

基于单层 MoS_2 场效应管中等离子波的 太赫兹探测仿真*

王小云# 范汇川# 陈效双† 王林‡

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外科学与技术全国重点实验室, 上海 200083)

(2025 年 4 月 21 日收到; 2025 年 6 月 3 日收到修改稿)

低维材料体系得益于其本身极高的载流子迁移率以及灵活的集成性, 在太赫兹探测领域被广泛研究并展现出极大的应用潜力. 目前利用软件对半导体太赫兹探测进行仿真分析所依赖的结构主要面向体材料, 而对于低维材料体系的太赫兹探测仿真分析则相对空白. 本文首次对单层 MoS_2 场效应管中等离子体波效应的太赫兹探测进行了仿真分析, 并且系统地阐述了利用等离子体波进行太赫兹探测的原理以及分析过程. 通过调整不同的结构参数和外场条件, 该单层 MoS_2 场效应管太赫兹探测器最大的直流电压信号输出可以达到 $14 \mu\text{V}$. 该信号随着栅极与漏极之间的偏置电压呈现复杂的变化趋势, 通过研究发现该变化趋势与偏置电压引起的载流子浓度变化以及随之改变的动量弛豫时间相关. 本研究有望为低维材料太赫兹探测器设计提供进一步指导.

关键词: MoS_2 , 等离子波, 太赫兹, TCAD 仿真**PACS:** 07.57.Kp, 95.85.Fm, 02.70.-c**DOI:** 10.7498/aps.74.20250517**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250517

1 引言

太赫兹波是一种频率范围处于 $0.1\text{--}10 \text{ THz}$ ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 的电磁波, 其波长范围为 $30\text{--}3000 \mu\text{m}$, 处在远红外波段和微波波段之间. 由于现有的通信频段随着时间的发展频段资源已经日益趋于紧张, 而 6G 移动通信对通信所提出的要求需要进一步拓展频段来得到解决^[1-4], 所以太赫兹波段成为 6G 移动通信的高频波段之一, 同时太赫兹波段所具有的特性赋予 6G 移动通信独有的特性, 如通感一体、空天地一体化等^[5-7]. 同时, 由于太赫兹频率所对应的时间尺度为皮秒级别, 通过

研究材料内部热载流子所辐射的太赫兹信号可以更加系统地研究热载流子的动力学过程, 并且该方法已成为研究太赫兹发射的主要方法^[8-10]. 近段时间, 有研究表明太赫兹光电流响应可以作为一种测量魔角扭转石墨烯内部量子几何和相互作用的有效手段, 该手段进一步加深了对于拓扑效应以及拓扑能带结构的认识^[11].

在众多太赫兹相关的应用需求驱使下, 研制出更高灵敏度、更低等效噪声功率的太赫兹探测器成为亟需解决的问题. 基于 Dyakonov 和 Shur^[12,13] 所提出的二维电子气的太赫兹探测理论, 借助于半导体仿真软件可以对太赫兹探测器进行仿真设计, 并且系统地分析各种结构参数对太赫兹探测的影

* 中国科学院先导项目 (批准号: XDB0580000)、国家自然科学基金 (批准号: 62322515)、上海市自然科学基金 (批准号: 24ZR1493100)、国家重点研发计划青年科学家项目 (批准号: 2024YFA1211300) 和中国科学院国际伙伴网络专项 (批准号: 112GJHZ2024039FN) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: xschen@mail.sitp.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: wanglin@mail.sitp.ac.cn

响,使得研究太赫兹探测器的方法更加地灵活.同时,该方法的可行性已经在体材料的太赫兹探测仿真中进行了验证,如 GaN HEMT, Silicon 等^[14-17].另一方面,许多研究表明二维材料可以对太赫兹波进行有效的探测,展现出了极大的应用潜力^[18-20],但对于低维材料体系的太赫兹探测的仿真分析研究却相对空白.因此,如何更加系统地研究二维材料体系中的太赫兹探测能力,以及如何通过仿真设计二维材料太赫兹探测器成为了一个亟需研究的课题.

本文通过利用仿真软件首次对二维材料的太赫兹探测进行仿真分析,具体对单层 MoS₂ 中等离子体波的太赫兹探测进行系统的仿真分析,通过调节不同的结构参数使得探测器的探测水平有效提升.其中,该单层 MoS₂ 场效应管太赫兹探测器的最大直流输出电压可以达到 14 μV.同时,本研究发现直流信号输出随着偏置电压呈现复杂的函数关系,可以进一步指导低维材料的太赫兹探测器设计以及通过仿真分析探索更多的低维材料太赫兹探测器.

