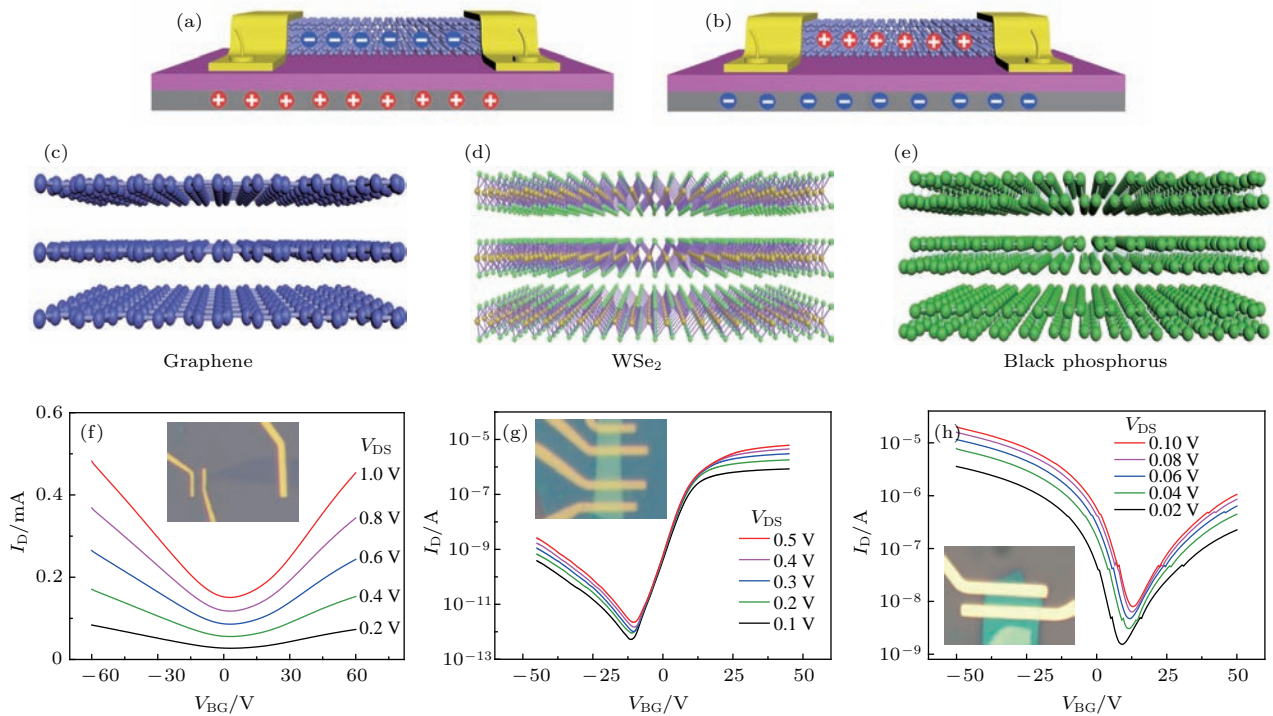


图1 双极性二维晶体, 通过施加外部电场, 双极性二维晶体可以在(a) p型和(b) n型之间变化; (c), (d), (e) 分别是双极性二维晶体石墨烯、WSe₂、黑磷的晶体结构; (f), (g), (h) 分别为对应的FET的转移特性曲线

Fig. 1. Ambipolar two-dimensional (2D) crystals. By applying the external electrical field, the ambipolar 2D crystals can be dynamically tuned between the (a) p-type and (b) n-type. Panels (c), (d) and (e) are the schematic crystal structures of the typical ambipolar 2D crystals of the few-layer graphene, WSe₂ and black phosphorus (BP). Panels (f), (g) and (h) are the transfer characteristics of the corresponding field-effect transistors (FETs).

电压从负向正扫描的过程中, 双极性二维晶体中的主要载流子将会逐渐地从空穴转变为电子. 这种显然不同于传统半导体材料的物理性能, 有望用于设计制备新的器件结构, 产生一些新的功能, 从而改善和增强传统半导体器件的功能.

石墨烯是最先发现的双极性二维晶体材料^[31], 其晶体结构如图 1(c) 所示. 图 1(d) 展示了石墨烯场效应晶体管(FET)的转移特性曲线, 可以看出明显的双极性特征. 当栅极电压从负往正的扫描过程中, 石墨烯先是表现为p型. 随着电压的扫描, 电阻逐渐增大, 说明空穴正在减少. 当到达一定的电压时, 电阻值达到最大, 这时为电中性状态. 随着栅极电压往正方向接着扫描, 电阻又开始变小, 这时表现为n型. 它的双极性性能使得其在开发新型器件方面具有独特的优势, 但由于零带隙的能带结构, 石墨烯FET的开关比很低, 这限制了其在逻辑电路中的应用. 随着二维晶体家族的不断丰富, 其他半导体性的双极性二维晶体, 如WSe₂(图 1(e), (f))、黑磷(图 1(g), (h))、WS₂、MoSe₂等也被逐渐发现^[5,6,32-34]. 这些半导体性双极性二维晶体的出现不仅弥补了石墨烯在应用中的不足, 也丰富了双极性二维晶体的种类, 拓展了双极性二维晶体的应用领域.

3 范德瓦耳斯异质结的制备

范德瓦耳斯异质结的研究具有重要意义. 在结构制备过程中, 通过组装不同性能的二维晶体, 可

以避免常规制备方法中对设备和工艺的复杂要求. 利用化学气相沉积等方法, 目前已经有不少关于范德瓦耳斯异质结生长的报道^[35-39]. 为了探讨结构的物理性能, 目前最行之有效的方法还是利用机械剥离法制备二维晶体结构单元, 然后通过逐层转移制备所需要的范德瓦耳斯异质结^[40]. 在制备过程中, 一般先把底层二维晶体利用机械剥离法直接制备在所需要的基底上, 而对于其他二维晶体, 则需要逐层精确定位到基底上. 由于利用机械剥离法所获得的二维材料尺寸较小, 这个转移制备过程通常需要显微镜的帮助. 图 2 为一个简单的转移制备设备, 一般包括一个显微镜和两个三维移动台. 在显微镜的帮助下, 利用两个三维移动台可以把样品精确定位到一起.

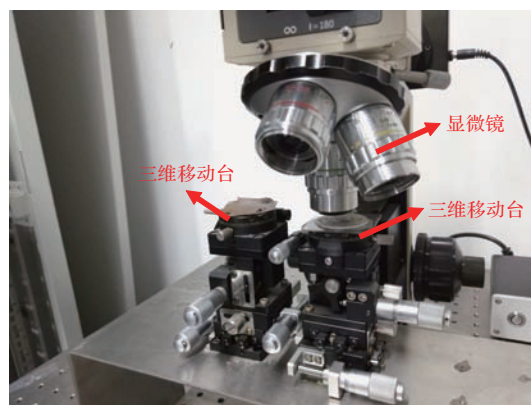


图2 干法转移制备范德瓦耳斯异质结的装备
Fig. 2. Equipment of the fabrication of van der Waals heterostructures with a dry transfer method.

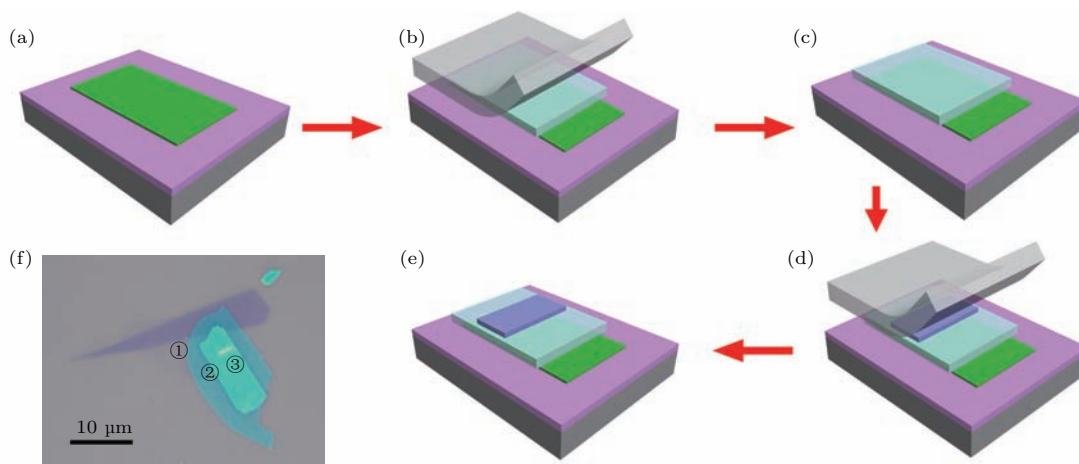


图3 范德瓦耳斯异质结干法转移制备过程示意图 (a)–(e) 转移制备过程示意图^[41]; (f) 一个范德瓦耳斯异质结的光学显微镜照片, 其包括①, ②, ③共三层

Fig. 3. Dry transfer process of the fabrication of van der Waals heterostructures: (a)–(e), Schematic process^[41]; (f) a van der Waals heterostructure including three layers indicated as ①, ② and ③.

