

新型范德瓦耳斯单极势垒红外探测器

陈允枫¹ 周鹏^{2,†} 胡伟达^{1,††}

(1 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 上海 200083)

(2 复旦大学 专用集成电路与系统国家重点实验室 上海 200433)

2021-06-15 收到

† email: pengzhou@fudan.edu.cn

†† email: wdhu@mail.sitp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20210706

红外光电探测器由于在制导、反导、夜视、侦查等军事领域的重要性和敏感性，是现代科技追逐的制高点之一，也是科学技术壁垒极高的一个研究领域。其中，暗电流的抑制是长期以来制约红外探测器实现高工作温度(high operating temperature, HOT)的核心瓶颈问题。自1935年贝尔实验室制造出第一个硅基pn结以来，利用耗尽区内建电场阻挡多子扩散已经成为降低探测器暗电流的主流手段。然而在传统pn结红外探测器中，耗尽区过高的Shockley-Read-Hall(SRH)复合和表面复合严重限制了其暗电流抑制的理论极限。因此，红外领域的学者们一直致力于寻求和设计

一种超越pn结的新型器件结构——单极势垒结构。目前，传统的单极势垒红外探测器受材料生长、能带匹配以及晶格匹配等问题的制约，极大地限制了室温高性能红外探测器的发展。

针对上述问题，中国科学院上海技术物理研究所胡伟达研究员和复旦大学周鹏教授独辟蹊径，创新性地利用二维原子层材料堆叠实现了能带局域态操控，构建的范德瓦耳斯单极势垒探测器突破性地解决了传统材料势垒结构外延生长、晶格失配以及组分能带梯度难以控制的问题^[1]。该工作利用势垒阻挡吸收层中多数载流子运动，控制SRH电流的耗尽区分布向宽带隙的势垒层中

转移，有效降低器件的SRH复合电流；同时，随着吸收层载流子浓度下降，决定器件HOT噪声水平的俄歇复合被大幅抑制；此外这种单极势垒结构具有表面钝化的表面隔离作用，阻碍表面态诱导产生复合和隧穿，可大幅降低器件表面漏电。从根本上解决了长期以来困扰窄禁带二维材料红外探测器暗电流过高的问题。此外，范德瓦耳斯pBp单极势垒探测器在中波红外显示出优异的室温黑体探测率。作为国际标准化组织指定评价红外探测性能的“国际标准”指标，目前只有极少数的低维红外探测器具有室温黑体响应，这意味着该工作实现了二维材料跨入红外应用领域的关键突破^[2, 3]。

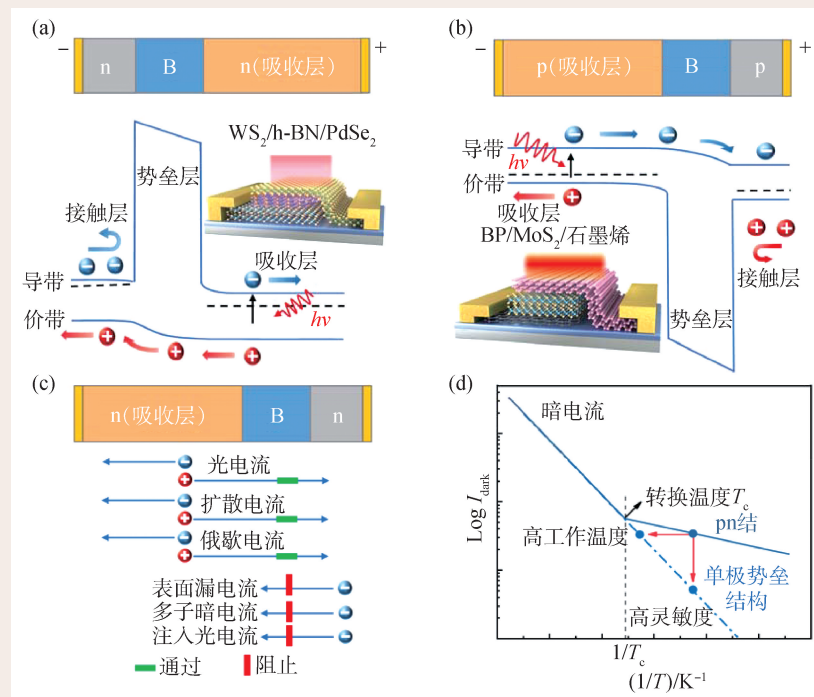


图1 单极势垒光电探测器的能带结构图和暗电流机制 (a)nBn单极势垒结构的能带和器件结构示意图；(b)pBp单极势垒结构的能带和器件结构示意图；(c)nBn单极势垒光电探测器的暗电流机制；(d)pn结和单极势垒器件暗电流的Arrhenius图^[1]

