

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ТРАНЗИСТОРНОЙ МОП-СТРУКТУРЕ С 2D-КАНАЛОМ

Маковская Т.И., Кривошеева А.В., Шапошников В.Л., Данилюк А.Л.\*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
220013 Минск, П. Бровки 6

\**danilyuk@nano-center.org*

Прогресс в применении полевых транзисторов, связанный в первую очередь с повышением эффективности и быстродействия, достигается при использовании двумерных кристаллических полупроводниковых материалов. Такие транзисторы лишены некоторых отрицательных эффектов, проявляющихся в традиционных МОП-транзисторах при уменьшении их размеров [1]. Наибольший практический интерес представляют двумерные (2D) кристаллы из дихалькогенидов тугоплавких металлов (ДТМ) толщиной в один или несколько мономолекулярных слоев. Они обладают, в зависимости от состава и толщины, запрещенной зоной  $E_g = 1-2$  эВ и подвижностью электронов  $\mu_0 = 60-500$  см<sup>2</sup>/(В·с), что при их использовании в качестве канала МОП-транзистора обеспечивает эффективную работу таких приборов в СВЧ-диапазоне и при повышенных температурах. Существующие проблемы использования двумерных кристаллов связаны как с технологией их создания, так и с режимами их функционирования [2,3].

В данной работе исследованы взаимосвязи электрофизических параметров в однозатворной транзисторной структуре с каналом из 2D-кристалла и проведено моделирование электрических переходных и выходных характеристик такой структуры с учетом выявленных взаимосвязей. Расчеты по предложенным моделям выполнены для 2D-ДТМ, характеризующихся шириной запрещенной зоны от 0,25 до 2,1 эВ: MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>, ZrSe<sub>2</sub>, HfSe<sub>2</sub>, PtTe<sub>2</sub> [4]. Объектом рассмотрения является МОП-транзисторная структура, включающая расположенные на плоской подложке исток, 2D-кристалл в качестве канала, полевой затвор на нем, отделенный оксидным диэлектриком, и сток.

Концентрация носителей заряда определяется с помощью выражения [2]

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

с плотностью состояний  $D = 4\pi m/h^2$ , где  $m$  – эффективная масса носителя заряда;  $h$  – постоянная Планка;  $f(E - \mu)$  – функция Ферми-Дирака;  $E_c$  – энергия минимума зоны проводимости. Значение химического потенциала  $\mu$  определяется из условия электронейтральности с учетом наличия внешних электрических полей. Для структуры с одним полевым электродом условие электронейтральности может быть записано при отсутствии заряженных дефектов в подзатворном диэлектрике и при постоянной плотности поверхностных состояний (ПС) на границе подзатворного диэлектрика и 2D-кристалла, в следующем виде [3]

$$\mu = \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_{it}} (qV_G - qV_{G0} - qV) - \frac{qQ_s}{C_{ox} + C_{it}}, \quad (2)$$

где  $V$  – электростатический потенциал,  $V_G$  – потенциал полевого электрода,  $V_{G0}$  – потенциал плоских зон,  $Q_s$  – удельный заряд в канале,  $C_{ox}$  – удельная емкость подзатворного диэлектрика,  $q$  – заряда электрона,  $C_{it}$  – удельная ёмкость ПС.

Важными параметрами транзистора с каналом из 2D-кристалла являются емкость исток-затвор  $C_G = (C_Q + C_{it}) / [1 + (C_Q + C_{it}) / C_{ox}]$  (емкость затвора) и емкость канала  $C_{CH} = C_Q / [1 + (C_Q + C_{it}) / C_{ox}]$ . Здесь  $C_Q = qdQ_s/d\mu$  – квантовая емкость.

Для описания передаточных и выходных характеристик транзистора используем диффузионно-дрейфовую модель. Конкретизация выражения для тока канала зависит от механизмов насыщения. Для структур с длинным ( $L > 1$  мкм) каналом насыщение тока обусловлено механизмом электростатического запираания потока носителей заряда. В этом случае ток в канале при постоянной температуре может быть выражен через градиент химического потенциала [2,3]. Полученное выражение для тока канала имеет вид

$$J_D = \frac{W}{L} u_0 \left[ \kappa \frac{m(kT)^2}{\pi(\hbar/2\pi)^2} \left( \frac{E_c(\mu_D - \mu_S)}{(kT)^2} + Li_2 \left( -\exp \left( \frac{\mu_D}{kT} \right) \right) - Li_2 \left( -\exp \left( \frac{\mu_S}{kT} \right) \right) \right) - \frac{1}{C_{ox}} (Q_{SD}^2 - Q_{SS}^2) \right], \quad (3)$$

где  $Li_2(z)$  – дилогарифм аргумента  $z$ ;  $\kappa = (C_{ox} + C_{it}) / C_{ox}$ ,  $\mu_D$ ,  $\mu_S$  – химические потенциалы канала, определяемые из уравнений (1,2) при  $V = V_D$  и  $V = V_S$  соответственно;  $Q_{SD}$  и  $Q_{SS}$  – заряды в канале, определяемые из уравнения (2) соответственно при  $\mu = \mu_D$  и  $\mu = \mu_S$ ,  $W$  – ширина канала,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

С помощью системы уравнений (1-3) рассчитаны зависимости химического потенциала, концентрации электронов, квантовой емкости, емкостей затвора и канала от потенциала затвора, а также передаточные и выходные характеристики транзисторной структуры, оценены ее крутизна и коэффициент усиления по напряжению.

В рамках предложенной модели установлены самосогласованные связи между электрохимическим потенциалом и шириной запрещенной зоны материала канала, концентрацией носителей заряда и заряда в нем, квантовой емкости, емкости канала и затвора, потенциала полевого электрода, емкости подзатворного диэлектрика и емкости поверхностных состояний. Показано, что для такой структуры характерен рост и выход на насыщение химического потенциала, концентрации электронов и заряда канала с увеличением потенциала полевого электрода. При этом величина потенциала полевого электрода, при которой происходит переход в область насыщения, растет с увеличением ширины запрещенной зоны и уменьшением емкости подзатворного диэлектрика. Для квантовой емкости наблюдается пороговый характер зависимости от потенциала полевого электрода без видимого насыщения. Емкости канала и затвора также имеют пороговый характер, но в отличие от кантовой емкости, переход к насыщению резко выражен.

Полученные закономерности выхода химического потенциала на насыщение с ростом потенциала полевого электрода определяются с одной стороны тем, что рост концентрации электронов (соответственно заряда канала) с увеличением химического потенциала ограничен статистикой Ферми-Дирака. С другой стороны, увеличение заряда канала с ростом заряда полевого электрода (с ростом потенциала  $V_G$ ) также ограничено величиной химического потенциала канала. В последнем случае разность зарядов полевого электрода и канала регулируется химическим потенциалом канала. Это приводит к взаимосвязи зарядов полевого электрода и канала через химический потенциал. Таким образом, химический потенциал выполняет двоякую роль – управляет зарядом канала в соответствии со статистикой Ферми-Дирака и регулирует зарядовый баланс структуры через условие электронейтральности. Влияние ширины запрещенной зоны состоит в уменьшении концентрации электронов в канале, т.е. уменьшении его заряда, что и приводит к соответствующему росту химического потенциала при прочих равных условиях.

Проведены расчеты и проанализированы зависимости, характеризующие взаимосвязи электрофизических параметров. Установлена самосогласованная взаимосвязь заряда канала и химического потенциала (рисунок 1а). Показано, что зависимости квантовой емкости,

емкостей канала и затвора, крутизны и коэффициента усиления по напряжению от заряда канала при варьировании ширины запрещенной зоны вырождаются в одну кривую (стягиваются в одну зависимость) (рисунок 1б). Вырождение указанных зависимостей при варьировании ширины запрещенной зоны обуславливается наличием в рассматриваемой системе полной компенсации снижения заряда канала с увеличением  $E_g$  за счет роста химического потенциала. Таким образом, полученные зависимости отражает наличие в системе самосогласованного изменения электрофизических параметров.

