Управление плотностью носителей заряда в фототранзисторных структурах на основе CVD-MoS_2 атомарной толщины

© И.А. Елисеев [1], V.A. Kurtash [2], J. Pezoldt [2], В.Ю. Давыдов [1]

[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[2] Технический университет Ильменау (TU Ilmenau),
100565 Ильменау, Германия

E-mail: ilya.eliseyev@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 6 мая 2025 г.
В окончательной редакции 4 июля 2025 г.
Принята к публикации 10 июля 2025 г.

Оптимизация свойств двумерных полупроводников для их применения в различных типах электронных приборов является одной из важнейших задач современной наноэлектроники. Исследованы особенности управления концентрацией носителей заряда в монослойном и двухслойном MoS_2 с помощью изменения затворного напряжения транзистора. Изучено влияние включений MoS_2 двухслойной толщины с регулярной $(3R)$ и нерегулярной последовательностью укладки на степень нелинейности вольт-амперных характеристик и отклик параметров MoS_2 на напряжение на затворе.

Ключевые слова: дисульфид молибдена, фототранзистор, гистерезис, спектроскопия КРС, фотолюминесценция, носители заряда.

DOI: 10.61011/FTP.2025.04.61256.8116

1. Введение

В течение последнего десятилетия на основе двумерных полупроводников, в том числе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), был создан полный набор элементов для электрических схем, например, мемристоры — критически важные элементы для создания нейроморфных электрических схем [1,2]. Гибридные структур „фотодетектор-полевой транзистор“ (photo-FET) представляют собой перспективную платформу для разработки нового поколения оптоэлектронных устройств. Их ключевым преимуществом по сравнению с диодными структурами являются высокая чувствительность и увеличенное соотношение сигнал/шум, что достигается благодаря снижению темнового тока с увеличением собственного сопротивления канала при его закрытии [3]. Использование двумерных полупроводников в качестве фоточувствительного канала позволяет значительно снизить как размеры устройств, так и их энергопотребление. Один из представителей семейства ДПМ, дисульфид молибдена (MoS_2), обладает высокой удельной фоточувствительностью [4] и достаточно высокой подвижностью носителей заряда [5], что делает его одним из наиболее подходящих материалов для создания таких устройств.

Наиболее распространенным методом изготовления двумерных слоев является химическое осаждение из газовой фазы (ХОГФ, CVD). Однако из-за несогласованности параметров решетки с подложкой рост MoS_2 происходит по островковому механизму: кристаллиты с произвольной ориентацией осей a и b, лежащих в плоскости слоя, формируются из случайно распределенных зародышей [6]. Это приводит к образованию высокой плотности междоменных границ, которые действуют как центры безызлучательной рекомбинации и рассеяния, снижая концентрацию и подвижность носителей. Однако наличие структурных дефектов может быть полезно для применения таких пленок в некоторых специфических областях. Захват носителей заряда на ловушках, связанных с дефектами пленки MoS_2, может приводить к появлению нелинейности и гистерезиса в вольт-амперных характеристиках (ВАХ) приборов на основе таких пленок. Обусловленный гистерезисом эффект изменения сопротивления прибора, зависящего от интеграла по времени прошедшего тока, также называемый мемристорным, был открыт еще в 1971 году [7] и лег в основу работы нового класса электронных компонентов — мемристоров. Важным условием работы таких компонентов является прохождение петли гистерезиса через начало координат ВАХ [8], в отличие от сегнетоэлектрического или магнитного гистерезиса.

Ранние мемристоры изготавливались на основе оксидных пленок, как, например, один из первых мемристоров на основе тонкой пленки TiO_2 [9]. Однако для возникновения значительного мемристорного эффекта в таких структурах требуется большая площадь активной области, что ограничивает их масштабируемость. Прорыв в миниатюризации стал возможен благодаря развитию технологий, связанных с группой двумерных материалов. Использование двумерных полупроводников, таких как MoS_2, позволяет добавить затвор для дополнительной модуляции сопротивления канала и гистерезиса и создать мемтранзистор [10].

Управление плотностью носителей заряда в канале фототранзистора позволяет регулировать чувствительность фотодетекторов. В данном случае наличие дефектов и зарядовых ловушек в канале может влиять

на возможности и диапазон регулировки. К дефектам можно отнести как классические границы кристаллитов и вакансии, так и включения MoS_2 с другим количеством слоев, а также области с нерегулярной последовательностью укладки. Наиболее распространенными структурными модификациями MoS_2 являются политипы $2H$ и $3R$ (пространственные группы $P6_3/mmc$ и $R3m$ соответственно). Однако при островковом росте возможны нарастание края одного из островков над другим [6] и формирования на границах двухслойного MoS_2 с нерегулярной последовательностью укладки.

В данной работе демонстрируется возможность управления концентрацией носителей заряда в канале транзисторов, изготовленных из CVD-MoS_2. Для отслеживания изменений используется комбинация двух оптических методик — спектроскопии КРС и фотолюминесценции (ФЛ). В режиме КРС- и ФЛ-картирования канала транзистора эти методики дают взаимодополняющую информацию не только об изменениях в концентрации носителей заряда, но и о структурных особенностях конкретной области канала транзистора, в том числе о последовательности укладки слоев в многослойных областях. Таким образом возможно исследовать особенности реакции на напряжение затвора различных областей MoS_2-канала фототранзистора и выявить области, дающие основной вклад в гистерезис.

Для нанесения MoS_2 были использованы подложки p^+-Si/SiO_2, которые после очистки и нарезки на чипы обрабатывались кислородной плазмой в течение 10 мин при мощности 300 Вт. После плазменной обработки наносился KCl из водного раствора с концентрацией 0.05 M методом центрифугирования. Затем рост кристаллической пленки MoS_2 выполнялся в кварцевой трубке с помощью метода ХОГФ при атмосферном давлении (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition, APCVD). В качестве прекурсоров использовались порошки серы (S) и триоксида молибден (MoO_3) от компании Sigma-Aldrich, в качестве газа-носителя использовался азот. Температура 800 °C в зоне с источником MoO_3 и подложками достигалась за 18 мин и поддерживалась в течение 2 мин. Затем камера естественным образом охлаждалась до комнатной температуры.

Из нанесенного слоя MoS_2 были сформированы каналы транзисторов путем реактивно-ионного травления через фоторезист AZ 1518 в качестве маски. Электрические контакты изготовлены с помощью системы безмасочной литографии MLA 150 (Heidelberg Instruments). В качестве маски при нанесении металла использовался негативный фоторезист AZ LNR-003. Пленка золота толщиной 100 нм для создания контактов и контактных площадок осаждалась методом электронно-лучевого испарения с помощью системы CS400ES (Ardenne).

Измерения спектров КРС и ФЛ проводились с использованием спектрометра Horiba LabRAM HREvo UV-VIS-NIR-Open. Спектры были получены в геометрии обратного рассеяния с непрерывным возбуждением лазером Nd:YAG (Laser Quantum Torus) с длиной волны 532 нм мощностью до 400 мкВт. Все оптические измерения проводились при комнатной температуре. Для фокусировки лазерного луча в область диаметром < 1 мкм и сбора сигнала ФЛ и КРС из этой области использовался длиннофокусный объектив Olympus LMPFLN100× (NA = 0.8). Спектры КРС были получены со спектральным разрешением 0.7 $см^{-1}$ с использованием решетки 1800 штрих/мм и детектора Symphony BIUV (Horiba). Спектры ФЛ были получены с использованием решетки 600 штрих/мм и детектора Synapse EMCCD (Horiba). Для получения информации о сверхнизкочастотном диапазоне ($5-50$ $см^{-1}$) использовался набор брэгговских фильтров (BragGrate).

Для анализа влияния затворного напряжения на свойства различных областей в канале фототранзистора проводились измерения в режиме КРС- и ФЛ-картирования. Во время измерений образцы помещались в оптическую ячейку Linkam HFS600-PB4, оснащенную вольфрамовыми зондами с покрытием Au. Напряжение подавалось на соответствующие контакты транзисторных структур при помощи источника-измерителя Keysight B2900.

В рамках данной работы было исследовано два фототранзистора с различающимися характеристиками, изготовленных на одном чипе: прибор с каналом из преимущественно монослойного MoS_2 с небольшой долей двухслойных включений (прибор 1) и прибор 2 — со значительной долей бислойного MoS_2 в канале. Толщина MoS_2 в канале была определена с помощью КРС-картирования.

На рис. 1 показаны измеренные на обоих приборах ВАХ. Для мемтранзистора возможно наличие гистерезиса как на выходных, так и на передаточных ВАХ. Наличие или отсутствие гистерезиса в каждом конкретном случае определяется локализацией ловушек носителей заряда в данных компонентах [11]. Так, для мемтранзисторов на основе CVD-MoS_2, выращенных на подложке Si/SiO_2, характерно наличие ловушек захвата носителей заряда на интерфейсе SiO_2/MoS_2, а также ловушек захвата, связанных с дефектами в самом слое MoS_2 (вакансии серы, границы раздела зерен), как было показано в работе [12]. Обычно первый тип ловушек проявляется в наличии гистерезиса в передаточных ВАХ, а второй — в выходных ВАХ.

Как видно из приведенных на рис. 1, a зависимостей, темновой ток при приложении отрицательного напряжения на затвор ($V_{GS} = -10$ В) составляет $\sim 10^{-10}$ А ввиду обеднения полупроводникового канала, что обеспечивает высокое соотношение сигнал/шум при работе в режиме фототранзистора.

Для количественной оценки гистерезиса на выходных характеристиках применяют отношение собственных сопротивлений канала в высокорезистивном и низкорезистивном состояниях HRS/LRS:

$$HRS/LRS = R_{HRS} - R_{LRS},$$

где LRS — состояние с низким сопротивлением (движение в направлении (1) на рис. 1, b), а HRS — состояние с

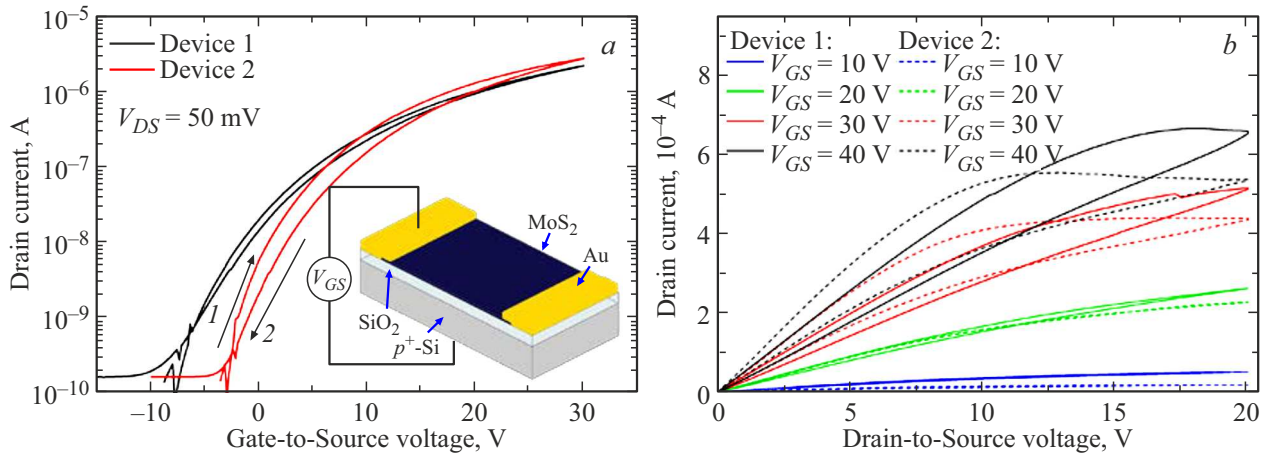

Рис. 1. Передаточные характеристики исследованных приборов (*a*) и их выходные характеристики, измеренные при разных значениях затворного напряжения (*b*). На вставке — схематическое изображение структуры исследуемых фототранзисторов (photo-FET).