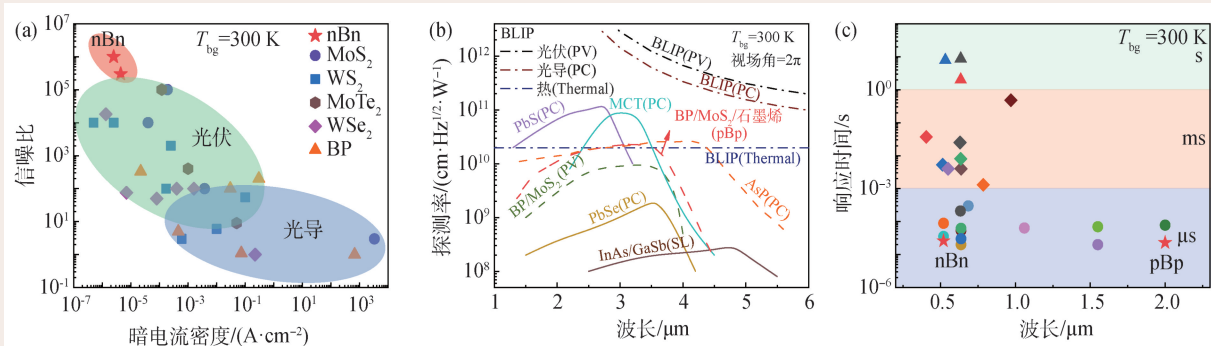


图2 范德瓦耳斯单极势垒光电探测器性能对比 (a)nBn单极势垒探测器的暗电流密度和信噪比对比; (b)pBp单极势垒红外光电探测器的黑体性能对比; (c)nBn和pBp光电探测器的时间对比。其中 T_{bg} 是背景温度, BLIP是背景限红外性能, SL是超晶格^[1]

单极势垒光电探测器主要包括nBn(n型吸收层, B空穴势垒层, n型接触层)和pBp(p型吸收层, B电子势垒层, p型接触层)两种器件结构。在nBn结构中, 导带势垒形成了电子的“天然屏障”, 连续梯度变化的价带却允许空穴“畅通无阻”地自由输运(图1(a))。在光照条件下, n型吸收层中的光生电子在反偏电场作用下被阳极快速抽取收集, 同时光生空穴也通过连续梯度变化的价带传输至阴极。然而在暗态下, 器件吸收层无法产生光生电子, 阴极电子被天然势垒屏蔽阻挡亦无法传输至阳极, 故而使得暗电流被完美“夹断”。这种“闸门”控制效应使得器件暗电流大幅衰减。pBp单极势垒结构可以有效阻挡空穴的流动, 有着与nBn异曲同工之妙(图1(b))。具体来讲, nBn结构的导带势垒能有效阻挡吸收层中多数载流子的运动, 使表面电流大幅度衰减; 同时控制产生器件SRH电流的耗尽区分布向宽带隙的势垒层中转移, 降低吸收层SRH电流; 另外随吸收层载流子浓度下降, 可有效抑制决定器件HOT噪声水平的俄歇复合, 从根本上降低了长期以来困扰窄禁带二维红外探测器HOT暗电流过高的几大重要机制(图1(c))。Arrhenius暗电流图展现了单极势垒结构较pn结的优势所在(图1(d))。在温度 T_i 以上, pn结和单极势垒型器件均工作在暗电流的扩散限。但在温度 T_i 以下, pn结器件受到与耗尽层相关的产生—复合(G—R)电流影响, 器件暗电流从扩散限转向产生复合限; 而单极势垒器件由于对SRH电流的有效抑制仍可工作在扩散限。因

此, 在相同的暗电流要求下, 单极势垒型光电探测器可工作在比pn结更高的温度下。而在相同工作温度下, 单极势垒型光电探测器可呈现出更优秀的暗电流性能, 进而使得器件具有更高的灵敏度。