2 理论以及器件结构

2.1 理论模型

基于 Dyakonov 和 Shur^[12] 提出的二维电子流体的太赫兹探测理论,单层 MoS₂ 中的电子由于被约束在两端禁带宽度更大的材料当中,电子在垂直于材料沟道方向上的运动受到约束,形成了类似于二维电子气的结构.同时,得益于 MoS₂ 的半导体特性,单层 MoS₂ 当中的电子浓度可以通过栅压进行调控,从而使得单层 MoS₂ 中的电子成为浓度随栅压波动的二维电子流体.由此,电子的运动方程以及连续性方程可以表示为

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{e}{m} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{v}{\tau} = 0, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(Uv)}{\partial x} = 0, \quad (1b)$$

式中, $\frac{\partial U}{\partial x}$ 表示沿着沟道方向的电场强度, v 为电子的速度, τ 为电子的动量弛豫时间, m 和 e 为电子的质量和电荷量.同时,定义如下边界条件:

$$U(0, t) = U_a + U_0 \cos(\omega t), \text{ for } x = 0, \quad (2a)$$

$$j(L, t) = 0, \text{ for } x = L, \quad (2b)$$

式中, $U_a = U_{gs} - U_{th}$ 为栅极到源极的电压, U_{gs} 为

沟道栅极至源极的偏置电压, U_{th} 为 MoS₂ 的阈值电压; $U_0 \cos(\omega t)$ 为栅极受到太赫兹辐照之后引起一个频率为该太赫兹波频率的振荡电压信号; $x = 0$ 表示源极的边界条件, $j(L, t) = 0$ 表示开路的边界条件, $x = L$ 表示漏极的边界条件.该边界条件表示当器件漏极一端设置为开路的边界条件时,太赫兹波辐照到器件栅极上可以等效为:在源极处产生一个太赫兹波的振荡信号,附加在栅极和源极的偏置电压上.

结合 (1a) 式、(1b) 式以及边界条件 (2a) 式和 (2b) 式,可以得到如下表达式:

$$\Delta U = \frac{1}{4} \frac{U_0^2}{U_a} f(\omega), \quad (3)$$

式中, $f(\omega) = 1 + \beta - \frac{1 + \beta \cos(2k'_0 L)}{\sinh^2(k''_0 L) + \cos^2(k''_0 L)}$; ΔU 为由太赫兹引起等离子波振荡产生的直流电压分量; $\beta = 2\omega\tau / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2}$; k'_0 和 k''_0 分别表示等离子波当中波矢的实部和虚部,其表达式为

$$k'_0 = \frac{\omega}{s} \left(\frac{1}{2} \left\{ [1 + (\omega\tau)^{-2}]^{1/2} + 1 \right\} \right)^{1/2}, \quad (4a)$$

$$k''_0 = \frac{\omega}{s} \left(\frac{1}{2} \left\{ [1 + (\omega\tau)^{-2}]^{1/2} - 1 \right\} \right)^{1/2}, \quad (4b)$$

其中, s 为等离子波的速度.由此,可以将探测器的模式分为如下两类. 1) 共振探测: 当 $\omega\tau \gg 1$ 以及对于短沟道器件满足 $s\tau/L \gg 1$, $f(\omega)$ 具有如下表达式:

$$f(\omega) = 4 \left(\frac{s\tau}{L} \right)^2 \frac{1}{4(\omega - n\omega_0)^2 \tau^2 + 1}, \quad (5)$$

其中, ω_0 为等离子波振荡的基频; $n = 1, 3, 5, \dots$.由此可见,直流信号输出将会在等离子波基频的奇数倍频处出现响应的峰值,呈现出共振的特征,但对于一般器件来说,很难满足共振响应的条件. 2) 非共振探测: 当 $\omega\tau \ll 1$ 以及长沟道器件, $f(\omega) = 1 + 2\omega\tau / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2}$.对于非共振探测,等离子波会在沟道当中逐渐衰减,导致其无法到达漏端.但是由于载流子的扩散作用,同样也可以导致一个直流的电压信号输出.