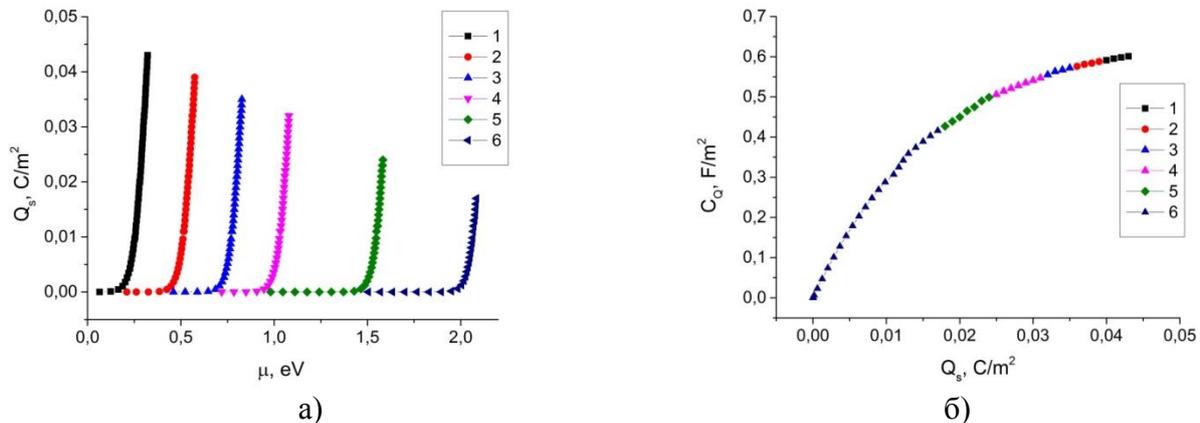


Рисунок 1. Взаимосвязь заряда канала  $Q_s$  с химическим потенциалом (а) и квантовой емкостью (б):  $E_g = 0,26$  эВ (1),  $0,52$  эВ (2),  $0,78$  эВ (3),  $1,04$  эВ (4),  $1,56$  эВ (5),  $2,08$  эВ (6).

Результаты анализа влияния заряда канала на крутизну передаточной характеристики и коэффициент усиления транзистора подтверждают вывод о наличии самосогласованной зарядовой взаимосвязи электрофизических параметров с электрическими характеристиками. Выполненные расчеты крутизны передаточной характеристики и коэффициента усиления такой транзисторной структуры показали, что при типичной ширине запрещенной зоны материала канала из дихалькогенидов тугоплавких металлов в диапазоне  $0,25$ - $2,1$  эВ они могут достигать  $0,1$  мА/В и  $1000$  соответственно, что согласуется с экспериментальными данными [5]. Это делает перспективным данный вид транзисторных структур для применения в цифровой электронике.

- [1] Q.H.Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis, J.N. Coleman, M.S. Strano. Nat. Nanotechnol. 7, 699 (2012).
- [2] W. Cao, J. Kang, W. Liu, K. Banerjee. IEEE Trans. Electron Dev. 61, 4282 (2014).
- [3] D. Jiménez. Applied Physics Letters 101, 243501 (2012).
- [4] A.V. Krivosheeva, V.L. Shaposhnikov, V.E. Borisenko, J.-L. Lazzari, N.V. Skorodumova, B.K. Tay. Int. J. Nanotechnol. 12, 654 (2015).
- [5] T. Finge, F. Riederer, M.R. Mueller, T. Grap, K. Kallis, J. Knoch. Ann. Phys. (Berlin) 529, 1700087 (2017).