图3是利用干法转移制备范德瓦耳斯异质结的过程示意图. 首先, 通过利用机械剥离法把底层二维晶体直接制备在所需要的基底上; 同时把所需要转移的二维晶体制备在透明基底, 如聚甲基丙烯酸甲酯, 聚二甲基硅氧烷等上. 然后把底层样品和所需要转移的样品面对面的固定在三维移动台上. 在显微镜的帮助下, 利用三维移动台把要转移的样品精确移动到所需要的位置, 然后把两个样品紧贴在一起. 当利用三维移动台把透明基底抬起时, 由于范德瓦耳斯力的存在, 所需要转移的二维晶体会脱离透明基底而被转移到底层二维材料上. 以此类推, 更多的二维材料可以被转移上去, 从而获得所需要的范德瓦耳斯异质结(图3(f)).

4 基于双极性二维晶体的新型 p-n 结

4.1 电场调制二维晶体 p-n 结

由于双极性二维晶体的载流子可以通过外部电场调制在 p 型与 n 型之间变化, 因而可以通过结构设计, 形成两个独立栅极对二维晶体的调控, 实现不同类型的载流子在同一二维晶体上的分布, 从而形成 p-n 结. 图4(a)下部插图为此结构的典型示意图 [42]. 该结构具有两个栅极, 每个栅极只对应部分双极性二维晶体沟道层. 利用这种结构, 最早实现了石墨烯 p-n 结 [43,44]. 由于石墨烯的零带隙能带结构, 所形成的石墨烯 p-n 结很难观察到典型的整流特性. 半导体双极性二维晶体的发现为构建

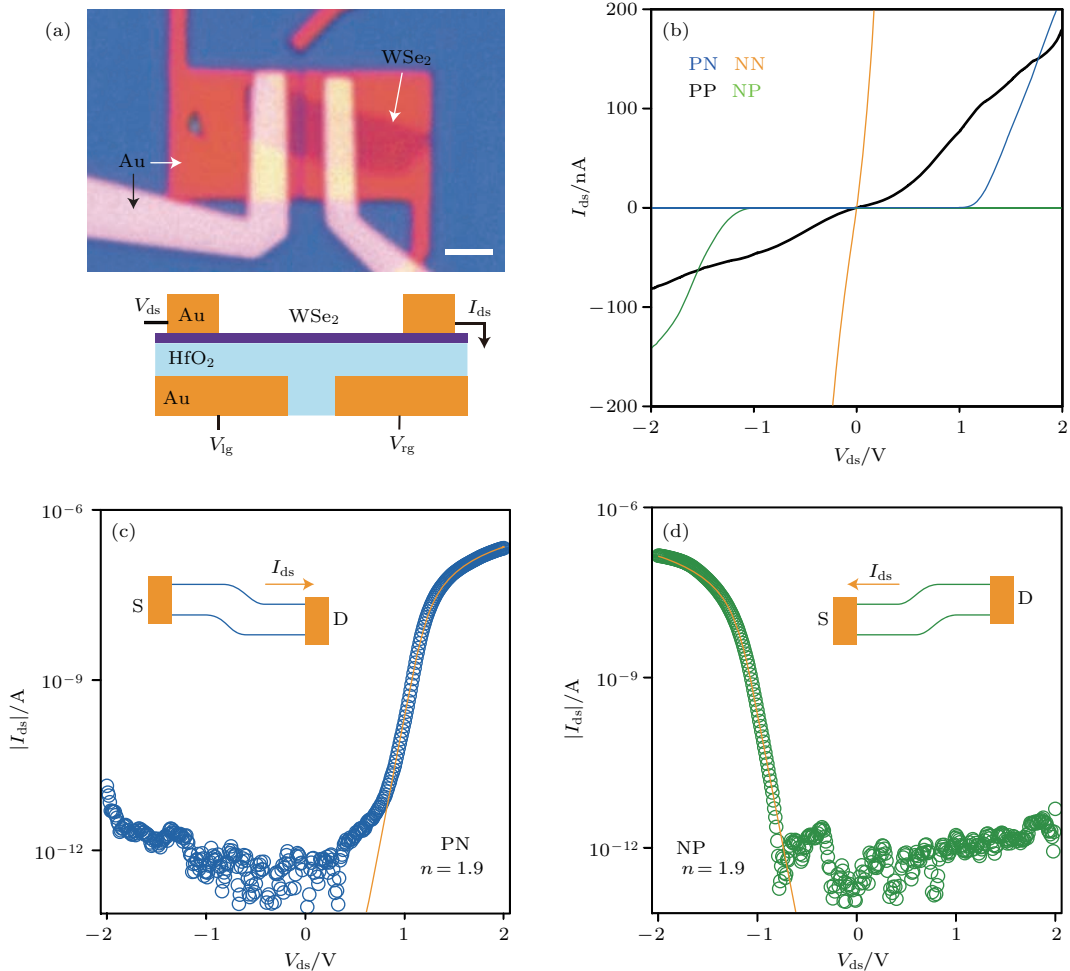


图4 电场调制二维晶体 p-n 结 (a) 上面为 WSe₂ 器件的光学显微镜图片, 下面为器件结构示意图; (b) 通过 WSe₂ 的电流-电压曲线; PN, V_{lg} = -10 V, V_{rg} = 10 V; NP, V_{lg} = 10 V, V_{rg} = -10 V; NN, V_{lg} = V_{rg} = 10 V; PP, V_{lg} = V_{rg} = -10 V; (c), (d) PN 与 NP 状态下的电流-电压曲线, 纵坐标为指数形式 [42]

Fig. 4. Electrical-field-tuned 2D p-n junction: (a) Top, optical microscopy image of the WSe₂ based device; bottom, Schematic device configuration; (b) I_{ds} - V_{ds} curves of the device at the PN, NP, NN and PP state (PN, $V_{lg} = -10$ V, $V_{rg} = 10$ V; NP, $V_{lg} = 10$ V, $V_{rg} = -10$ V; NN, $V_{lg} = V_{rg} = 10$ V; PP, $V_{lg} = V_{rg} = -10$ V); (c), (d) I_{ds} - V_{ds} curves of the device at the PN and NP state in a logarithmic scale [42].

这类p-n结提供了条件. 2014年, 三个不同的研究小组分别通过利用这种结构, 制备出单层WSe₂的p-n结^[42,45,46]. 研究表明, 通过两个独立栅极电压的调制, 可以对两个栅极上面的双极性二维晶体进行独立的载流子调控, 从而使沟道层形成p-n结、n-n结、p-p结以及n-p结等多种状态, 使其表现出不同的*I-V*特性(图4(b)). 当一个栅极调制其上的双极性二维晶体为p型时, 另一个栅极通过施加反向电压, 调制其上的双极性二维晶体为n型, 从而形成p-n结(图4(c)), 反之, 可以调控其为n-p结(图4(d))等. 随后, 据报道双极性二维晶体黑磷也表现出类似的p-n结行为^[47]. 这类p-n结具有不错的物理性能, 有望用于LED、光伏器件等多个领域^[42,45-49].

4.2 电场调制二维晶体异质p-n结(场效应异质p-n结晶体管)

从图4(a)可以看出, 利用两个独立栅极调控实现双极性二维晶体p-n结往往需要复杂的结构设计和实现途径. 诸多的双极性二维晶体为实现电场

调制异质p-n结提供了可能. 我们课题组在这方面进行了一些尝试^[50]. 图5(a)为我们设计的一种电场调制异质p-n结示意图, 图5(b)为其扫描电子显微镜照片. 该结构的沟道层为p型的黑磷和n型的WSe₂所组成的范德瓦耳斯异质结. 不同于图4(a)的结构, 这种异质p-n结只有一个栅极, 在制备工艺上将会简单一些, 对设备的要求较低. 基于组成范德瓦耳斯异质结双极性二维晶体的不同性能, 通过栅极的调控, 可以实现异质结沟道层在p-n结、p-p结、n-n结等不同结构之间的调控(图5(c)和图5(d)).