2.2 器件结构以及物理模型

本器件的结构如图 1 所示, HfO₂、单层 MoS₂ 以及 SiO₂ 的厚度分别为 10 nm, 0.6 nm 和 10 nm, MoS₂ 的沟道长度为 350 nm. 本仿真模型中单层

MoS₂ 参数来源于文献 [21], 带隙能量为 1.78 eV, 迁移率为 100 cm²/(V·s), 电子和空穴的有效质量分别为 0.501m₀ 和 0.588m₀, 其中 m₀ 是自由电子的惯性质量, 亲和能以及介电常数分别为 4.2 eV 和 4. 其他的材料参数均使用仿真软件的默认材料参数.

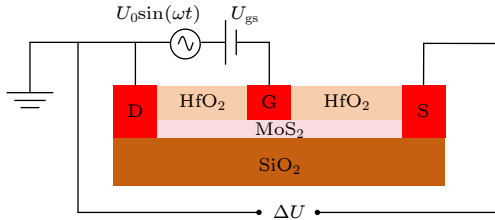


图 1 单层 MoS₂ 场效应管太赫兹探测器结构示意图
Fig. 1. Structure of monolayer MoS₂ FET terahertz detector.

为了模拟单层 MoS₂ 受到太赫兹所激发的等离子体波动力学行为, 采用漂移扩散模型来表征该动力学行为; 采用费米统计模型, 用于保证器件载流子浓度较大时仿真过程的准确性; 迁移率模型采用恒定迁移率模型, 表示迁移率为一不变的常数值; 产生-复合模型采用 Shockley-Read-Hall 模型, 用于表征载流子的寿命; 考虑 OldSlotboom 模型, 用于模拟该器件当中存在的禁带变窄效应.

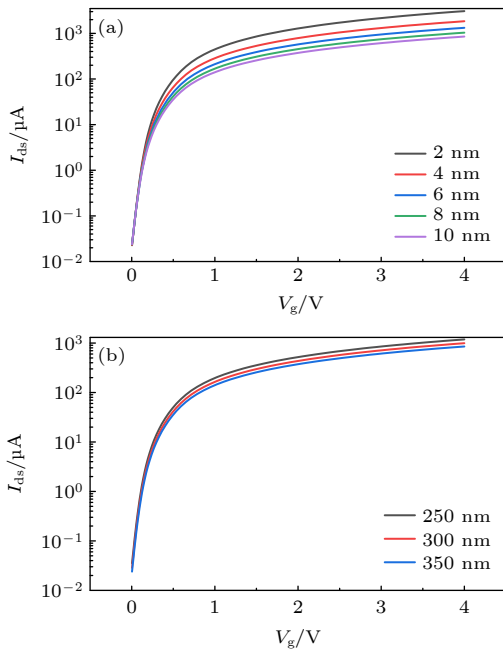


图 2 转移特性曲线 (a) 不同 HfO₂ 厚度下的转移特性曲线; (b) 不同沟道长度下的转移特性曲线
Fig. 2. Transfer characteristic curves: (a) The transfer characteristic curves with different HfO₂ thickness; (b) the transfer characteristic curves with different channel length.

图 2 进一步展示了不同结构所对应的转移特性曲线. 图 2(a) 展示了不同 HfO₂ 层厚度下, 源漏电压为 0.5 V 时的转移特性曲线. 在同一个源漏电压和栅极电压下, 越薄的 HfO₂ 层可以产生越大的源漏电流输出. 这源于 HfO₂ 层越薄, 施加在单层 MoS₂ 上的栅极等效电压越强烈, 从而能够更好地调控单层 MoS₂ 的电子浓度. 图 2(b) 展示了不同沟道长度下, 源漏电压为 0.5 V 时的转移特性曲线. 越长的沟道所得到的源漏电流输出则越小, 主要原因是越长的沟道越不利于栅压电场均匀分布在沟道当中, 从而导致 MoS₂ 内部的载流子浓度不平衡, 进一步导致其源漏输出电流减小.

