

- ниях между источником и подложкой./ С. Ю. Чепкасов и [и др] // Сибирский физический журнал. –2018. –Т.13, № 3. –С .55–60.
3. Robertson, J. Diamond-like amorphous carbon / J. Robertson // Mater. Sci. Eng. R – 2002, – Vol. 37. – P. 129–281.
 4. Boxman, R. L. Macroparticle contamination in cathodic arc coatings: Generation, transport, and control /R. L. Boxman, S. Goldsmith // Surf. Coat. Technol.– 1992.–V. 52.– P. 39–50.
 5. Anders, A. Approaches to rid cathodic arc plasma of macro- and nanoparticles: A review. / A. Anders // Surf. Coat. Technol.– 1999.–Vol. 120-121.–P. 319–330.
 6. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology. / Ed. by R.L. Boxman, D.M. Sanders, Ph.J. Martin. – NJ:Noyes Publications, Park Ridge, 1995.–742 p.
 7. Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition/ Ed. by A. Anders John.– New York: Wiley, 2000.– 736 p.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ С ДВУМЕРНЫМ КАНАЛОМ

Д. А. Подрябинкин, В. В. Мельникова, А. Л. Данилюк

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П.Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: podryabinkin@bsiur.by*

Рассмотрено влияние на электрофизические параметры транзисторной структуры с двумерным полупроводниковым каналом ширины запрещенной зоны материала канала, емкости подзатворного диэлектрика, емкости интерфейсных состояний в зависимости от потенциала полевого электрода. Установлены закономерности, характеризующие взаимосвязи между электрофизическими параметрами транзисторной структуры с двумерным полупроводниковым каналом.

Ключевые слова: двумерный полупроводник; транзисторная структура; электрохимический потенциал; квантовая емкость; взаимосвязь параметров.

INTERRELATION OF THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF A TRANSISTOR STRUCTURE WITH A TWO-DIMENSIONAL CHANNEL

D. A. Podryabinkin, V. V. Melnikova, A. L. Danilyuk

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P.Browka, 6, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: D. A. Podryabinkin (podryabinkin@bsiur.by)*

The effect of the electrical parameters of a transistor structure with a two-dimensional semiconductor channel on the band gap of the channel material, the capacitance of the gate dielectric, and the capacitance of interface states is considered depending on the field electrode potential. Regularities that characterize the relationship between the electrophysical parameters of a transistor structure with a two-dimensional semiconductor channel were established.

Key words: two-dimensional semiconductor; transistor structure; electrochemical potential; quantum capacitance; interrelation between parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень технологий позволяет получать двумерные полупроводниковые кристаллы и формировать транзисторные структуры на их основе, хотя на этом пути еще предстоит решить ряд проблем. Наряду с неоспоримыми преимуществами, использование двумерных полупроводников в твердотельной электронике имеет ряд нерешенных проблем, связанных с режимами их функционирования, так как электрические характеристики таких приборов существенно зависят от ряда электрофизических параметров самой транзисторной структуры и входящих в нее материалов. Существенное влияние на электрические характеристики транзистора с двумерным полупроводниковым каналом оказывает толщины и материалы диэлектрических слоев, свойства подложки и интерфейсов. Эти факторы определяют такие важные электрофизические параметры как электрохимический потенциал носителей заряда, их концентрации, заряд канала, квантовая емкость C_Q , емкость канала C_{CH} и емкость затвора C_G . Указанные параметры обуславливают передаточные и выходные электрические характеристики транзистора с двумерным полупроводниковым каналом, его крутизну и коэффициент усиления по напряжению [1]. Поэтому наряду с совершенствованием технологии получения транзисторов с двумерными полупроводниковыми каналами также актуальным является исследование режимов их функционирования, особенно с точки зрения влияния на них электрофизических параметров самой структуры. Таким образом, моделирование электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным полупроводником, а также исследование влияния указанных параметров на основные электрические характеристики такой транзисторной структуры является актуальным.

Целью работы является определение взаимосвязи электрохимического потенциала, концентрации носителей заряда, квантовой емкости, емкости канала и затвора с потенциалом полевого электрода, емкостью подзатворного диэлектрика, емкостью состояний на интерфейсах транзисторной структуры.