在范德瓦耳斯异质p-n结研究方面, 人们更关注的是栅极电场对p-n结性能的调制. 诸多的研究表明, 外部电场可以实现对p-n结整流和光电子性能的调控, 表明外部电场有可能用来改善二维晶体p-n结的物理性能^[23,51]. 事实上, 图4与图5的结果还表明, 通过栅极电压的调控, 可以实现沟道层在p-n结等多个状态之间的变化. 借鉴FET的特征, 这些研究结果启示我们, 这种结构可以用来发展可逻辑调控的新型二维晶体p-n结(可以定

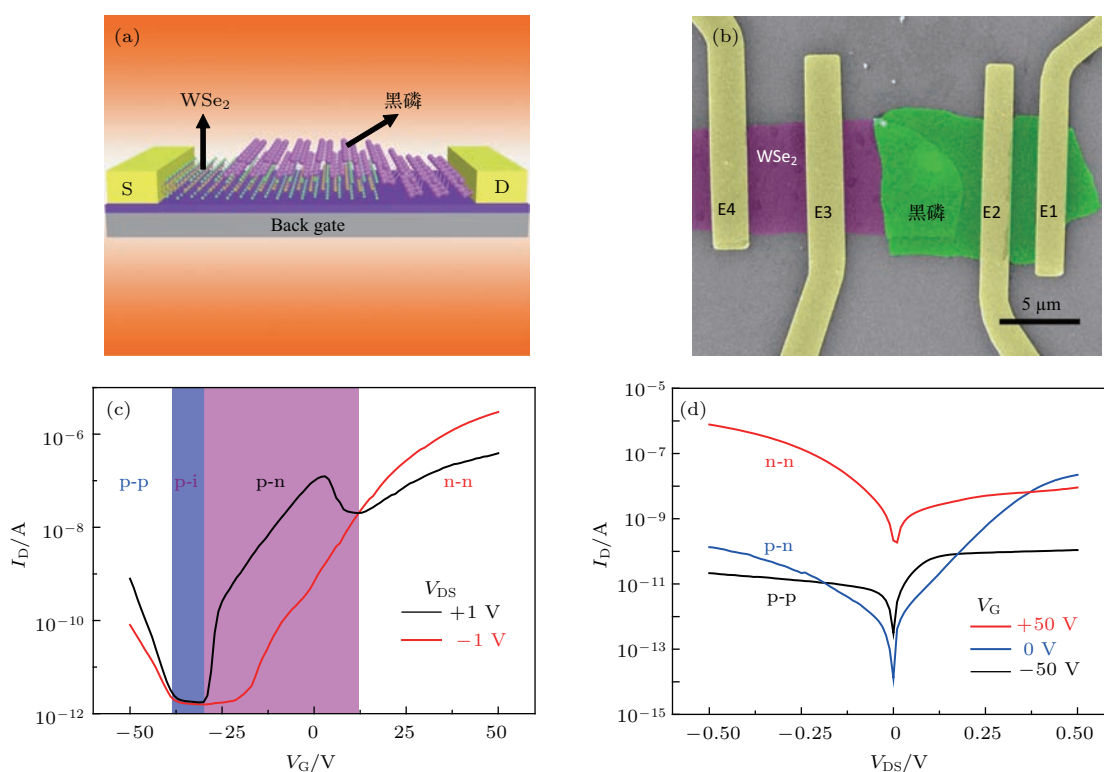


图5 电场调制二维晶体异质p-n结(场效应异质p-n结晶体管) (a)基于黑磷/WSe₂异质结的器件结构示意图; (b)黑磷/WSe₂异质结器件的扫描电子显微镜照片; (c)不同源漏电压下的转移特性曲线; (d)不同栅极电压下的*I_D-V_{DS}*曲线^[50]

Fig. 5. Electrical-field-tuned 2D heterostructured p-n junction (field-effect p-n heterojunction transistor): (a) Schematic structure of the BP/WSe₂ heterostructure based FET; (b) scanning electron microscopy (SEM) image of the BP/WSe₂ device; (c) transfer characteristics at different V_{DS} ; (d) I_D-V_{DS} curves at different gate voltages (V_G)^[50].

义为场效应 p-n 结晶体管). 我们课题组在这方面做了一些初步的探讨, 提出了逻辑调控 p-n 结的概念^[50]. 基于图 5(a) 和图 5(b) 的器件, 测量了黑磷/WSe₂ FET 的转移特性曲线(图 5(c)). 结果表明这种异质结具有不同于一般 FET 的特殊性能——它的电流依赖于施加的源漏电压 V_{DS} 的方向, 而在通常的 FET 中, 其电流和源漏电压 V_{DS} 的方向无关. 深入的研究结果表明, 由于黑磷和 WSe₂ 的双极性特征, 栅电压的调制可以分别使其在 n 型和 p 型之间调控, 在不同的栅电压区间, 形成了 p-p 结、p-n 结与 n-n 结等不同状态. 由于 p-n 结与非 p-n 结具有不同的整流特性, 从而使其电流依赖于源漏之间的电压方向. 具体而言, 在该结构中, 金属与黑磷的接触为欧姆接触, 因而与整流行为无关. 器件的整流行为主要由黑磷-WSe₂ 界面以及金属-WSe₂ 界面主导. 在 $V_G < -36$ V 时, 黑磷和 WSe₂ 都是 p 型, 这时黑磷-WSe₂ 与金属-WSe₂ 分别为 p-p 结与金属-p 肖特基结. 在这种情况下, 输运主要由金属-p 肖特基结决定, 因而, $V_{DS} = 1$ V 时的电流比 $V_{DS} = -1$ V 的大; 在 -36 与 -30 V 之间, WSe₂ 具有很大的电阻, 近似绝缘, 因而电流非常小; 在 -30 与 12 V 之间, 黑磷仍然为 p 型, 但是 WSe₂ 变成 n 型, 这时输运行为主要由 p-n 结决定, 因而 $V_{DS} = 1$ V 时的电流比 $V_{DS} = -1$ V 的大; 当门电压大于 12 V 时, 黑磷和 WSe₂ 都变成 n 型, 这时的整流行为主要由金属-n 肖特基结决定, 因而 $V_{DS} = 1$ V 时的电流比 $V_{DS} = -1$ V 的小. 这些研究结果意味着所制备的范德瓦耳斯异质结可以用于逻辑调控 p-n 结(场效应 p-n 结晶体管)——通过栅极电压的调控, 使沟道层在 p-n 结与非 p-n 结等不同的状态之间进行逻辑切换.

4.3 非易失性可存储二维晶体 p-n 结

二维晶体 p-n 结有望用于整流、LED、光伏、光电探测器等多个领域. 图 4(a) 所示的结构可以有效地获得 p-n 结, 但是相应 p-n 结状态的维持需要持续性地对两个栅极施加电压, 这显然不利于其在实际中的应用. 我们早期的研究表明, 通过浮栅场效应晶体管(FG-FET)结构, 利用双极性二维晶体可以实现高性能的双极性存储器^[41]. 受这些启发, 利用双极性二维晶体, 我们设计制备

了一种半浮栅场效应晶体管(SFG-FET)^[52]. 利用这种结构, 可以实现非易失性可存储的 p-n 结, 如图 6(a) 所示, 这种结构主要包括双极性二维晶体沟道层(WSe₂、黑磷等)、半浮栅(石墨烯等)、控制栅(Si)以及两个电介质层(SiO₂与h-BN, 也可以使用其他高介电材料). 需要指出的是, 不同于常用的 FG-FET, 这里的半浮栅仅对应部分的沟道层.

图 6(b) 和图 6(c) 为 SFG-FET 的工作机理. 当在控制栅上施加一个正的电压时, 负电荷将聚集在双极性二维晶体沟道层中, 同时形成一个半浮栅向双极性二维晶体的电场. 这个电场将使聚集的负电荷隧穿到半浮栅中. 当正的电压消失时, 由于电介质层势垒的作用, 隧穿的负电荷将存储在半浮栅中. 这些存储的负电荷将在半浮栅上面的沟道层中镜像正电荷, 使其载流子类型为 p 型, 而不在半浮栅上的双极性材料将不受影响. 由于缺陷等各种原因, 双极性二维晶体本身表现为一定的载流子类型. 如果其本身为 n 型, 基于上述过程, 这时沟道层将形成 p-n 结. 显然, 当在控制栅上施加负的电压时, 正电荷将存储在半浮栅中, 使相应的沟道层部分变成 n 型. 这时候沟道层将形成 n⁺-n 结. 我们首先利用 n 型的 WSe₂ 进行了相关研究(图 6(d))^[52], 结果表明正的脉冲电压确实使其表现为 p-n 结行为(图 6(e)), 而反向的负脉冲电压使其具有反向的整流行为(n⁺-n 结)(图 6(f)). 进一步的研究结果表明, 存储的电荷可以很好地保存在半浮栅中, 经过 10 年的时间, 仅有 15% 左右的电荷会消失掉, 表明所制备的 SFG-FET 结构可以用于非易失性可存储 p-n 结. 需要指出的是, 这种 SFG-FET 结构可能具有普适性, 我们课题组已经成功获得了双极性二维晶体黑磷与 WSe_{1.2}Te_{0.8} 的非易失性可存储 p-n 结^[52].