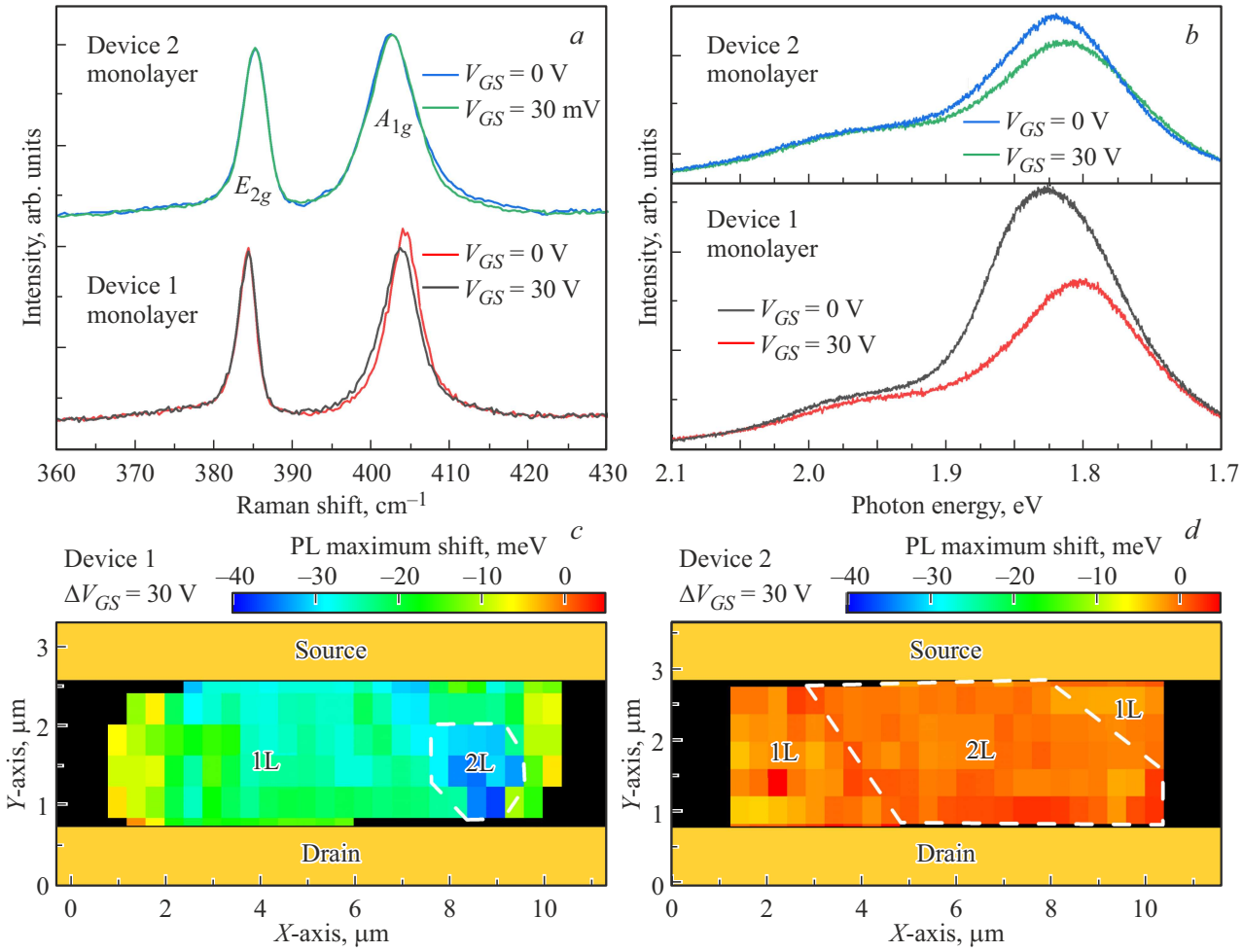

Рис. 2. Типичные спектры КРС (*a*) и ФЛ (*b*), измеренные в монослойных областях исследованных приборов. Спектры приборов 1 и 2 разнесены в вертикальном направлении для удобства восприятия. *c, d* — карты сдвига максимума ФЛ в обоих приборах. Здесь и далее желтым цветом схематически обозначено расположение контактов истока (Source) и стока (Drain). Белым пунктиром обозначены границы двухслойных (2L) областей.

