

УДК 519.6

ЗАРЯДОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ С ДВУМЕРНЫМ КАНАЛОМ, ВЫЗВАННАЯ ИНТЕРФЕЙСНЫМИ СОСТОЯНИЯМИ

Мельникова В.В.¹, Курапцова А.А.²

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь, ¹vitaemaximus@gmail.com, ²anku21qwerty@gmail.com

Аннотация: Получены закономерности зарядовой неустойчивости транзисторной структуры с двумерным каналом, вызванной интерфейсными состояниями, в которой в качестве материала двумерного канала рассматривается дихалькогенид переходного металла (ДПМ). Рассмотрено влияние на электрофизические параметры транзисторной структуры с двумерным полупроводниковым каналом ширины запрещенной зоны материала канала, толщины подзатворного диэлектрика, емкости интерфейсных состояний. Показано, что в условиях неустойчивости, вызываемой ростом емкости интерфейсных состояний, зависимости химического потенциала, концентрации электронов от потенциала полевого электрода имеют скачкообразный вид. Такой эффект обусловливается рассогласованием электронейтральности и статистики Ферми-Дирака.

Ключевые слова: транзисторная структура, двумерный канал, электрохимический потенциал, квантовая емкость, зарядовая неустойчивость, интерфейс, бистабильность.

I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением создания нового поколения элементной базы устройств обработки и передачи информации кроме решения технологических проблем является разработка энергоэффективных приборов микро- и нанoeлектроники, что требует непрерывного совершенствования моделей и алгоритмов для их проектирования и функционирования. Соответствующие перспективы связываются с применением двумерных материалов в качестве проводящих каналов [1]. Транзисторы с двумерными каналами лишены некоторых недостатков традиционных МДП транзисторов, но они также имеют свои особенности, связанные с механизмами токопереноса и зарядовыми свойствами. Перспективными материалами для двумерных каналов транзисторных структур нового поколения считаются дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), такие как MoS₂, WS₂, MoSe₂ и аналогичные им. Наряду с активным решением технологических проблемы получения двумерных ДПМ необходимым является разработка моделей функционирования транзисторных структур, в которых они выполняют роль проводящих каналов. Режимы функционирования полевого транзистора с двумерным каналом в значительной мере определяются такими электрофизическими параметрами как химический потенциал χ , заряд канала, квантовая емкость канала, емкости канала и затвора, емкость интерфейсных состояний C_{it} . Эти параметры влияют друг на друга и в конечном счете определяют электрические выходные характеристики транзистора [2]. Актуальным является исследование взаимовлияния электрофизических параметров транзисторных структур с двумерным каналами с учетом возможности возникновения зарядовых неустойчивостей. В данной работе представлены результаты моделирования возникновения зарядовой неустойчивости в транзисторной структуре с двумерным каналом из MoS₂ с учетом взаимовлияния между химическим потенциалом, концентрацией носителей заряда, зарядом канала, квантовой емкостью, емкостями канала и затвора, потенциалом полевого электрода, емкостью подзатворного диэлектрика, емкостью состояний на интерфейсах.

II. МОДЕЛЬ

Моделируемая транзисторная структура содержит канал из двумерного кристалла из ДПМ, полевой электрод, отделенный от канала подзатворным диэлектриком с емкостью C_{ox} . Концентрация электронов в двумерном канале на единицу площади определяется величиной его химического потенциала согласно статистики Ферми-Дирака

$$n_e(\chi) = \int_{E_c}^{\infty} D(E) f(E - \chi) dE \quad (1)$$

где плотность состояний ДПМ [3]:

$$D(E) = \frac{4\pi m_e}{h^2} \sum_n H(E - E_n) \quad (2)$$

Здесь H – функция Хэвисайда, m_e – эффективная масса электронов, E_n энергия n^{th} – подзоны (основной вклад в концентрацию носителей заряда вносит основное состояние с $n = 0$), E_c – энергия минимума зоны проводимости, h постоянная Планка, f – функция Ферми-Дирака. Для концентрации дырок n_h записывается аналогичное выражение.