5 双极性二维晶体新型 p-n 结的潜在应用

作为最基本的结构之一, p-n 结被广泛用于多个领域. 基于双极性二维晶体的新型 p-n 结具有不同于传统 p-n 结的特征, 有望产生一些新的有价值的

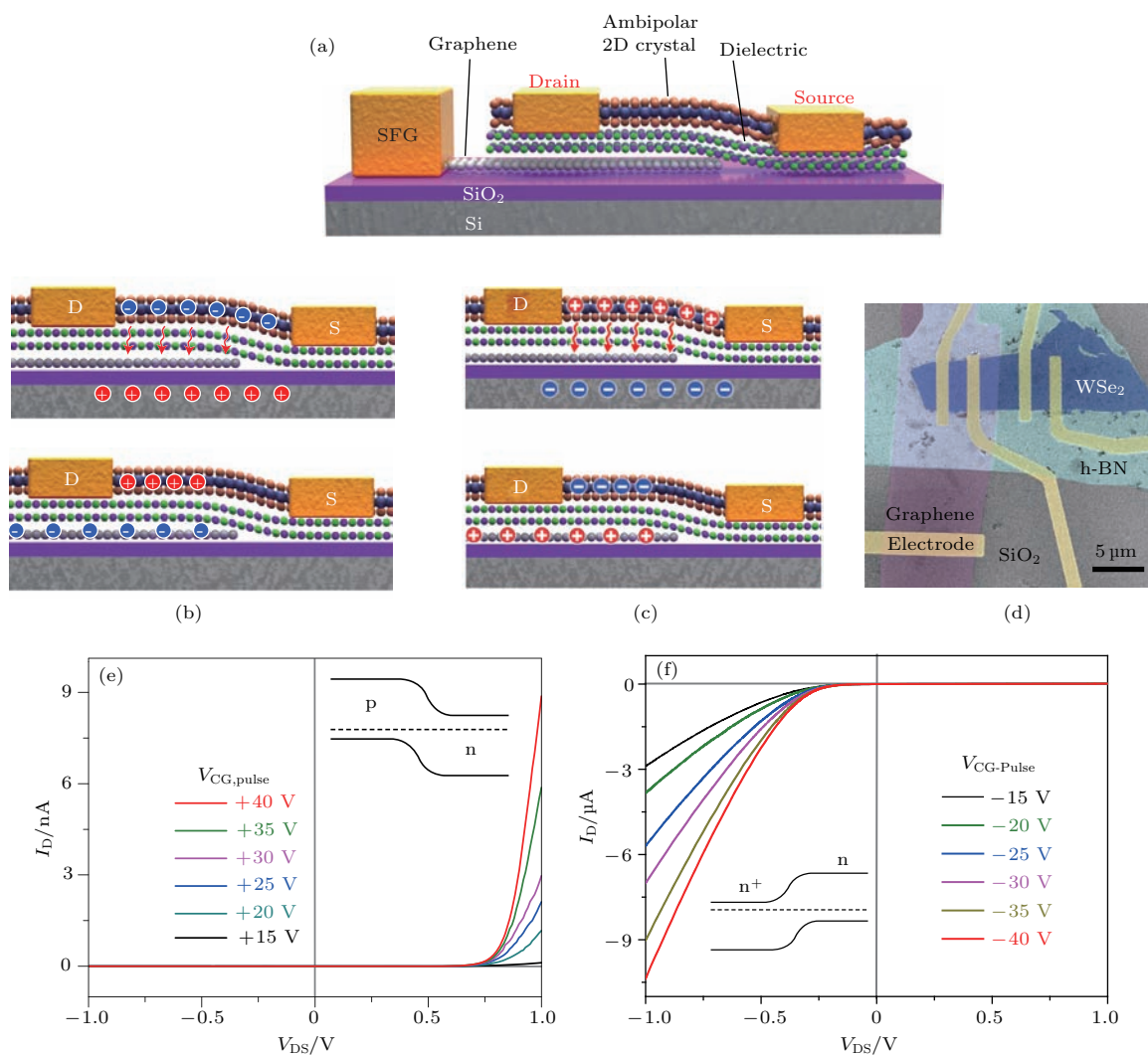


图6 非易失性可存储二维晶体 p-n 结 (a) 器件结构示意图, 该器件为一个 SFG-FET 结构; (b), (c) 为工作机理; (d) 基于 WSe₂/h-BN/石墨烯的 SFG-FET 扫描电子显微镜照片; (e) 在正的脉冲电压调制下, WSe₂ 表现为 p-n 结的整流行为; (f) 在负的脉冲电压调制下, WSe₂ 表现为 n⁺-n 结的反向整流行为 [52]

Fig. 6. Non-volatile storable 2D p-n junction: (a) Schematic device configuration, which is a semi-floating-gate field-effect transistor (SFG-FET) structure; (b) and (c) are the working mechanism; (d) SEM image of a WSe₂/h-BN/graphene based SFG-FET device; (e) WSe₂ p-n junction by positive voltage pulses; (f) WSe₂ n⁺-n junction by negative voltage pulses [52].

5.1 逻辑整流电路

p-n 结的单向导电性使得其在整流器件方面具有广泛的应用. 对于非 p-n 结 (例如 n⁺-n 结), 尽管也具有整流特征, 但是由于势垒较低, 反向电流一般较大, 不具有很好的整流特性. 无论对于逻辑调控二维晶体 p-n 结 (场效应 p-n 结晶体管), 还是对于非易失性可存储二维晶体 p-n 结, 通过在栅极 (或控制栅极) 上施加电压 (或脉冲电压), 可以实现二维晶体沟道层在 p-n 结与非 p-n 结之间的逻辑变化, 因而可以使其用于逻辑整流电路 [50]. 在 2013 年, Hersam 等 [53] 利用碳纳米管薄膜/MoS₂

异质结实现了电路的逻辑整流功能. 相较于碳纳米管薄膜, 单晶的二维晶体更有利于器件的小型化. 图 7(a) 中的插图为基于黑磷/WSe₂ 异质结 FET 的逻辑整流电路, 这里用一个 10 MΩ 的电阻串联到 BP/WSe₂ FET 上. 图 7(a) 是其在不同栅极电压下的滤波特征. 可以看出, 当栅极电压为 0 V 时, FET 工作于 p-n 结状态. 对于正向的源漏电压 (V_{DS}), 二极管等效为闭合的开关, 电流能够通过电路. 当 V_{DS} 反向时, 二极管等效为断开的开关, 阻断了电流的通过, 器件最终表现出半波整流的特性 (负向滤波); 当栅极电压变为 10 V 时, 由图 5(c) 可以看出, $V_{DS} = 1$ V 与 $V_{DS} = -1$ V 交汇在一起,

这时黑磷处于本征状态, 异质结表现为n-i结, 不具有整流行为, 正向源漏电压具有和负向源漏电压相同的电阻, 滤波作用也随之消失; 当栅极电压变为30 V时, 异质结成为n-n结, 具有与p-n结相反的整流方向, 表现出相反的滤波功能^[50]. 由图7(b)可以看出, 当持续性地施加某个栅压时, 整流电路可

以有效地保持在某个状态. 然而, 当栅极电压发生变化时, 电路可以迅速地在不同的整流状态之间变化(图7(c)). 也就是说, 通过操纵栅极电压, 可以使电路在不同整流状态之间逻辑切换, 因而它可以用在整流电路里, 并使得整流电路具有逻辑运算的功能.