высоким сопротивлением (движение в направлении (2) на рис. 1, *b*). Как видно по приведенным ВАХ, исследованные мемтранзисторы имеют лишь незначительный гистерезис передаточной характеристики, при этом он наиболее выражен на выходных характеристиках. Отсюда можно сделать вывод о преимущественном влиянии дефектов в MoS_2, например, границах раздела зерен, на гистерезис в исследованных приборах. Семейство выходных кривых фототранзистора, показанное на рис. 1, *b*, демонстрирует увеличение гистерезиса с увеличением напряжения, приложенного к затвору. При этом максимальное соотношение HRS/LRS составляет 1.3 для прибора 1 и 1.6 для прибора 2.

Спектры КРС и ФЛ канала фототранзистора при различных значениях V_{GS} представлены на рис. 2, *a, b*. Характерными признаками увеличения концентрации электронов является сдвиг линии A_{1g} в спектрах КРС в сторону низких частот и ее уширение, а также уменьшение интенсивности ФЛ одновременно со сдвигом ее максимума в сторону низких энергий, что обусловлено уменьшением интенсивности компоненты, соответствующей нейтральному А-экситону, и увеличением интенсивности компоненты заряженного экситона (триона). Именно такой эффект можно наблюдать в спектрах прибора 1, представленных на рис. 2, *a, b*. Величина сдвига линии A_{1g} составляет $-0.7\,\text{см}^{-1}$, а ее полная ширина на половине высоты (FWHM) увеличивается от 4.9 до $5.9\,\text{см}^{-1}$. Такие изменения в спектрах КРС могут быть связаны с увеличением концентрации электронов n_e от 2 до $4 \cdot 10^{12}\,\text{см}^{-2}$ [13,14]. Сдвиг максимума ФЛ (рис. 2, *b*) при этом составляет -30 мэВ. В случае прибора 2 с ростом V_{GS} спектры КРС (рис. 2, *a*) не претерпевают существенных изменений, однако в спектрах ФЛ (рис. 2, *b*) наблюдается слабый сдвиг максимума (-5 мэВ), что может указывать на небольшое ($\sim 1 \cdot 10^{12}\,\text{см}^{-2}$) увеличение n_e.

На рис. 2, *c* представлена карта положения максимума ФЛ в структуре с небольшой долей двуслойных включений. Среднее значение сдвига максимума ФЛ в монослойных областях составляет порядка -20 мэВ. При этом в бислойных областях сдвиг максимума ФЛ почти вдвое больше и составляет до -40 мэВ. Аналогичная карта для прибора 2 (рис. 2, *d*) демонстрирует почти полное отсутствие изменений положения максимума ФЛ в двухслойных областях, однако в монослойных областях, как было показано выше, наблюдается небольшой сдвиг величиной до -5 мэВ.

Слабо выраженная модуляция n_e напряжением на затворе в приборе 2 с большой долей двухслойных включений, предположительно, связана с рекомбинацией носителей заряда на дефектах, а именно границах кристаллитов и (или) в областях с нерегулярной укладкой. На рис. 3, *a* представлена КРС-карта распределения частоты линии „дышащей“ моды *LB* в канале прибора 2 и типичные спектры для двух областей — с большей и меньшей частотой ω_{LB}. В то время как в области с частотой $\omega_{LB} > 37\,\text{см}^{-1}$ спектры соответствуют бислойному $3R$-MoS_2 [15], линия сдвиговой моды *C* в области 2