3 太赫兹探测仿真分析

3.1 太赫兹探测过程分析

基于 Dyakonov 和 Shur^[12] 提出的二维电子流体的太赫兹探测理论, 单层 MoS₂ 场效应管的结构如图 1 所示, 其中沟道长度为 350 nm, HfO₂ 的厚度为 10 nm. 首先为了实现等离子体波振荡所产生的直流信号进行探测, 需将源极一端设置为开路的边界条件, 对应于 (2a) 式和 (2b) 式的边界条件; 同时在栅极和漏极之间施加一个 -0.1 V 的偏置电压, 用于调整沟道处的载流子浓度. 假设太赫兹波的频率为 0.25 THz, 并且进一步假设太赫兹波照射到栅极后所引起的太赫兹信号的振幅 U₀ = 1 mV. 如图 3 所示, 正如 (1a) 式和 (1b) 式所预测的一样, 太赫兹波经过栅极接收后激发沟道处的电子产生等离子体波振荡, 从而可以在源漏电压信号中观测到一个振荡频率与该太赫兹波频率相同的电压振荡信号. 为了更好地观测这种等离子体波振荡, 图 3 插图给出了框选放大后的示意图, 可以观测到一个明显的正弦波振荡信号.

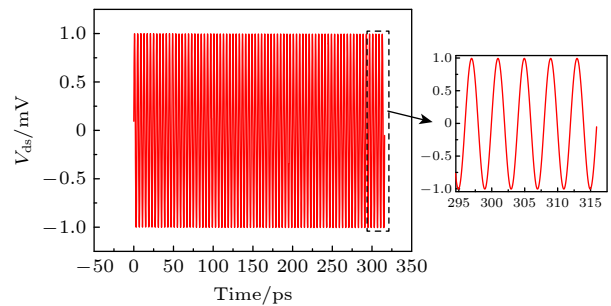


图 3 在太赫兹光激励下产生的源漏电压 V_{ds} 随时间的关系
Fig. 3. Time domain of V_{ds} stimulated by terahertz radiation.

为了更加直观地观测到由等离子波振荡所引起的沟道处的直流电压信号, 对图 3 数据进行快速傅里叶变换 (FFT), 结果如图 4 所示, 插图为框选部分的放大图. 由图 4 可知: 在与太赫兹波相同的频率点上可以观测到一个幅值极大的电压信号; 除此以外, 在频率为 0 处可以观测到一个如 (3) 式所展示的直流电压信号, 幅度为 $6.56 \mu\text{V}$.

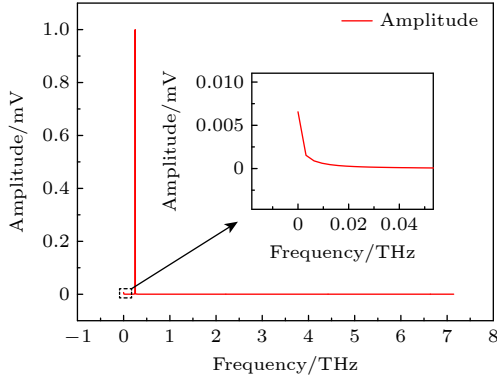


图 4 V_{ds} 振荡信号经 FFT 后频率与振幅的关系
Fig. 4. Frequency domain of V_{ds} .

3.2 不同结构参数下的太赫兹探测模拟

为了探究不同结构参数对该单层 MoS_2 场效应管太赫兹探测器功能水平的影响, 图 5 展示了在不同太赫兹振幅、不同 HfO_2 厚度以及不同的沟道长度下的直流信号输出情况. 默认的沟道长度结构参数为 350 nm , HfO_2 的厚度为 10 nm , 太赫兹频率为 0.25 THz 以及振幅为 1 mV . 当相关参数改变时, 其他默认参数不变.

从图 5(a) 可以观测到, 输入功率 ($P \propto U_0^2$) 与直流信号输出之间存在良好的线性关系, 该线性关系在其他二维材料太赫兹探测当中已经被广泛地

证实^[22-24]. 如图 5(b) 所示, 直流电压信号随着 HfO_2 的厚度增大而增大, 但当 HfO_2 的厚度达到 8 nm 后的增长趋势变得平缓. 图 5(c) 表明直流电压信号随着沟道长度的增长而呈现减小的变化趋势, 该原因主要源于越长的沟道长度, 导致的衰减越大, 从而使得直流电压信号输出变小. 需要强调的是, 图 5(b), (c) 的变化趋势是在太赫兹频率为 0.25 THz , 栅极与漏极之间偏压为 -0.1 V 的条件下测定的. 后续的分析将表明直流电压信号的变化情况与偏置电压呈现出复杂的关系, 而并非简单的正相关的关系.