С другой стороны, исходя из условия электронейтральности, основное уравнение электростатики для двумерного канала определяется взаимосвязью между концентрацией носителей заряда и химическим потенциалом посредством потенциала полевого электрода с учетом емкостей подзатворного диэлектрика и интерфейсных состояний [2]

$$\chi \left(1 + \frac{C_{it}}{C_{ox}} \right) + \frac{q^2 n_s(\chi)}{C_{ox}} = qU_G \quad (3)$$

где U_G – потенциал полевого электрода, $n_s = n_e - n_h$, q – элементарный заряд.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения расчетов были использованы следующие величины параметров транзисторной структуры с двумерным каналом: температура $T = 300$ К, ширина запрещенной зоны материала двумерного канала, $E_g = 0,22-0,312$ эВ, удельная емкость подзатворного диэлектрика $9,43 \times 10^{-4}$ Ф/м², удельная емкость интерфейса $C_{it} = (3-4) \times 10^{-3}$ Ф/м², потенциал полевого электрода $U_G = 0 - 5$ В, эффективная масса электронов $(0,45-0,56)m_0$. Здесь m_0 – масса свободного электрона.

Полученные результаты показали, что с увеличением потенциала полевого электрода и варьировании ширины запрещенной зоны химический потенциал при наличии неустойчивости изменяется скачкообразно, рис.1 (кривые 1–6 получены при различной ширине запрещенной зоны E_g/kT : 8,45 (кривая 1); 9,0 (2); 10,0 (3); 12,0 (4). Переход к неустойчивости и возникновению скачков на $\chi(U_G)$ происходит при росте емкости C_{it} с 3×10^{-3} Ф/м² до $3,7 \times 10^{-3}$ Ф/м².

При этом, с ростом ширины запрещенной зоны и постоянных величинах емкости подзатворного диэлектрика и интерфейса C_{it} пороговое значение потенциала U_{Gt} , при котором происходит резкое изменение $\chi(U_G)$ уменьшается с 4,95 до 1,95 В. Однако изменение U_{Gt} наблюдается только при росте E_g/kT с 8,45 до 12, а при $E_g/kT \geq 12$, значение U_{Gt} практически не меняется и составляет 1,9–2,0 В (k – постоянная Больцмана).

Зависимости концентрации n_e от U_G аналогичны зависимостям $\chi(U_G)$, т.е. также имеют скачкообразный характер, отражающий наличие зарядовой неустойчивости, рис.2. Величины пороговых потенциалов U_{Gt} аналогично зависят от ширины запрещенной зоны, но при этом более резко выражены полки при $U_G < U_{Gt}$: наблюдается снижение концентрации при росте E_g/kT до 12. При $U_G > U_{Gt}$ значения выхода $n_e(U_G)$ в область монотонности снижаются с $2 \cdot 10^{12}$ до $4,5 \cdot 10^{11}$ см⁻² с ростом E_g/kT до 12.