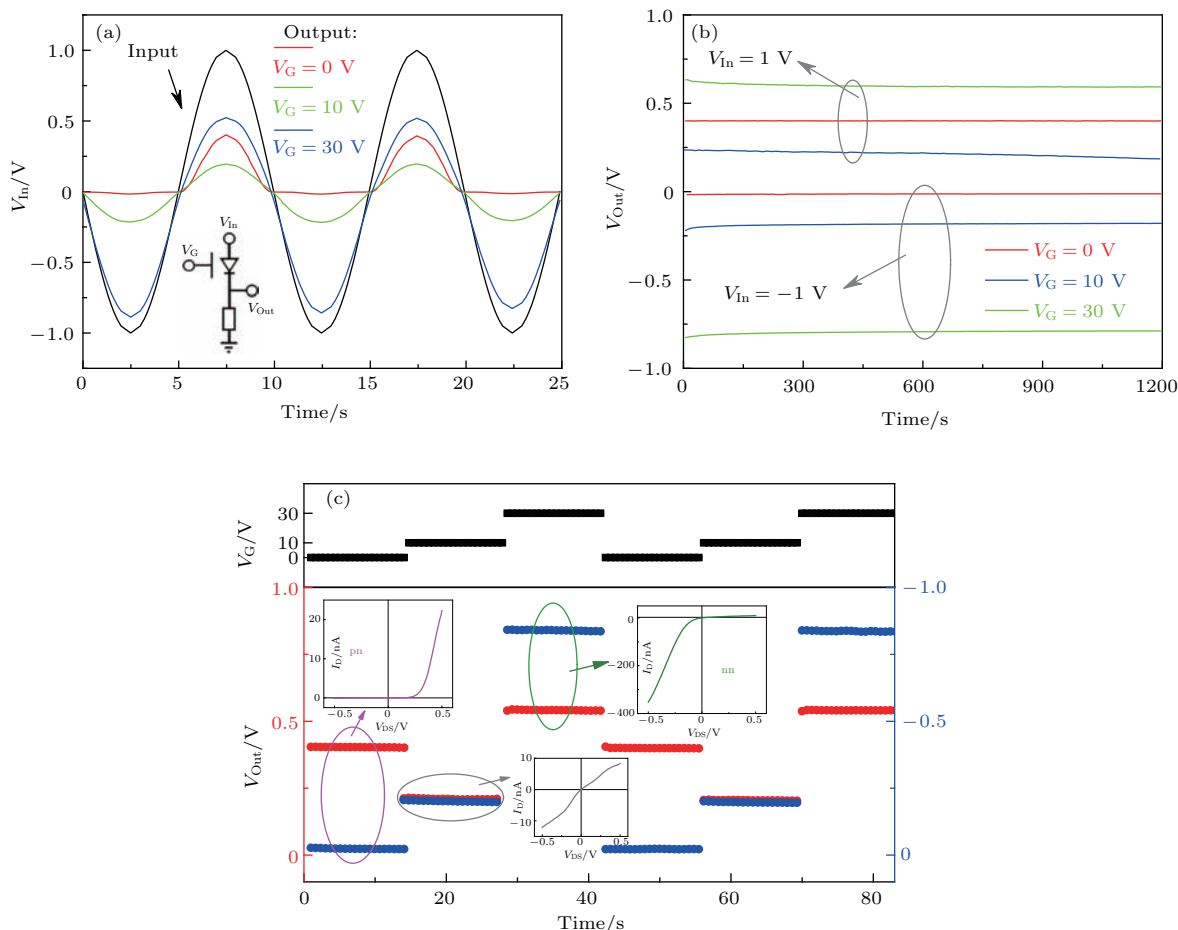


图7 逻辑整流电路 (a) 电路在不同栅压下的滤波特性, 插图为整流电路示意图, 该电路利用一个黑磷/WSe₂ FET和一个10 MΩ的电阻串联; (b) 电路在不同栅压下的保持能力; (c) 通过调控栅压, 可以使器件在不同整流状态之间切换^[50]

Fig. 7. Logic rectifier circuit: (a) Filtering characteristics of the circuit at different gate voltages (inset, schematic plan of the rectifier circuit, where a 10 MΩ resistor is connected to the BP/WSe₂ FET); (b) retention performance of the circuit at different gate voltages; (c) switching behavior of the circuit by alternating the gate voltage^[50].

5.2 场效应光电子晶体管 (field-effect optoelectronic transistor)

光是自然界传输最快的物质; 电可以用来成熟地操纵信息, 从而具有逻辑运算的本领. 如何充分借助光和电的不同性能, 发展具有快速信息处理能力的新型纳米器件, 成为一个非常有意义和值得探索的课题. p-n结是连接光与电的桥梁, 具有光电转换的本领. 由于p-n结与非p-n结具有不同的光电转换性能, 对于逻辑调控二维晶体异质p-n结

(场效应p-n结晶体管), 通过操纵栅极电压可以实现器件在不同工作状态之间的切换, 进而实现在不同光电转换状态之间的逻辑变化^[50]. 类比于FET用电来操纵电信号, 可以定义这种器件为场效应光电子晶体管, 它可以用电来操纵光电转换状态的信号. 图8(a)为场效应光电子晶体管器件的示意图, 这里器件工作在光伏状态. 在这种器件里, 光一直辐照在器件沟道层上, 类似于FET里的源漏电压V_{DS}; 光伏开路电压V_{OC}类似于FET中的输

出电流. 通过栅极电压的调控, 实现器件输出 V_{OC} 在夹断 (非 p-n 结, 光伏几乎可以忽略不计) 和开启 (p-n 结) 之间变化. 类似于 FET, 我们也可以定义场效应光电子晶体管的转移特性曲线. 图 8 (b) 展示了黑磷/WS₂ 异质结场效应光电子 (光伏) 晶体管的转移特性曲线, 可以看出, 在一定强度的持续光照下, 栅极电压可以实现对输出 V_{OC} 的调制. 随着栅极电压的改变, V_{OC} 可以在开启和夹断之间变换, 具有类似于 FET 的性能 (输出电流在开启和夹断之间变化). 对于恒定的栅极电压, V_{OC} 可以固定在一定的状态 (开启或夹断, 图 8 (c)). 当栅极电压

为 -10 V 时 (p-n 结), 器件 V_{OC} 很大, 对外表现出很强的光电转换性能; 当栅极电压为 $+30$ V 时 (n-n 结), 器件 V_{OC} 很小, 其光电转换性能很弱. 而当栅极电压改变时, 可以很快地实现 V_{OC} 在开启和夹断状态之间的切换 (图 8 (d)). 这种新型器件可以用于光电子电路里, 使其具有逻辑运算的功能: 在栅极电压的操纵下, 实现电路的光电转换状态从“开”到“关”或者从“关”到“开”的快速切换. 需要指出的是, 非易失性可存储二维晶体 p-n 结也具有类似的逻辑能力, 只是需要利用控制栅脉冲电压代替这里的栅电压.

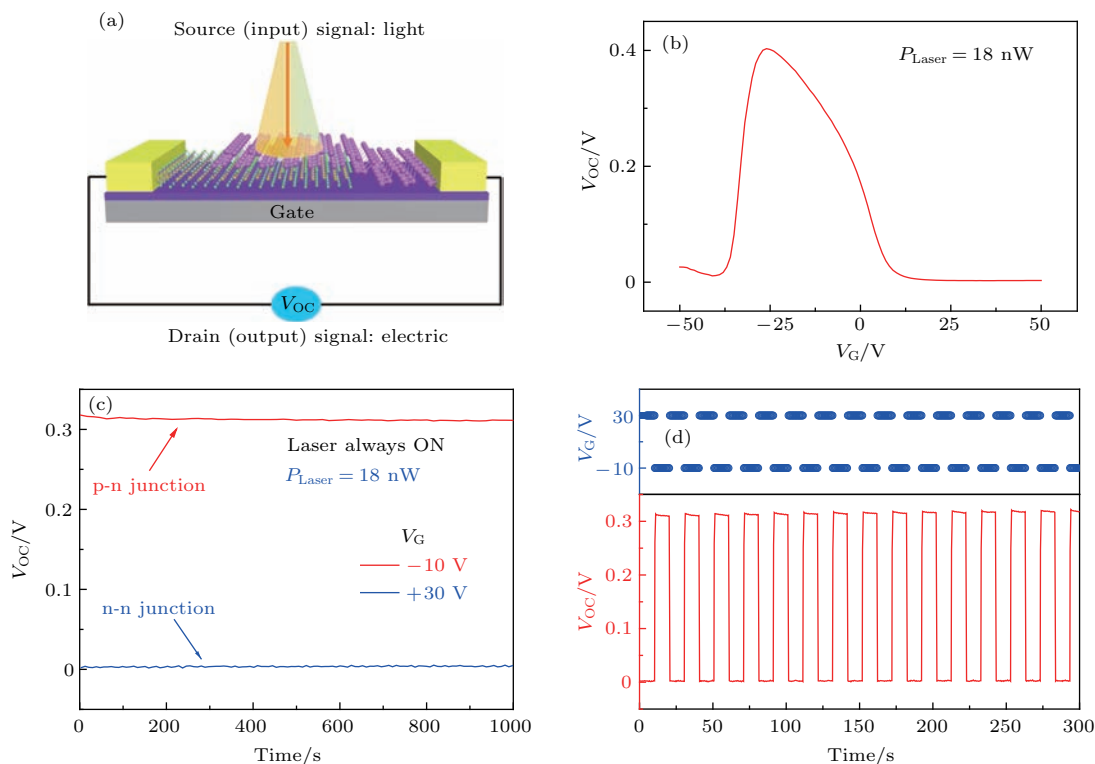


图 8 场效应光电子晶体管 (a) 场效应光电子 (光伏) 晶体管示意图, 这里光一直照射在器件沟道上, 通过栅极电压的调控, 实现沟道层的光电转换状态的调制; (b) 光电转换状态 (开路电压 V_{OC})-栅压 (V_G) 曲线; (c) 器件在不同栅压下的保持能力; (d) 通过调控栅压, 可以实现器件在不同光电转换状态 (V_{OC}) 之间的切换 [50]

Fig. 8. Field-effect optoelectronic transistor: (a) Schematic of the field-effect optoelectronic (photovoltaic) transistor (here the light illuminates the channel, and the optoelectronic conversion state is tuned by the gate voltage); (b) V_{OC} - V_G curve (V_{OC} is the open-circuit voltage); (c) retention performance of the device at different gate voltages; (d) switching behavior of the device by alternating the gate voltage [50].