如图 6 所示, 在不同的结构参数下, 直流电压信号随着偏置电压以及太赫兹频率变化呈现出复杂的变化趋势. 如图 6(a), (b) 所示, 不同 HfO_2 厚度以及不同沟道长度的结构所对应的直流电压信号输出都随着栅极偏置电压的变化而呈现出复杂的变化情况. 由图 6(b) 所示, 当偏置电压大于 0.7 V 时, 直流电压信号与沟道长度呈现正相关变化趋势. 图 6(a), (b) 所描述的变化趋势与其他太赫兹仿真论文所呈现的变化趋势不相同, 其主要原因可能在于本文中所考虑的物理模型不够充分, 且受限于缺少单层 MoS_2 其他物理模型所需参数, 无法对更多物理模型的影响进行研究, 本内容将在后续的研究工作中继续完善.

相对于偏置电压的变化情况, 在不同频率下的直流电压信号却呈现出同一变化趋势, 由此可以得知: 单层 MoS_2 场效应管太赫兹探测器在不同频率下的响应的变化趋势不受器件结构的调控, 且不同沟道长度的直流电压信号输出在太赫兹频率为 0.25 THz 处出现了非单调的变化关系.

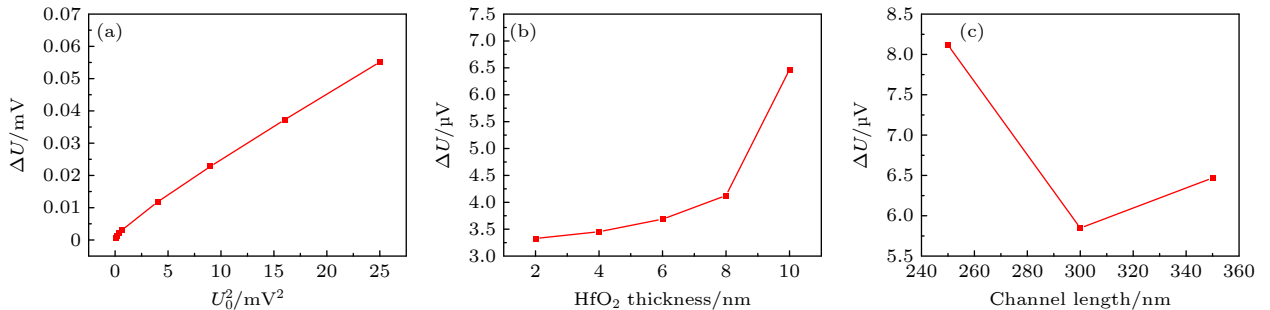


图 5 不同结构参数下的直流电压输出 (a) 不同太赫兹波振幅下的直流信号输出; (b) 不同 HfO_2 厚度下的直流信号输出; (c) 不同沟道长度下的直流信号输出

Fig. 5. The DC voltages with different structure parameters: (a) The DC voltages with different U_0 ; (b) the DC voltages with different HfO_2 thicknesses; (c) the DC voltages with different channel lengths.