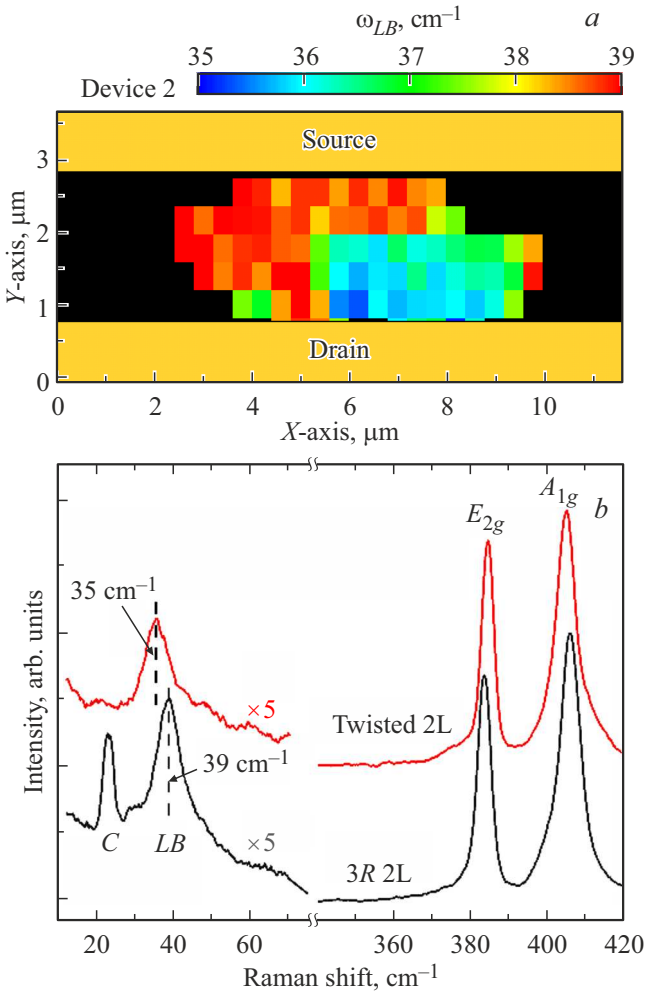

Рис. 3. Карта КРС распределения частоты „дышащей“ моды *LB* для прибора 2 (*a*) и типичные для областей с $\omega_{LB} > 37\,\text{см}^{-1}$ и $\omega_{LB} < 37\,\text{см}^{-1}$ спектры КРС (*b*). Для удобства восприятия спектры разнесены в вертикальном направлении, а интенсивность низкочастотной части увеличена в 5 раз.

отсутствует, а линия моды *LB* сдвинута в сторону низких частот. Согласно данным работы [16], это может указывать на наличие нерегулярной („twisted“) укладки слоев MoS_2 в двухслойной области. Возникновение нерегулярной укладки, как упоминалось выше, может быть связано с нарастанием края одного из островков над другим. Отметим, что прибор 2 продемонстрировал наибольшую величину гистерезиса. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что в качестве зарядовых ловушек, вызывающих появление гистерезиса, наряду с границами кристаллитов также выступают многослойные области или области с нерегулярной укладкой.

Резюмируем вышесказанное. В рамках данной работы была исследована чувствительность CVD-MoS_2 канала фототранзисторных структур к приложенному напряжению затвор–исток. Продемонстрировано, что концентрация носителей заряда более чувствительна к изменению напряжения на затворе для структур MoS_2 с неболь-

шим включением двуслойных областей. С увеличением доли двуслойных включений и появлением включений с нерегулярной укладкой модуляция концентрации носителей затвором значительно снижается. Сделано предположение о том, что это обусловлено безызлучательной рекомбинацией носителей на зарядовых ловушках. Наличие ловушек носителей заряда связано с появлением гистерезиса на выходных ВАХ, что необходимо для создания мемристорных приборов, однако также приводит к уменьшению фоточувствительности за счет уменьшения отношения сигнал/шум в фототранзисторах на основе MoS_2. Полученные нами данные потенциально могут способствовать созданию методик отбора транзисторных структур с нужными характеристиками на основе поликристаллического CVD-MoS_2 для их дальнейшего применения в нейроморфных схемах, собранных на одном чипе. Вопрос о природе зарядовых ловушек и их связи с границами кристаллитов, областями с нерегулярной укладкой или другими факторами является темой дальнейших исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] V. Kurtash, H.O. Jacobs, J. Pezoldt. Phys. Status Solidi A, **220**, 2200893 (2023). DOI: 10.1002/pssa.202200893