5.3 多模式非易失性存储器

存储器是信息处理设备中不可或缺的部分, 用于信息的存储和读取. FG-FET 是一种重要的非易失性存储器件. 在 FG-FET 存储器中, 通过调制存储在浮栅中的电荷, 控制沟道层的电阻, 从而使其具有信息存储和处理能力. 二维晶体优异的物理性能, 引起了人们对其在 FG-FET 非易失性存

储器中的应用研究, 这些二维晶体可以代替传统器件中的浮栅或者沟道层, 表现出不错的物理性能 [54-56]. 2015 年, 我们课题组通过利用黑磷作为沟道层, 制备出高性能的双极性存储器, 这种不同于传统存储器的双极性存储器, 有望用于沟道电荷类型可调的新型存储器或者逆变逻辑电路中 [41]. 基于 SFG-FET 结构的 p-n 结具有非易失性可存储

功能,因而可以用于非易失性存储器.图9是基于WSe₂/h-BN/graphene结构的SFG-FET存储器的性能展示.由图9(a)可以看出,不同于传统的浮栅存储器,由于这种器件的沟道层存储在不同的整流状态,因而依赖于源漏电压V_{DS}的方向.当施加不同方向的源漏电压时,其表现出不同的存储窗口,且具有不同的擦写比.因而在设计存储电路时,可以根据需要采用不同的存储模式,使其具有多模式存储器的功能,这将使电路设计时具有更多的选择性.图9(b)是不同的存储状态随时间的演化曲线.可以看出,经过1000 s以上,存储状态几乎没有什

么变化,表明器件具有很好的存储能力.事实上,测试结果表明,经过10年的时间,大约15%左右的存储电荷会消失掉[52].图9(c)与图9(d)为存储器在不同的存储状态之间的变化.可以看出,当施加不同的脉冲电压时,器件可以很快地在不同的存储状态之间进行切换,具有可编程特点.这些结果表明,基于双极性二维晶体的SFG-FET可以很好地用于非易失性存储器,且具有不同于传统浮栅存储器的特殊性能.这些特点将有可能丰富未来电路的功能,拓展其应用领域.

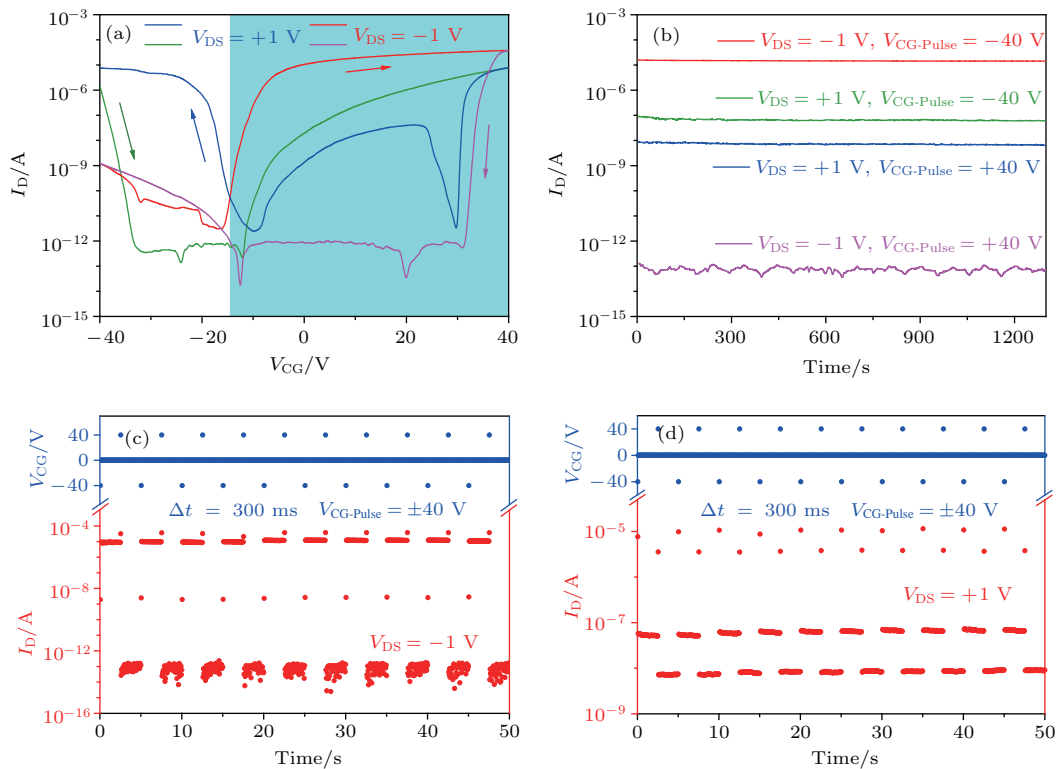


图9 基于WSe₂/h-BN/graphene SFG-FET的多模式非易失性存储器 (a)不同V_{DS}下的I_D-V_{CG}曲线; (b)不同存储状态下的保持能力; (c), (d) 加在控制栅上的脉冲电压可以使其在不同状态之间进行切换[52]

Fig. 9. Multiple mode non-volatile memory based on WSe₂/h-BN/graphene SFG-FET: (a) I_D - V_{CG} curves at different V_{DS} ; (b) retention performance of the memory; (c) and (d) switching behaviors between different state by alternating the control gate voltage pulse [52].

5.4 整流存储器

在黑磷/WSe₂ FET里,通过栅压调控来实现其逻辑整流功能.同样,非易失性可存储p-n结也可以用来发展逻辑整流器件[52].图10(a)的内插图所示设计的电路,其中一个1 GΩ的电阻用来连接SFG-FET.由图10(a)可以看出,在不同的控制栅脉冲电压下,电路展示了不同整流状态下的滤波

功能.与黑磷/WSe₂ FET不同,这一类器件整流状态的维系依赖于半浮栅中所存储的电荷.也就是说,器件在不同整流状态之间的切换是通过在控制栅上施加相应的脉冲电压完成的(图10(b)).由于半浮栅的存储功能,这类器件可以作为整流存储器使用[52].通过调控半浮栅中的存储电荷,来实现整流状态的存储、擦除与信息读取.

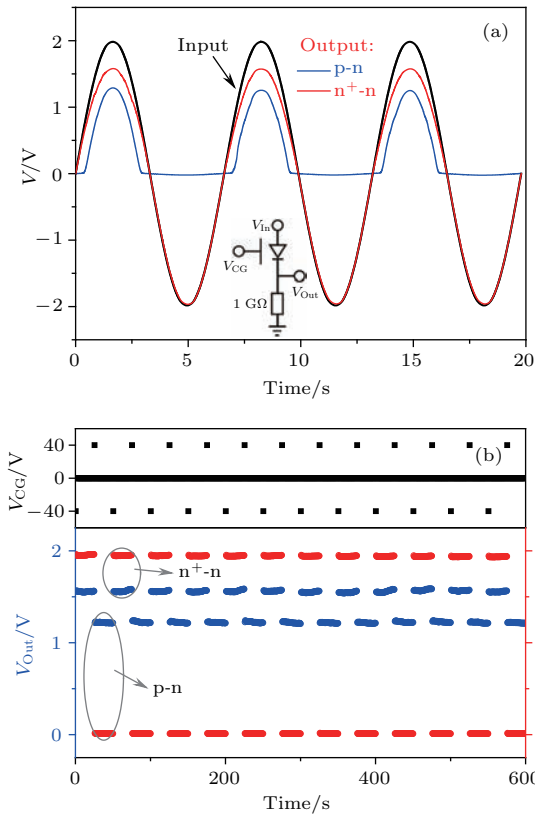


图10 整流存储器 (a) $WSe_2/h-BN/graphene$ SFG-FET在不同存储状态下的滤波特性, 插图为整流存储电路示意图, 该电路利用一个 $WSe_2/h-BN/graphene$ SFG-FET 和一个 $1\text{ G}\Omega$ 的电阻串联; (b) 通过调制控制栅脉冲电压, 可以使器件在不同整流存储状态之间切换 [52]

Fig. 10. Rectifier memory: (a) Filtering characteristics of the $WSe_2/h-BN/graphene$ SFG-FET at different storable states (inset is schematic plan of the rectifier memory circuit, where a $1\text{ G}\Omega$ resistor is connected to the SFG-FET); (b) switching behavior of the circuit by alternating the control gate voltage pulse [52].

5.5 光电子存储器

同样, 黑磷/ WSe_2 FET中栅极电压控制光电转换状态的行为也可以拓展到非易失性可存储二维晶体 p-n 结中. 通过操纵控制栅的脉冲电压使器件工作于不同的光电转换状态, 从而使其具有场效应光电子晶体管的功能. 由于半浮栅的存在, 器件具有存储功能, 因而可以进一步发展其为光电子存储器 [52]. 图 11 (a) 为光电子存储器的结构示意图 (可以称之为半浮栅场效应光电子晶体管). 图 11 (b) 与图 11 (c) 为其相关性能. 可以看出, 通过操纵控制栅脉冲电压, 可以实现器件不同光电转换状态的存储和切换, 使其具有可编程非易失性存储功能. 这类器件有望用于光电子电路中, 使其具有光电子信息的存储、擦写和读取功能.

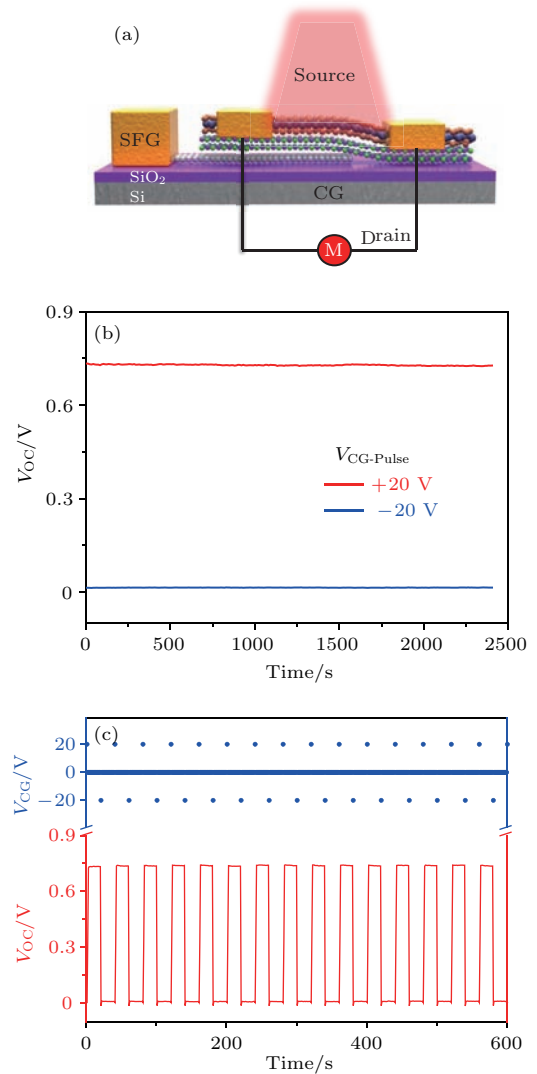


图11 光电子存储器 (a) 基于双极性二维晶体 SFG-FET 的光电子 (光伏) 存储器示意图; (b) $WSe_2/h-BN/graphene$ SFG-FET 光电子存储器光电转换状态在不同控制栅脉冲电压下的保持能力; (c) 通过施加不同的控制栅脉冲电压, 可以使器件在不同的光电转换状态快速切换 [52]

Fig. 11. Optoelectronic memory: (a) Schematic plan of the optoelectronic (photovoltaic) memory based on the ambipolar 2D crystal SFG-FET; (b) retention performance of the $WSe_2/h-BN/graphene$ SFG-FET optoelectronic memory at different control gate voltage pulse; (c) switching behavior between the different optoelectronic conversion states by alternating the control gate voltage pulse [52].

5.6 光伏器件

由于 p-n 结内建电场的存在, 可以分离开光照产生的光生载流子, 从而用于光伏器件. 在控制栅脉冲电压作用下, SFG-FET 器件可以存储 p-n 结状态, 因而可以用于光伏器件. 图 12 为基于 $WSe_2/h-BN/graphene$ SFG-FET 的光伏测试结果 [52]. 研究结果表明, 该器件的开路电压可以达到 0.6 V , 转化

效率可达4.1%。事实上,图4所示的p-n结也可以用于光伏器件,但是光电转换状态的维持需要持续性的施加栅极电压。由于半浮栅的引入,SFG-FET结构不需要栅极电压的维持,只需要一次性地施加一个脉冲电压,显然更有利于其在光伏器件中的使用。此外,在传统的半导体p-n结中,电荷的产生通常需要元素掺杂。掺杂元素的引入会破坏半导体晶体结构,从而影响其物理性能。SFG-FET通过脉冲电压的调制,对双极性二维晶体实行电荷掺杂,从而使其形成p-n结。这种掺杂不会改变半导体的晶体结构,因而有可能表现出更好的物理性能。

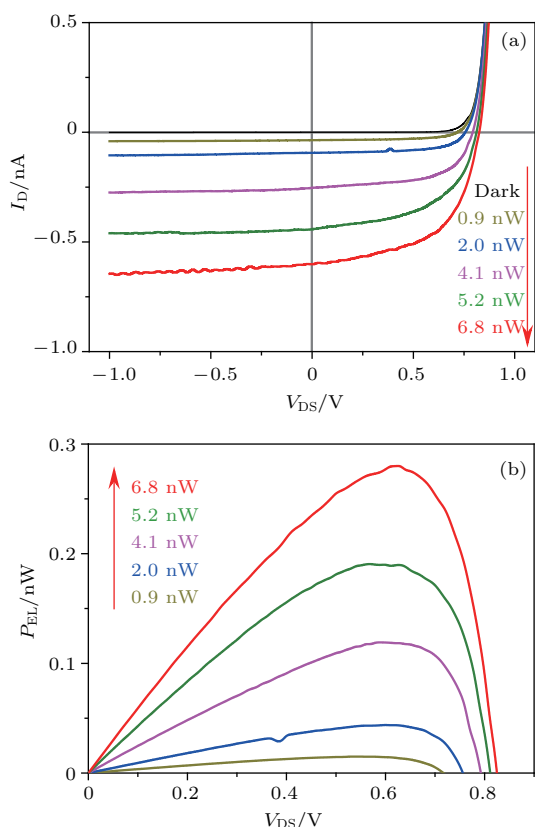


图12 光伏器件 (a), (b) 基于 $\text{WSe}_2/\text{h-BN}/\text{graphene}$ SFG-FET 器件的光伏性能^[52]

Fig. 12. Photovoltaic properties of the $\text{WSe}_2/\text{h-BN}/\text{graphene}$ SFG-FET^[52].

6 结论与展望

本文首先介绍了双极性二维晶体的基本物理性能以及范德瓦耳斯异质结的制备方法。通过充分利用二维晶体组成单元的物理性能,范德瓦耳斯异质结不仅可以用来构建具有新奇物理特性的新型人工材料,还可以避免通常结构和器件制备过程中所需要的复杂工艺和昂贵设备,是一种便捷的构建

新型纳米结构和器件的有效方法。双极性二维晶体不同于传统半导体材料的特殊物理性能,为构建新型半导体p-n结提供了可能。在此基础上,本文主要介绍了双极性二维晶体在电场调制二维晶体p-n结与异质p-n结(场效应p-n结晶体管),非易失性可存储二维晶体p-n结等方面的应用、相关结构设计和主要性能特点。p-n结是连接光和电的桥梁,是半导体最基本的结构之一。基于双极性二维晶体的新型p-n结为丰富传统p-n结的功能,拓展其应用领域提供了可能。在此基础上,进一步介绍了双极性二维晶体新型p-n结在逻辑整流电路、场效应光电子晶体管、多模式非易失性存储器、整流存储器、光电子存储器、光伏器件等方面的潜在应用。

基于双极性二维晶体的新型p-n结是随着二维晶体及范德瓦耳斯异质结深入研究发展出来的一个新的方向,相关器件物理性能,如响应速度等还需要进一步深入研究。目前来看,在一定时期内,硅工艺仍将是半导体工业的主力。双极性二维晶体不同于传统半导体的特殊物理性能有可能用以弥补传统半导体器件的不足,拓展传统半导体器件的功能和应用领域,为半导体领域的突破性进展提供了可能,因而具有很好的研究和发展前景。通过对其结构、电子和光电子性能的深入研究,揭示相关结构对其物理性能的影响规律,然后进一步设计制备相关结构和器件,改善和提高相关物理性能,是近来急需解决的一个重要问题。随着研究的逐步开展,在相关电子和光电子电路的应用也是一个迫切解决的问题,相关反馈可以为更好地设计制备双极性二维晶体p-n结,改善和提高其物理性能提供方向。相关结构和器件的最终应用需要大规模高质量材料的制备,相信随着制备技术的逐步发展,大规模制备范德瓦耳斯异质结的工艺会得到突破。此外,SFG-FET的设计为载流子调控提供了一个新的思路,这种不需要元素掺杂对半导体载流子进行调控的方法不会破坏半导体的结构和物理性能,有可能会对相关研究提供帮助。

参考文献

- [1] Ferrari A C, Bonaccorso F, Fal'ko V, Novoselov K S, Roche S, Boggild P, *et al.* 2015 *Nanoscale* **7** 4598
- [2] Castro Neto A H, Guinea F, Peres N M R, Novoselov K S, Geim A K 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 109
- [3] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, Giacometti V, Kis A 2011 *Nat. Nano.* **6** 147