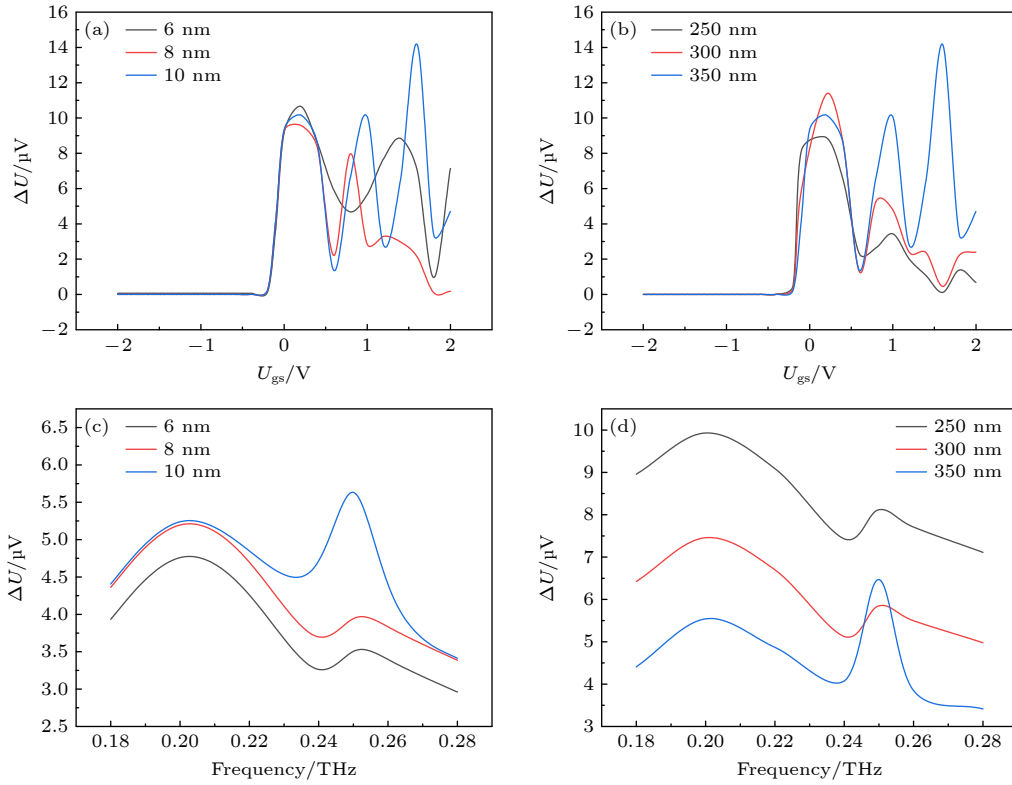


图 6 不同结构参数下直流电压信号随偏置电压以及频率的变化 (a), (b) 不同 HfO_2 厚度 (a) 和不同沟道长度 (b) 结构的直流电压信号输出随着偏置电压的变化; (c), (d) 不同 HfO_2 厚度 (c) 和不同沟道长度 (d) 结构的直流电压信号输出随着太赫兹波频率的变化

Fig. 6. The DC voltages with different structure parameters at different U_{gs} and terahertz frequencies: (a), (b) The variation of DC voltage signals with the bias voltage for structures with different HfO_2 thicknesses (a) and different channel lengths (b); (c), (d) the variation of DC voltage signals with the frequency of terahertz waves for structures with different HfO_2 thicknesses (c) and different channel lengths (d).

4 讨论部分

为了进一步研究图 6(a), (b) 中不同结构的直流电压信号随着偏置电压呈现非单调变化的原因, 进行如下分析: 由于该直流分量信号会导致不同位置上的载流子费米势能不同, 从而可以通过费米势能的差值反映直流电压的情况. 但需要注意的是, 当存在偏置电压时, 该偏置电压也会影响到沟道处的载流子费米势能分布, 并且非对称的边界条件同样会使得电压分布呈现不均匀的情况, 使得通过该方法分析存在困难. 但该分布情况十分类似于此前 Dyakonov 和 Shur 研究当中对不同等离子体波波速的频谱响应分布^[12], 由此可以得知: 不同的偏置电压会导致其沟道内载流子浓度以及等离子体波的波速的变化, 进一步导致其具有不同的动量散射时间以及建立不同的探测关系, 从而导致该曲线非单调的函数关系.

5 结论

本文利用仿真软件首次对二维材料太赫兹探测器进行仿真分析, 对单层 MoS_2 场效应管中等离子体波的太赫兹探测进行了详细研究. 探究了不同结构参数以及外场条件下太赫兹探测器的探测能力, 并且发现直流电压信号随着栅极电压呈现复杂的变化趋势. 同其他体材料太赫兹探测器, 如 Silicon 以及 GaN HEMT, 该单层 MoS_2 探测器在太赫兹探测能力方面不及此类体材料探测器; 但作为低维材料, MoS_2 展现出更好的转移特性曲线, 并且可以进一步与其他材料形成异质结结构, 从而增强其探测性能并且拓展其功能.

本研究工作可以作为设计低维材料太赫兹探测器的一个重要依据, 并且进一步通过仿真分析优化二维材料太赫兹探测器的性能, 以此来深化指导二维材料的太赫兹光电响应研究以及通过仿真研究更多低维材料体系的太赫兹探测器.