МОДЕЛЬ

Рассмотрим полевую транзисторную структуру с двумерным полупроводниковым каналом и полевым электродом (затвором), отделенным диэлектриком. В качестве материала двумерного полупроводникового канала могут использоваться дихалькогениды переходных металлов: MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 , WSe_2 , $ZrSe_2$, $HfSe_2$, $PtTe_2$ [2]. Концентрация электронов на единицу площади двумерного полупроводника имеет вид

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

где плотность состояний [3]

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

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, μ – электрохимический потенциал, f – функция Ферми-Дирака. Для концентрации дырок n_h записывается аналогичное выражение. Связь между концентрацией носителей заряда в канале, электрохимическим потенциалом μ , концентрацией носителей, емкостью

подзатворного диэлектрика и емкостью интерфейсных состояний самосогласованно определяется уравнением электростатики [4]:

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

где V_G – потенциал полевого электрода, $n_s = n_e - n_h$, C_{ox} – удельная емкость подзатворного диэлектрика, q – элементарный заряд, C_{it} – удельная ёмкость интерфейсных состояний, величину которой в рассматриваемом случае двумерного канала определяется положительно заряженными дефектами в материале диэлектрика.

Система уравнений (1)–(3) самосогласованным образом определяет зависимости концентрации носителей заряда и электрохимического потенциала от потенциала полевого электрода V_G , а также емкости диэлектрика и емкости интерфейсных состояний. В конечном итоге она определяет самосогласованную взаимосвязь всех электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом.

Для построения эквивалентных (электрических) схем транзисторов с двумерным полупроводниковым каналом определяют емкость исток-затвор C_G (емкость затвора) и емкость канала C_{CH} . Отсутствие обеднённой области, существующей в традиционных кремниевых МОП-структурах, ведёт к уменьшению паразитных параметров. На низких частотах ёмкости затвора и канала могут быть определены следующим образом [4]:

$$C_G = \frac{d(n_s + N_t)}{dV_G} = \frac{C_Q + C_{it}}{1 + (C_Q + C_{it})/C_{ox}}, \quad (4)$$

$$C_{CH} = \frac{d(n_e + n_h)}{dV_G} = \frac{C_Q}{1 + (C_Q + C_{it})/C_{ox}}, \quad (5)$$

где $C_Q = q (dn_s/d\mu)$ – квантовая емкость. Отличительной чертой транзистора с двумерным каналом является важная роль квантовой ёмкости, связанной с видом энергетической зависимости плотности состояний в двумерном полупроводнике.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Используемые численные значения параметров транзисторной структуры при проведении расчетов: ширина запрещенной зоны двумерного полупроводника, E_g $E_g = 0,26 - 0,65$ эВ, удельная емкость подзатворного диэлектрика $(0,03-4)10^{-3}$ Ф/м², удельная емкость $C_{it} = (1-5)10^{-3}$ Ф/м², потенциал полевого электрода $V_G = 0-5$ В, эффективная масса электронов $(0,45-0,56)m_0$. Рассчитаны зависимости электрохимического потенциала канала μ , концентрации электронов, квантовой емкости, емкости затвора и канала от потенциала полевого электрода V_G при различных значениях ширины запрещенной зоны E_g емкости подзатворного диэлектрика C_{ox} , емкости C_{it} . Для расчетов рассматриваем только область концентраций электронов, соответствующих $V_G > 0$, $n_e \gg n_h$.

Результаты расчетов показали, что с ростом потенциала полевого электрода величина электрохимического потенциала монотонно возрастает, причем можно выделить две характерные области: резкий подъем и сравнительно медленный рост. При больших V_G , когда $n_e(\mu)$ выходит на насыщение, величина μ становится прямо про-

порциональной потенциалу V_G с коэффициентом $(1+C_{it}/C_{ox})^{-1}$. На рис.1 приведены зависимости заряда канала от электрохимического потенциала $Q(\mu)$. Как можно видеть они сдвигаются по оси μ с ростом ширины запрещенной зоны. Результаты расчета величины удельной квантовой емкости канала C_Q показали, что ее величина при $V_G = 5$ В достигает значений $0,25$ Ф/м² при $C_{ox} = 1,77 \cdot 10^{-3}$ Ф/м² и $C_{it}=10^{-3}$ Ф/м². Рост ширины запрещенной зоны, уменьшение удельной емкости подзатворного диэлектрика и увеличение емкости C_{it} приводит к уменьшению величины C_Q . Наибольшее влияние оказывает емкость C_{ox} , E_g и емкость C_{it} оказывают существенно меньшее влияние на C_Q .

Получены зависимости, характеризующие взаимосвязь квантовой емкости и заряда канала, $C_Q(Q)$. При варьировании ширины запрещенной зоны, емкостей C_{ox} и C_{it} эти зависимости $C_Q(Q)$ вырождаются в одну кривую (стягиваются в одну зависимость), рис. 2. Вырожденная зависимость $C_Q(Q)$ ограничивается максимальными величинами C_{Qmax} . Значения C_{Qmax} определяются соотношениями величин C_{ox} , C_{it} , E_g . Такое поведение зависимости $C_Q(Q)$ можно объяснить наличием в данном случае синхронного изменения заряда канала и его электрохимического потенциала при варьировании C_{ox} , C_{it} , E_g . Такая синхронность обуславливается наличием самосогласования концентрации носителей заряда и электрохимического потенциала из-за условия электронейтральности транзисторной структуры.