- [4] Novoselov K S, Jiang D, Schedin F, Booth T J, Khotkevich V V, Morozov S V, Geim A K 2005 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **102** 10451
- [5] Liu H, Neal A T, Zhu Z, Luo Z, Xu X F, Tomanek D, Ye P D D 2014 *ACS Nano* **8** 4033
- [6] Li L, Yu Y, Ye G J, Ge Q, Ou X, Wu H, Feng D, Chen X H, Zhang Y 2014 *Nat. Nano.* **9** 372
- [7] Feng B, Ding Z, Meng S, Yao Y, He X, Cheng P, Chen L, Wu K 2012 *Nano Lett.* **12** 3507
- [8] Tao L, Cinquanta E, Chiappe D, Grazianetti C, Fanciulli M, Dubey M, Molle A, Akinwande D 2015 *Nat. Nano.* **10** 227
- [9] Lü R, Robinson J A, Schaak R E, Sun D, Sun Y, Mallouk T E, Terrones M 2015 *Acc. Chem. Res.* **48** 56
- [10] Xu M, Liang T, Shi M, Chen H 2013 *Chem. Rev.* **113** 3766
- [11] Mas-Balleste R, Gomez-Navarro C, Gomez-Herrero J, Zamora F 2011 *Nanoscale* **3** 20
- [12] Geim A K, Grigorieva I V 2013 *Nature* **499** 419
- [13] Liu Y, Weiss N O, Duan X D, Cheng H C, Huang Y, Duan X F 2016 *Nat. Rev. Mater.* **1** 16042
- [14] Novoselov K S, Mishchenko A, Carvalho A, Castro Neto A H 2016 *Science* **353** 461
- [15] Jariwala D, Marks T J, Hersam M C 2017 *Nat. Mater.* **16** 170
- [16] Haigh S J, Gholinia A, Jalil R, Romani S, Britnell L, Elias D C, Novoselov K S, Ponomarenko L A, Geim A K, Gorbachev R 2012 *Nat. Mater.* **11** 764
- [17] Dean C R, Young A F, Meric I, Lee C, Wang L, Sorgenfrei S, Watanabe K, Taniguchi T, Kim P, Shepard K L, Hone J 2010 *Nat. Nano.* **5** 722
- [18] Mayorov A S, Gorbachev R V, Morozov S V, Britnell L, Jalil R, Ponomarenko L A, Blake P, Novoselov K S, Watanabe K, Taniguchi T, Geim A K 2011 *Nano Lett.* **11** 2396
- [19] Perali A, Neilson D, Hamilton A R 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 146803
- [20] Hong X, Kim J, Shi S F, Zhang Y, Jin C, Sun Y, Tongay S, Wu J, Zhang Y, Wang F 2014 *Nat. Nano.* **9** 682
- [21] Withers F, Del Pozo-Zamudio O, Mishchenko A, Rooney A P, Gholinia A, Watanabe K, Taniguchi T, Haigh S J, Geim A K, Tartakovskii A I, Novoselov K S 2015 *Nat. Mater.* **14** 301
- [22] Deng Y X, Luo Z, Conrad N J, Liu H, Gong Y J, Najmaei S, Ajayan P M, Lou J, Xu X F, Ye P D 2014 *ACS Nano* **8** 8292
- [23] Wang F, Wang Z, Xu K, Wang F, Wang Q, Huang Y, Yin L, He J 2015 *Nano Lett.* **15** 7558
- [24] Lee C H, Lee G H, van der Zande A M, Chen W, Li Y, Han M, *et al.* 2014 *Nat. Nano.* **9** 676
- [25] Zhang K A, Zhang T N, Cheng G H, Li T X, Wang S X, Wei W, *et al.* 2016 *ACS Nano* **10** 3852
- [26] Cheng R, Li D, Zhou H, Wang C, Yin A, Jiang S, Liu Y, Chen Y, Huang Y, Duan X 2014 *Nano Lett.* **14** 5590
- [27] Hill H M, Rigosi A F, Rim K T, Flynn G W, Heinz T F 2016 *Nano Lett.* **16** 4831
- [28] Kośmider K, Fernández-Rossier J 2013 *Phys. Rev. B* **87** 075451
- [29] Wang X, Huang L, Peng Y, Huo N, Wu K, Xia C, Wei Z, Tongay S, Li J 2016 *Nano Res.* **9** 507
- [30] Huo N, Kang J, Wei Z, Li S S, Li J, Wei S H 2014 *Adv. Func. Mater.* **24** 7025
- [31] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [32] Chuang H J, Tan X B, Ghimire N J, Perera M M, Chamlagain B, Cheng M M C, Yan J Q, Mandrus D, Tomanek D, Zhou Z X 2014 *Nano Lett.* **14** 3594
- [33] Hwang W S, Remskar M, Yan R, Protasenko V, Tahy K, Chae S D, Zhao P, Konar A, Xing H, Seabaugh A, Jena D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 013107
- [34] Pradhan N R, Rhodes D, Xin Y, Memaran S, Bhaskaran L, Siddiq M, Hill S, Ajayan P M, Balicas L 2014 *ACS Nano* **8** 7923
- [35] Gong Y, Lin J, Wang X, Shi G, Lei S, Lin Z, *et al.* 2014 *Nat. Mater.* **13** 1135
- [36] Huang C, Wu S, Sanchez A M, Peters J J P, Beanland R, Ross J S, Rivera P, Yao W, Cobden D H, Xu X 2014 *Nat. Mater.* **13** 1096
- [37] Yang W, Chen G, Shi Z, Liu C C, Zhang L, Xie G, *et al.* 2013 *Nat. Mater.* **12** 792
- [38] Addou R, Dahal A, Batzill M 2013 *Nat. Nano.* **8** 41
- [39] Zhang C, Zhao S, Jin C, Koh A L, Zhou Y, Xu W, Li Q, Xiong Q, Peng H, Liu Z 2015 *Nat. Commun.* **6** 6519
- [40] Castellanos-Gomez A, Buscema M, Molenaar R, Singh V, Janssen L, van der Zant H S J, Steele G A 2014 *2D Mater.* **1** 011002
- [41] Li D, Wang X, Zhang Q, Zou L, Xu X, Zhang Z 2015 *Adv. Func. Mater.* **25** 7360
- [42] Baugher B W H, Churchill H O H, Yang Y, Jarillo-Herrero P 2014 *Nat. Nano.* **9** 262
- [43] Williams J R, DiCarlo L, Marcus C M 2007 *Science* **317** 638
- [44] Lemme M C, Koppens F H L, Falk A L, Rudner M S, Park H, Levitov L S, Marcus C M 2011 *Nano Lett.* **11** 4134
- [45] Pospischil A, Furchi M M, Mueller T 2014 *Nat. Nano.* **9** 257
- [46] Ross J S, Klement P, Jones A M, Ghimire N J, Yan J, Mandrus D G, *et al.* 2014 *Nat. Nano.* **9** 268
- [47] Buscema M, Groenendijk D J, Steele G A, van der Zant H S J, Castellanos-Gomez A 2014 *Nat. Commun.* **5** 4651
- [48] Zhang Y J, Oka T, Suzuki R, Ye J T, Iwasa Y 2014 *Science* **344** 725
- [49] Groenendijk D J, Buscema M, Steele G A, de Vasconcelos S M, Bratschitsch R, van der Zant H S J, Castellanos-Gomez A 2014 *Nano Lett.* **14** 5846
- [50] Li D, Wang B, Chen M, Zhou J, Zhang Z 2017 *Small* **13** 1603726
- [51] Chen P, Zhang T T, Zhang J, Xiang J, Yu H, Wu S, Lu X, Wang G, Wen F, Liu Z, Yang R, Shi D, Zhang G 2016 *Nanoscale* **8** 3254
- [52] Li D, Chen M, Sun Z, Yu P, Liu Z, Ajayan P M, Zhang Z 2017 *Nat. Nano.* **12** 901

- [53] Jariwala D, Sangwan V K, Wu C C, Prabhumirashi P L, Geier M L, Marks T J, Lauhon L J, Hersam M C 2013 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110** 18076
- [54] Zhang E Z, Wang W Y, Zhang C, Jin Y B, Zhu G D, Sun Q Q, Zhang D W, Zhou P, Xiu F X 2015 *ACS Nano* **9** 612
- [55] Myung S, Park J, Lee H, Kim K S, Hong S 2010 *Adv. Mater.* **22** 2045
- [56] Bertolazzi S, Krasnozhan D, Kis A 2013 *ACS Nano* **7** 3246

SPECIAL TOPIC — Hybrid silicon/graphene and related materials and devices

Novel p-n junctions based on ambipolar two-dimensional crystals*

Zhang Zeng-Xing[†] Li Dong

(Shanghai Key Laboratory of Special Artificial Microstructure Materials and Technology, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(Received 8 July 2017; revised manuscript received 9 August 2017)

Abstract

Two-dimensional (2D) materials have a unique crystal structure and excellent properties, which renders it possible to be used to construct novel artificial nanostructures and design novel nanodevices, thereby achieving a breakthrough in the semiconductor field. In this review paper, the basic behaviors of the ambipolar 2D crystals and the fabrication method of the van der Waals heterostructures are first introduced. We mainly summarize the applications of the ambipolar 2D crystals for novel electrical-field-tunable 2D p-n junctions and p-n heterojunctions (field-effect p-n heterojunction transistor) and non-volatile storable p-n junctions, and other aspects of the relevant structural design, electronic and optoelectronic properties. Then we further introduce their potential applications of logic rectifiers, field-effect optoelectronic transistors, multi-mode non-volatile memories, rectifier memories, optoelectronic memories, photovoltaics, etc. Finally, we provide an outlook of the future possible studies of this new type of p-n junctions in the relevant fields.

Keywords: two-dimensional crystals, p-n junction, van der Waals heterostructure, electronic and optoelectronic property

PACS: 73.40.Lq, 85.30.-z, 73.63.-b, 85.60.-q

DOI: 10.7498/aps.66.217302

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant Nos. 16ZR1439400, 17ZR1447700).

† Corresponding author. E-mail: zhangzx@tongji.edu.cn