参考文献

- [1] Feng W, Wei S T, Cao J C 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 244303 (in Chinese) [冯伟, 韦舒婷, 曹俊诚 2021 物理学报 **70** 244303]
- [2] Wang C X, Wang J, Hu S, Jiang Z H, Tao J, Yan F 2021 *IEEE Veh. Technol. Mag.* **16** 27
- [3] Shafie A, Yang N, Han C, Jornet J M, Juntti M, Kürner T 2023 *IEEE Network* **37** 162
- [4] Jiang W, Zhou Q H, He J G, Habibi M A, Melnyk S, El-Absi M, Han B, Renzo M D, Schotten H D, Luo F L, El-Bawab T S, Juntti M, Debbah M, Leung V C M 2024 *IEEE Commun. Surv. Tutorials* **26** 2326
- [5] Liu Z L, Yang C, Peng M G 2024 *IEEE Network* **38** 194
- [6] Chen W R, Li L X, Chen Z, Liu Y W, Ning B Y, Quek T Q S 2024 *IEEE Trans. Veh. Technol.* **73** 19019
- [7] Han C, Wu Y Z, Chen Z, Chen Y, Wang G J 2024 *IEEE Commun. Mag.* **62** 102
- [8] Taghinejad M, Xia C, Hrtton M, Lee K T, Kim A S, Li Q, Guzelurk B, Kalousek R, Xu F, Cai W, Lindenberg A M, Brongersma M L 2023 *Science* **382** 299
- [9] Mihnev M T, Kadi F, Divin C J, Winzer T, Lee S, Liu C H, Zhong Z, Berger C, de Heer W A, Malic E, Knorr A, Norris T B 2016 *Nat. Commun.* **7** 11617
- [10] Zhang D H, Xu Z, Cheng G, Liu Z, Gutierrez A R, Zang W Z, Norris T B, Zhong Z H 2022 *Nat. Commun.* **13** 6404
- [11] Krishna Kumar R, Li G, Bertini R, Chaudhary S, Nowakowski K, Park J M, Castilla S, Zhan Z, Pantaleón P A, Agarwal H, Batlle-Porro S, Icking E, Ceccanti M, Reserbat-Plantey A, Piccinini G, Barrier J, Khestanova E, Taniguchi T, Watanabe K, Stampfer C, Refael G, Guinea F, Jarillo-Herrero P, Song J C W, Stepanov P, Lewandowski C, Koppens F H L 2025 *Nat. Mater.* **24** 1034
- [12] Dyakonov M, Shur M 1996 *IEEE Trans. Electron Devices* **43** 380
- [13] Dyakonov M, Shur M 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 2465
- [14] Liu X Q, Shur M 2019 *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)* Orlando, FL, USA, January 20–23, 2019 p1
- [15] Liu X Q, Shur M S 2020 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **10** 15
- [16] Meng Q Z, Lin Q J, Jing W X, Han F, Zhao M, Jiang Z D 2018 *IEEE Trans. Electron Devices* **65** 4807
- [17] Zhu Y J, Ji X L, Liao Y M, Wu F W, Yan F 2014 *12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)* Guilin, China, October 28–31, 2014 p1
- [18] Tong J Y, Muthee M, Chen S Y, Yngvesson S K, Yan J 2015 *Nano Lett.* **15** 5295
- [19] Zhou J, Wang X Y, Chen Z Q Z, Zhang L B, Yao C Y, Du W J, Zhang J Z, Xing H Z, Fu N X, Chen G, Wang L 2022 *Chin. Phys. B* **31** 050701
- [20] Shen J Z, Xing H Z, Wang L, Hu Z, Zhang L B, Wang X Y, Chen Z Q Z, Yao C Y, Jiang M J, Fei F C, Chen G, Han L, Song F Q, Chen X S 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 063501
- [21] Shen Y, Tian H, Ren T L 2022 *J. Semicond.* **43** 082002
- [22] Wang D, Yang L, Hu Z, Wang F, Yang Y G, Pan X K, Dong Z, Tian S J, Zhang L B, Han L, Jiang M J, Tang K Q, Dai F X, Zhang K, Lu W, Chen X S, Wang L, Hu W D 2025 *Nat. Commun.* **16** 25
- [23] Han L, Zhang S, Tian S J, Zhang L B, Wei Y D, Zhang K X, Jiang M J, He Y, Liu C L, Tang W W, He J L, Shu H B, Politano A, Chen X S, Wang L 2025 *ACS Nano* **19** 3740
- [24] Xiao K N, Zhang S, Zhang K X, Zhang L B, Wen Y F, Tian S J, Xiao Y L, Shi C F, Hou S C, Liu C L, Han L, He J L, Tang W W, Li G H, Wang L, Chen X S 2024 *Adv. Sci.* **11** 2401716