由于势垒结构对能带匹配要求非常高, 传统薄膜材料构造异质结时很难实现非势垒能带的连续梯度变化, 且制备过程极易引入界面缺陷, 形成较高位错密度, 加之复杂的工艺流程, 这些因素都限制了传统材料势垒结构红外探测器的发展。与传统薄膜材料相比, 二维层状材料钝化的表面无悬空键, 意味着二维原子晶体可不受晶格匹配的限制任意堆叠, 基于此构建的垂直范德瓦耳斯结对于单极势垒红外探测器具有独特的优势。并且, 二维材料丰富的能带结构对于范德瓦耳斯单极势垒结构光电探测器的设计也格外友好。除此之外, 二维材料的自然钝化表面可以有效防止器件表面漏电流的产生, 解决了半导体薄膜器件工艺中的关键问题。另外, 二维材料借助垂直方向的量子限制, 靠近导带和价带边缘的态密度锐化, 使得入射光子能量接近带隙时会增加自由电子空穴对的激发效率, 从而实现入射光的高效吸收。我们基于二维材料科学设计并制备了可见的二硒化钨/氮化硼/二硒化钼($WS_2/h-BN/PdSe_2$) nBn单极势垒结构探测器和中波红外的黑磷/二硫化钼/石墨烯(BP/MoS₂/graphene) pBp单极势垒结构探测器。因为范德瓦耳斯异质结的表面界面杂质带来的散射会严重影响器件迁移率, 并引起光生载流子复合, 降低探测器信噪比。该工

作呈现的超净界面是实现范德瓦耳斯单极势垒探测器的必要条件。

制备的 $\text{WS}_2/\text{h-BN}/\text{PdSe}_2$ nBn 光电探测器, 其能带在 WS_2 和 PdSe_2 之间存在较大的电子势垒和较小的价带势垒。在反偏下, WS_2 作为可见光的吸收层。 WS_2 中的光生空穴越过很小的价带势垒流向阴极, 而光生电子则被阳极快速收集。同时, PdSe_2 层中的电子被 h-BN 势垒所阻挡。因此暗电流被电子势垒所阻挡, 而光电流不会被抑制。在 -1 V 偏压下, 该器件获得了近 $20\text{ }\mu\text{A}$ 的光电流, 实现了超过 10^6 的光开关比。同时, 获得的室温探测率为 $2.7 \times 10^{12}\text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 响应时间为 $26\text{ }\mu\text{s}$, 远高于已报道的 WS_2 器件的性能。

我们进一步研究了基于 BP/ MoS_2 /石墨烯 pBp 结构的红外光电探测器及其室温下的黑体响应。窄带隙的 BP 被用作 p 型吸收层, 石墨烯作为 p 型接触层, 在接触层和吸收层之间选择 MoS_2 作为空穴阻挡层。虽然 n 型的 MoS_2 势垒层会引入 SRH 电流, 但是 MoS_2 与黑磷之间具有完美的能带和晶格匹配。高掺杂和高迁移率的石墨烯接触层可以增强电荷收集, 还可以与 Cr/Au 电极形成良好的欧姆接触, 从而降低电子转移过程中的势垒。在中波红外区域, 器件的截止波长为 $3.8\text{ }\mu\text{m}$, 峰值探

测率为 $2.3 \times 10^{10}\text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。该结构器件的上升时间和下降时间分别为 $28\text{ }\mu\text{s}$ 和 $23\text{ }\mu\text{s}$ 。

与二维材料的光导(PC)和光伏(PV)模式探测器相比, nBn 结构光电探测器具有超低的暗电流密度和超高的信噪比, 如图 2(a)所示, 实现了超过 10^6 的光开关比。如图 2(b)所示, 与传统的薄膜材料和二维材料相比, pBp 势垒结构光电探测器的黑体探测率可与商业最先进的光电探测器相媲美。此外, nBn 和 pBp 光电探测器在室温下均显示出数十微秒的时间响应, 比大多数二维材料光电探测器都快, 如图 2(c)。

该研究成果发表在 *Nature Electronics* 期刊上^[1]。新型范德瓦耳斯单极势垒结构的提出不仅为红外探测器 HOT 暗电流过高的瓶颈问题提供了解决思路, 也为推进二维材料步入红外领域的实际应用提供了关键技术方案。

参考文献

- [1] Chen Y F, Wang Y, Wang Z *et al.* Nat. Electron., 2021, 4: 357
- [2] <http://www.nsfc.gov.cn/publish/portal0/tab448/info81213.htm>
- [3] https://mp.weixin.qq.com/s/3TSks_3Lxswijt5FJIXLOW

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕
—<物理>四十年集萃》

部特推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅 2 年《物理》杂志, 将获赠《岁月留痕—<物理>四十年集萃》一本。该书收录了 1972 年到 2012 年《物理》发表的 40 篇文章, 476 页精美印刷, 定价 68 元, 值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持, 《物理》编辑

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价 180 元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址: 北京市中关村南三街 8 号中科院物理所, 100190
收款人姓名: 《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行: 农行北京科院南路支行
户名: 中国科学院物理研究所
帐号: 11 250 1010 4000 5699

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话: 010-82649029; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn