

07.2

Особенности амплитуды случайного телеграфного шума в транзисторе металл–оксид–полупроводник на основе двумерного дисульфида молибдена

© Х.Ш. Сапаров

Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан
E-mail: xushnudbeksaparov@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 марта 2024 г.

В окончательной редакции 30 апреля 2024 г.

Принято к публикации 9 мая 2024 г.

Проведено моделирование зависимости амплитуды случайного телеграфного шума (СТШ) от напряжения на затворе и положения единичного оксидного ловушечного заряда вдоль канала МОПТ (полевого транзистора с изолированным затвором металл–оксид–полупроводник) на основе двумерного дисульфида молибдена. Показано, что амплитуда СТШ возрастает при напряжениях на затворе, меньших порогового, а на зависимости амплитуды СТШ от положения единичного заряда вдоль канала наблюдается максимум, сдвинутый от центра канала. Такое поведение амплитуды СТШ объясняется наряду с зависимостью от напряжения на затворе ее существенной зависимостью также от напряжения на стоке.

Ключевые слова: двумерный дисульфид молибдена, случайный телеграфный шум, МОПТ, единичный оксидный ловушечный заряд.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.17.58575.19931

Одной из тенденций развития наноэлектроники является масштабирование полевых транзисторов с изолированным затвором металл–оксид–полупроводник (МОПТ) для обеспечения минимальной потребляемой энергии и увеличения степени интеграции в интегральные схемы. В последнее время мнение мировой научной общественности по поводу этой тенденции разделилось на два направления. В первом направлении предполагается, что уменьшение линейных размеров МОПТ до 5–10 nm является физическим пределом [1], а во втором считается, что уменьшение размеров можно продолжать за счет модификации структуры транзистора или использования новых материалов в качестве канала транзистора [2].

В соответствии со вторым направлением одним из предложений для обеспечения возможности дальнейшего масштабирования, в частности, является использование двумерных материалов в качестве канала. Одним из наиболее часто рассматриваемых в этом плане двумерных материалов являются дихалькогениды переходных металлов [3,4]. В частности, экспериментально уже получены МОПТ на основе двумерного дисульфида молибдена (MoS_2) [5]. Монослой дихалькогенидов переходных металлов обладают полупроводниковыми свойствами и не имеют разорванных связей в направлении, перпендикулярном плоскости монослоя [6]. Это является одним из преимуществ двумерных материалов при их применении в качестве канала МОПТ по сравнению с наиболее часто используемым кремнием, так как в этом случае вероятность генерации граничных состояний минимальна. Однако в подзатворных диэлектрических слоях могут наблюдаться состояния, обусловленные оксидными

дефектами, способные захватывать носители заряда, в частности единичные заряды. Эти единичные заряды могут вызвать генерацию случайных телеграфных шумов (СТШ) в стоковых токах МОПТ [7]. До сих пор нет систематических исследований СТШ в МОПТ на основе двумерных материалов, хотя это явление представляется очень важным в работе полевых транзисторов. В связи с этим в настоящей работе моделируется зависимость амплитуды СТШ от напряжения на затворе и положения оксидного единичного ловушечного заряда для МОПТ на основе двумерного MoS_2 . При этом основной задачей является рассмотрение не динамики СТШ, а стационарного состояния после захвата единичного заряда на одиночную оксидную ловушку.

3D-моделирование проводится с помощью программы TCAD Sentaurus (Version O-2018.06, June 2018). При моделировании использовались инструменты Sentaurus Structure Editor (для построения структуры транзистора), Sentaurus device (для проведения моделирования). Рассматривалась беспереходная архитектура МОПТ. Величины параметров транзистора приведены в табл. 1.

Поскольку в базу данных TCAD Sentaurus не включены параметры двумерного MoS_2 , при моделировании использовалась методика, предложенная в работе [8]. В соответствии с этой методикой по данным, полученным в экспериментах, и теоретическим оценкам определялись основные параметры двумерного MoS_2 , которые использовались при моделировании характеристик МОПТ на основе этого материала. Величины параметров, использованных при моделировании, приведены в табл. 2. Параметр моделирования β является подгоночным и

Таблица 1. Значения параметров транзистора

| Материал канала | Толщина канала, nm | Уровень легирования канала, cm^{-3} | Длина затвора, nm | Ширина канала, nm | Толщина подзатворного оксидного слоя SiO_2 , nm | Толщина слоя BOX, nm |
|------------------|--------------------|--|-------------------|-------------------|--|----------------------|
| MoS ₂ | 0.65 | 10^{19} | 20 | 160 | 5 | 54 |

Таблица 2. Значения параметров моделирования

| Подвижность носителя заряда, $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ | Скорость насыщения носителей, cm/s | Параметр моделирования β | Ширина запрещенной зоны материала канала, eV | Эффективная масса электрона в канале, m_0 | Относительная диэлектрическая проницаемость канала |
|--|---|--------------------------------|--|---|--|
| 150 | $1.075 \cdot 10^7$ | 1.6 | 1.8 | 0.463 | 3 |

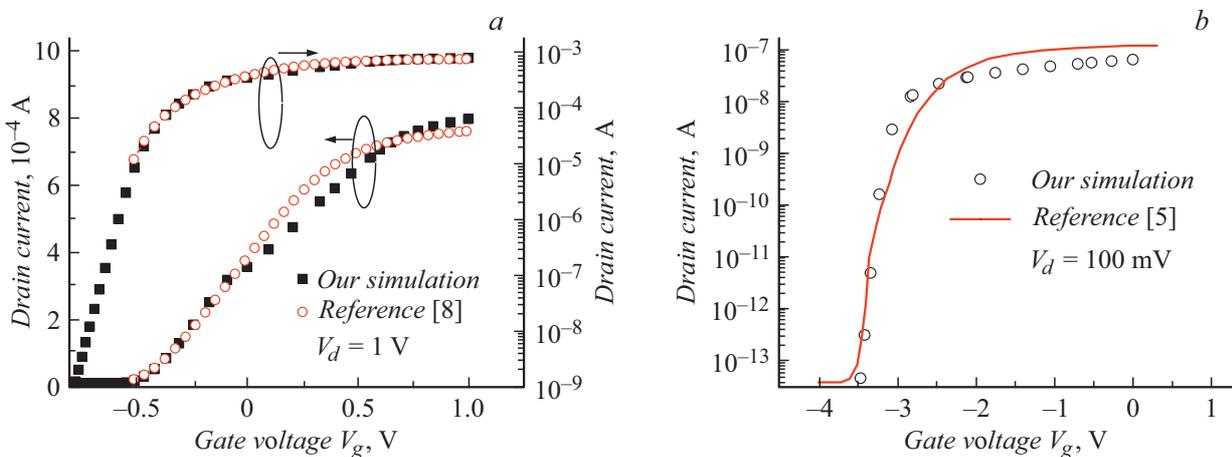


Рис. 1. Сравнение передаточной характеристики моделируемого МОПТ на основе двумерного MoS₂ с результатами моделирования работы [8] (a) и экспериментальными результатами работы [5] (b).

используется в зависимости подвижности носителей от напряженности поля.

При моделировании были учтены параметры зонной структуры используемого материала, зависимость подвижности от уровня легирования и достижение насыщения при высоких полях. Используемая модель была калибрована посредством сравнения полученных на основе указанных выше параметров моделирования передаточных характеристик как с результатами моделирования, проведенного в работе [8], так и с экспериментальными результатами работы [5]. Получено достаточно хорошее согласие (рис. 1). При сравнении в модели были использованы такие же геометрические размеры и материалы, как в сравниваемых транзисторах, приведенных в [5] и [8].

Пороговое напряжение определялось с помощью известной формулы, применяемой для наноразмерных транзисторов: $I_{th} = (W_g/L_g) \cdot 10^{-7}$ А, где I_{th} — ток стока, соответствующий пороговому напряжению, W_g и L_g — ширина и длина затвора соответственно. По этому

току из передаточной характеристики находится пороговое напряжение V_{th} . Амплитуда СТШ определялась как относительное изменение амплитуды тока стока при введении единичного заряда. Единичный оксидный ловушечный заряд моделировался однородно заряженной областью кубической формы согласно методике, предложенной в [9]. В этой работе рассматриваются четыре формы одиночной оксидной ловушки и показано, что амплитуда СТШ практически не зависит от формы ловушки. Поскольку структура рассматриваемого транзистора является планарной, выбрана наиболее удобная (кубическая) форма ловушки из приведенных в указанной работе. Линейный размер заряженной области, захватывающей единичный заряд, принят равным 0.5 nm. На основе использования указанных выше моделей и параметров моделирования получены зависимости амплитуды СТШ от напряжения на затворе при различных положениях L единичного заряда относительно края затвора со стороны истока вдоль канала посередине ширины (рис. 2, a). Из результатов видно, что заметное

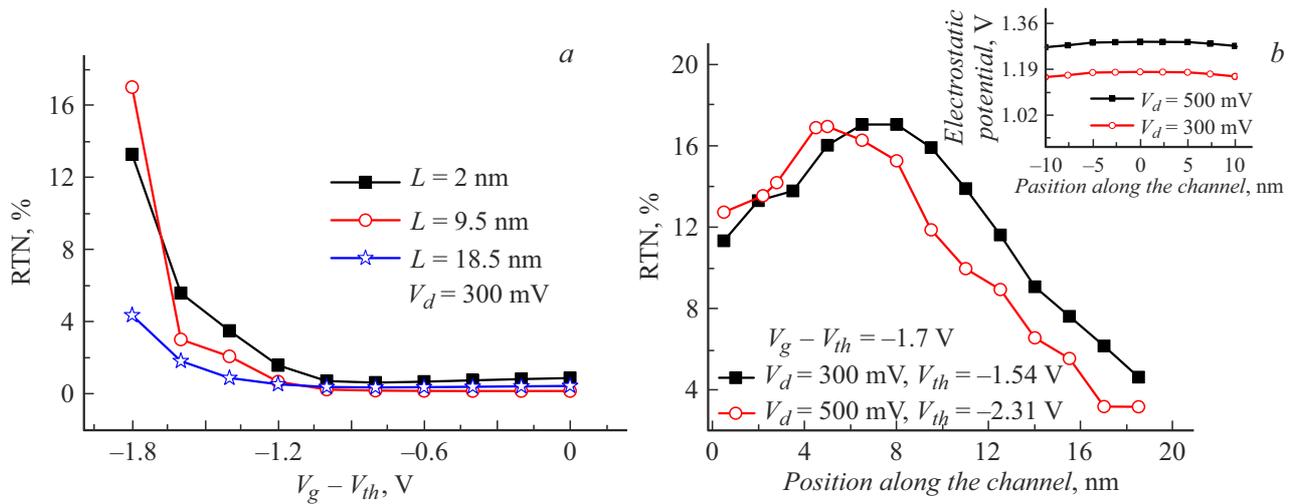


Рис. 2. Зависимость амплитуды СТШ (RTN) от разности напряжения на затворе V_g и порогового напряжения V_{th} при различных положениях L единичного заряда вдоль канала (a) и от положения единичного заряда вдоль канала (b).

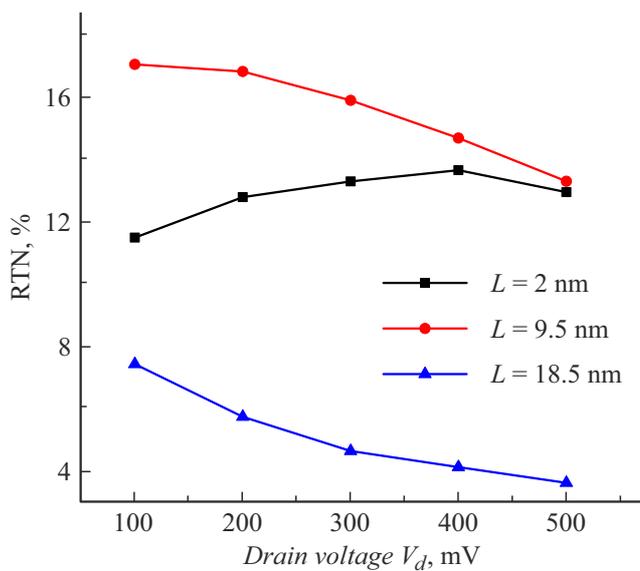


Рис. 3. Зависимость амплитуды СТШ (RTN) от напряжения на стоке при различных положениях L единичного заряда вдоль канала. $V_g - V_{th} = -1.7$ V.

увеличение амплитуды СТШ происходит при напряжениях ниже порогового, как и в транзисторах с объемным каналом. Это, очевидно, связано с более заметным влиянием единичного заряда на ток стока при его малых значениях. Амплитуды СТШ являются соизмеримыми с амплитудами, наблюдаемыми в кремниевых транзисторах с примерно такими же параметрами [7].

Моделировалась также зависимость амплитуды СТШ от положения L единичного оксидного ловушечного заряда относительно истока вдоль канала посередине ширины. Из результатов моделирования видно, что амплитуда СТШ, как и в МОПТ с объемным каналом, уве-

личивается при положениях единичного заряда ближе к центру вдоль канала (рис. 2, b). Но здесь проявляются и свои особенности. В частности, хотя распределение потенциала вдоль канала почти равномерное, с небольшим максимумом в центре (вставка на рис. 2, b), в зависимости амплитуды СТШ от положения единичного заряда наблюдается определенный сдвиг максимума амплитуды СТШ от центра канала в сторону истока.

Кроме того, на рисунке заметна также зависимость амплитуды СТШ от величины напряжения на стоке. Результаты моделирования зависимости амплитуды СТШ от напряжения на стоке при различных положениях единичного заряда приведены на рис. 3. Очевидно, сдвиг максимума и зависимость амплитуды от напряжения на стоке наряду с влиянием поля единичного заряда связаны также с влиянием поля, направленного вдоль канала между истоком и стоком, обусловленного разностью потенциалов между истоком и стоком, на ток стока.

Таким образом, из результатов моделирования можно заключить, что в МОПТ на основе двумерного MoS_2 зависимость амплитуды СТШ от напряжения на затворе имеет такой же характер, как и в транзисторах на основе объемных полупроводников. Но в зависимости амплитуды СТШ от положения единичного оксидного ловушечного заряда вдоль канала максимум распределения в двумерных МОПТ в отличие от объемных транзисторов сдвинут от центра, что, очевидно, связано с зависимостью амплитуды СТШ также от напряжения на стоке. Поэтому, очевидно, при проектировании необходимо учитывать, каким будет рабочее напряжение на стоке проектируемого транзистора. Выбор рабочего напряжения на стоке для снижения амплитуды СТШ зависит от локализации единичного заряда вдоль канала. Если единичный заряд локализовался в области около стока, что может иметь место при эффекте инжекции горячих носителей, или около центра, что может иметь

место при больших рабочих напряжениях на затворе, напряжение на стоке желательно выбирать сравнительно большим. При локализации заряда около истока амплитуда СТШ сравнительно слабо зависит от напряжения на стоке. Кроме того, как видно из рис. 2, *a*, существенная амплитуда СТШ проявляется в подпороговой области, поэтому будет целесообразным учитывать этот факт при разработке схем, предназначенных для подпороговой логики.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.J. Wardynski, *End of Moore's law — what's next for the future of computing* [Электронный ресурс]. <https://www.brainspire.com/blog/end-of-moores-law-whats-next-for-the-future-of-computing> (Published December 19, 2019).
- [2] S.K. Moore, *Spectrum*, **56** (6), 9 (2019). DOI: 10.1109/MSPEC.2019.8727133
- [3] Y. Yoon, K. Ganapathi, S. Salahuddin, *Nano Lett.*, **11** (9), 3768 (2011). DOI: 10.1021/nl2018178
- [4] H. Fang, S. Chuang, T.C. Chang, K. Takei, *Nano Lett.*, **12** (7), 3788 (2012). DOI: 10.1021/nl301702r
- [5] B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, A. Kis, *Nat. Nanotechnol.*, **6**, 147 (2011). DOI: 10.1038/nnano.2010.279
- [6] J. Kang, W. Liu, D. Sarkar, D. Jena, K. Banerjee, *Phys. Rev. X*, **4** (3), 031005 (2014). DOI: 10.1103/physrevx.4.031005
- [7] J.P. Campbell, L.C. Yu, K.P. Cheung, J. Qin, J.S. Suehle, A. Oates, K. Sheng, in *2009 Proc. of the IEEE Int. Conf. on IC design and technology* (IEEE, 2009), p. 17–20. DOI: 10.1109/ICICDT.2009.5166255
- [8] Z. Geng, *Simulation of graphen nanoribbon and MoS₂ transistors*, master thesis (Technical University Ilmenau, Ilmenau, 2016).
- [9] A.E. Atamuratov, M.M. Khalilloev, A. Yusupov, A.J. García-Loureiro, J.C. Chedjou, K. Kyandoghere, *Appl. Sci.*, **10** (15), 5327 (2020). DOI: 10.3390/app10155327