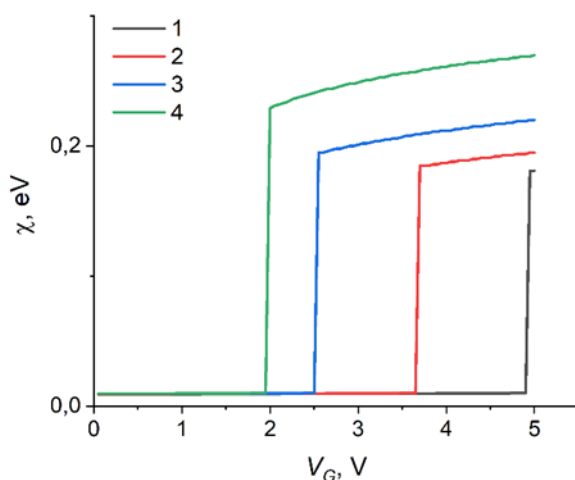


Рисунок 1. Зависимость химического потенциала от потенциала полевого электрода

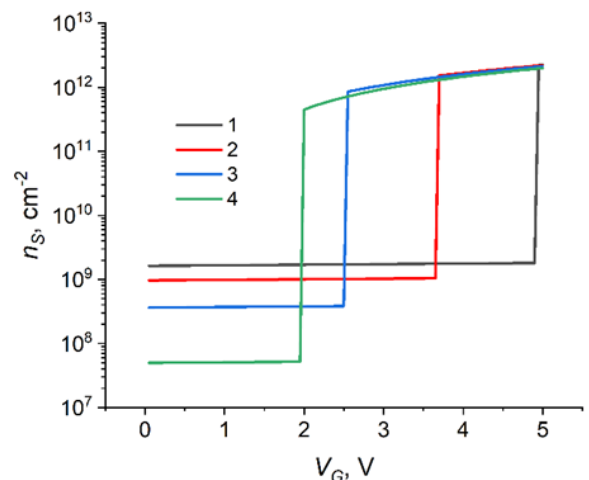


Рисунок 2. Зависимость концентрации электронов от потенциала полевого электрода

Из полученных результатов следует, что скачкообразное изменение химического потенциала и концентрации электронов происходит при определенной критической величине потенциала полевого электрода U_{Gt} . При $U_G < U_{Gt}$ и $U_G > U_{Gt}$ зависимости $\chi(U_G)$ и $n_e(U_G)$ носят монотонный характер без наличия особенностей. Таким образом, рост потенциала полевого электрода при $U_G > U_{Gt}$ способствует преодолению неустойчивости и наблюдается монотонный рост параметров $\chi(U_G)$ и $n_s(U_G)$, но уже при существенно иных значениях.

Преодоление неустойчивости означает переход в другую область соотношений параметров, обеспечивающих самосогласование при $U_G > U_{Gt}$. Возникновение неустойчивости может быть связано с тем, что существенное увеличение соотношения емкостей C_{if}/C_{ox} приводит к появлению сингулярности в решении системы (1)-(3) в некоторой критической точке, определяемой величиной потенциала полевого электрода U_{Gt} . Физически это связано с тем обстоятельством, что рост емкости интерфейса ведет к рассогласованию условия электронейтральности и статистики Ферми-Дирака при определенном значении потенциала U_G по причине, ограниченной плотности состояний $D(E)$, из-за чего и возникает зарядовый дисбаланс.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное моделирование взаимовлияния электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом в условиях неустойчивости показало, что зависимости химического потенциала и концентрации электронов от потенциала полевого электрода в условиях неустойчивости носят скачкообразный характер, порог которого зависит от ширины запрещенной зоны, емкости интерфейсных состояний и емкости подзатворного диэлектрика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Liu, Y. Promises and prospects of two-dimensional transistor / Y. Liu, X. Duan, H.J. Shin / Nature 591. – 2021. – P. 43–53.
- [2] Makovskaya, T.I. Charge properties of the MOS transistor structure with the channel made from a two-dimensional crystal/ T.I. Makovskaya et al. // Russian Microelectronics. – 2020. – Vol.49, No.7. – P.507–515.
- [3] Jiménez, D. Drift-diffusion model for single layer transition metal dichalcogenide field-effect transistors / D. Jiménez // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol.101, Iss. 24. – P. 243501.

CHARGE INSTABILITY OF A TRANSISTOR STRUCTURE WITH A TWO-DIMENSIONAL CHANNEL CAUSED BY INTERFACE STATES

V.V. Melnikova¹, H.A. Kuraptsova²

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
vitaemaximus@gmail.com, anku21qwerty@gmail.com

Abstract: Regularities of charge instability of transistor structure with two-dimensional channel caused by interface states, in which transition metal dichalcogenide (TMD) is considered as a material of two-dimensional channel, are obtained. It is shown that under the conditions of instability caused by the growth of the interface states capacitance, the dependences of the chemical potential, electron concentration from the field electrode potential have a jump-like form. The obtained results are explained by the fact that under the conditions of instability the growth of the interface state capacitance leads to the mismatch of the electroneutrality condition and Fermi-Dirac statistics.

Keywords: transistor structure, two-dimensional channel, electrochemical potential, quantum capacitance, charge instability, interface, bistability.