[2] S. Kang, J. Lee, M. Kang, Y. Song. Electronics, **9**, 8 (2020). DOI: 10.3390/electronics9081268

[3] A. Morteza Najarian, M. Vafaie, B. Chen, F.P. García De Arquer, E.H. Sargent. Nature Rev. Phys., **6**, 219 (2024). DOI: 10.1038/s42254-024-00699-z

[4] O. Lopez-Sanchez, D. Lembke, M. Kayci, A. Radenovic, A. Kis. Nature Nanotechnol., **8**, 497 (2013). DOI: 10.1038/nnano.2013.100

[5] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, A. Kis. Nature Nanotechnol., **6**, 147 (2011). DOI: 10.1038/nnano.2010.279

[6] S. Najmaei. Nature Materials, 12, 754 (2013). DOI: 10.1038/nmat3673

[7] L. Chua. IEEE Trans. Circuit Theory, **18**, 507 (1971). DOI: 10.1109/TCT.1971.1083337

[8] L. Chua. Semicond. Sci. Technol., **29**, 104001 (2014). DOI: 10.1088/0268-1242/29/10/104001

[9] D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams. Nature, **453**, 80 (2008). DOI: 10.1038/nature06932

[10] J. Bae, J. Won, W. Shim. Nano Energy, **126**, 109646 (2024). DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.109646

[11] N. Kaushik, D.M.A. Mackenzie, K. Thakar, N. Goyal, B. Mukherjee, P. Boggild, D.H. Petersen, S. Lodha. npj 2D Mater. Appl., **1**, 34 (2017). DOI: 10.1038/s41699-017-0038-y

[12] V. Kurtash, S. Mathew, S. Thiele, T. Scheler, J. Reiprich, B. Hahnlein, J. Stauffenberg, E. Manske, S. Narasimha, S. Abedin, H. O. Jacobs, J. Pezoldt. BMoS2MoS2 сб.: *2022 IEEE 22nd Int. Conf. on Nanotechnology (NANO)* (IEEE, Palma de Mallorca, Spain, 2022) p. 527. DOI: 10.1109/NANO54668.2022.9928717

[13] B. Chakraborty, A. Bera, D.V.S. Muthu, S. Bhowmick, U.V. Waghmare, A.K. Sood. Phys. Rev. B: Condens. Matter, **85**, 2 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.85.16140

[14] B. Miller, E. Parzinger, A. Vernickel, A.W. Holleitner, U. Wurstbauer, B. Miller, E. Parzinger, A. Vernickel, A.W. Holleitner, U. Wurstbauer. Appl. Phys. Lett., **106**, 122103 (2015). DOI: 10.1063/1.4916517

[15] J. van Baren, G. Ye, J.-A. Yan, Z. Ye, P. Rezaie, P. Yu, Z. Liu, R. He, C.H. Lui. 2D Mater., **6**, 025022 (2019). DOI: 10.1088/2053-1583/ab0196

[16] X. Zhou, K. Jin, X. Cong, Q. Tan, J. Li, D. Liu, J. Luo. J. Colloid Interface Sci., **538**, 159 (2019). DOI: 10.1016/j.jcis.2018.11.032

Редактор Г.А. Оганесян

Control of charge carrier density in photo-FET structures based on atomically thin CVD-MoS_2

I.A. Eliseyev[1], *V.A. Kurtash*[2], *J. Pezoldt*[2], *V.Yu. Davydov*[1]

[1] Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
[2] FG Nanotechnologie, Institut für Mikro- und Nanelektronik and Institut für Mikro- und Nanotechnologien MacroNano, TU Ilmenau,
100565 Ilmenau, Germany

Abstract Optimization of the properties of two-dimensional semiconductors for their application in various types of electronic devices is one of the most important challenges in modern nanoelectronics. In this paper, the features of controlling the concentration of charge carriers in monolayer and bilayer MoS_2 by changing the gate voltage of the transistor are investigated. The influence of MoS_2 inclusions of two-layer thickness with regular ($3R$) and irregular stacking on the degree of nonlinearity of the current-voltage characteristics and the response of MoS_2 parameters to the gate voltage is investigated.