Simulation of terahertz detection based on plasma waves in monolayer MoS₂ field-effect transistor^{*}

WANG Xiaoyun[#] FAN Huichuan[#] CHEN Xiaoshuang[†] WANG Lin[‡]

(State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(Received 21 April 2025; revised manuscript received 3 June 2025)

Abstract

Low-dimensional material systems benefit from their extremely high carrier mobility and flexible integrability, making them a subject of research in the terahertz detection field and demonstrating significant potential for applications. At present, software is mainly used to simulate and analyze the structures relied upon for semiconductor terahertz detection of bulk materials, while the simulation analysis for terahertz detection in low-dimensional material systems is still relatively unexplored. Due to the low degrees of freedom in carrier motion in low-dimensional materials, the probability of scattering caused by collisions between electrons and the lattice in the channel during electron movement is effectively reduced, making these materials have immense potential in high-sensitivity detection. Their low equivalent noise power and high signal-to-noise ratio performance in signal detection highlight the broad development prospects of these materials in the field of communication. This work simulates and analyzes the plasmon wave effect in a monolayer MoS₂ field-effect transistor (FET) for THz detection for the first time, and systematically elucidates the principle and analysis process of using plasmon waves for THz detection. The transmission characteristic curve of the device is simulated and measured at a source-drain voltage of 0.5 V, and, a gate-to-drain voltage of -0.1 V is selected based on this curve to preliminarily investigate the THz response performance of the device. By adjusting key parameters such as U_{gs} , THz wave irradiation frequency, and HfO₂ layer thickness, it is found that the monolayer MoS₂ FET THz detector can produce a maximum DC voltage signal of 14 μ V. This signal exhibits a complex variation trend related to the bias voltage between the gate and drain. This trend correlates with the bias voltage-induced changes in carrier concentration and the corresponding momentum relaxation time. The research results obtained in this paper can provide an important reference for designing low-dimensional material THz detectors. Furthermore, they lay a foundation for optimizing the performance of two-dimensional material THz detectors through simulation analysis, thereby providing deeper insights into the study of THz photoelectric responses in 2D materials.

Keywords: MoS₂, plasma wave, terahertz, TCAD simulation

PACS: 07.57.Kp, 95.85.Fm, 02.70.-c

DOI: 10.7498/aps.74.20250517

CSTR: 32037.14.aps.74.20250517

^{*} Project supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB0580000), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62322515), the Natural Science Foundation Programme of Shanghai, China (Grant No. 24ZR1493100), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2024YFA1211300), and the International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 112GJHZ2024039FN).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: xschen@mail.sitp.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: wanglin@mail.sitp.ac.cn

基于单层MoS₂场效应管中等离子波的太赫兹探测仿真

王小云 范汇川 陈效双 王林

Simulation of terahertz detection based on plasma waves in monolayer MoS₂ field-effect transistor

WANG Xiaoyun FAN Huichuan CHEN Xiaoshuang WANG Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 150701 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250517

CSTR: 32037.14.aps.74.20250517

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250517>

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

谐振腔-单层二硫化钼系统中的高阶腔耦合等离极化激元

High-order cavity coupled plasmon polaritons in resonant cavity-monolayer MoS₂ system

物理学报. 2024, 73(22): 227102 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241106>

基于VO₂的波束可调太赫兹天线

Beam steerable terahertz antenna based on VO₂

物理学报. 2022, 71(18): 188703 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220817>

基于VO₂的太赫兹各向异性编码超表面

VO₂ based terahertz anisotropic coding metasurface

物理学报. 2023, 72(12): 124204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222171>

基于多孔金膜的太赫兹导模共振生化传感特性仿真

Performance simulation of terahertz waveguide resonance biochemical sensor based on nanoporous gold films

物理学报. 2022, 71(21): 218701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220722>

基于狄拉克半金属纳米线的太赫兹可调七波段完美吸收器的模拟仿真

Simulation of terahertz tunable seven-band perfect absorber based on high frequency detection function of Dirac semi-metallic nanowires

物理学报. 2025, 74(3): 034101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241516>

单层MoS₂薄膜的NaCl双辅助生长方法

Growth of monolayer MoS₂ films dual-assisted by NaCl

物理学报. 2022, 71(12): 128104 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220273>