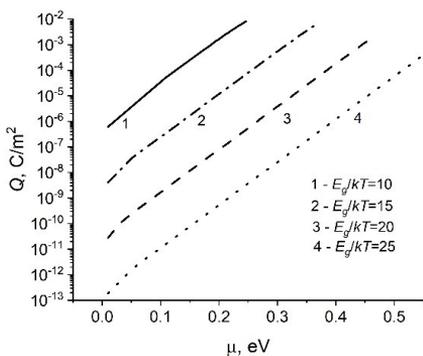


Рисунок 1. Зависимость заряда канала из двумерного кристалла от его электрохимического потенциала при различных E_g

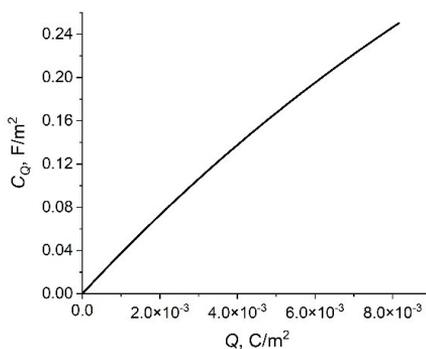


Рисунок 2. Зависимость квантовой емкости транзисторной структуры с каналом из двумерного кристалла от заряда канала

Результаты моделирования емкости затвора и канала при различной ширине запрещенной зоны показали следующее. С ростом V_G емкости C_G и C_{CH} выходят на насыщение, существенно зависящее от C_{ox} и слабо от C_{it} . Зависимость $C_G(V_G)$ характеризуется наличием двух полков с минимальным и максимальным значениями, разделенных областью быстрого роста. Влияние ширины запрещенной зоны состоит в сдвиге переходной области по оси V_G на $0,5-0,7$ В с ростом E_g . Рост C_{ox} в 2 раза ведет к росту C_G в области насыщения также в два раза, а в области минимума в $1,36-$

1,9 раза в зависимости от E_g . Рост емкости C_{it} в 5 раз ведет только к росту минимума C_G на 20% и к сдвигу зависимости $C_G(V_G)$ по оси V_G примерно на 1 В.

Поведение $C_{CH}(V_G)$ аналогично зависимости $C_G(V_G)$. Отличие состоит в отсутствии полки с минимальным значением, т.е. $C_{CH}(V_G)$ характеризуется только областью насыщения. Полученные зависимости, характеризующие взаимосвязь емкости затвора и заряда канала, приведены на рис. 3.

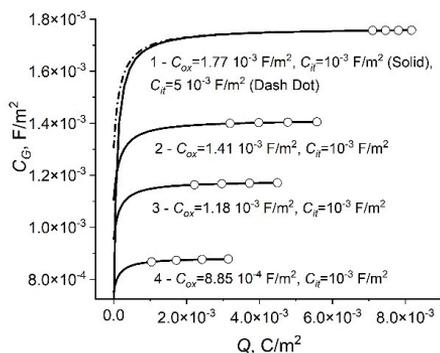


Рисунок 3. Емкость затвора в зависимости от заряда канала при различных емкостях подзатворного диэлектрика и интерфейса. Символами отмечены максимальные значения C_G в зависимости от E_g

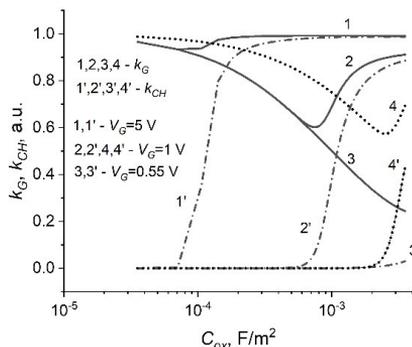


Рисунок 4. Зависимости отношений k_G и k_{CH} от емкости подзатворного диэлектрика:
1, 1', 2, 2', 3', 3' - $C_{it} = 10^{-3} \text{ Ф/м}^2$,
4, 4' - $C_{it} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Ф/м}^2$

При варьировании ширины запрещенной зоны и постоянных значениях C_{ox} и C_{it} они также вырождаются в одну кривую (стягиваются в одну зависимость), характеризующую наличием насыщения. В области насыщения емкость $C_G \approx C_{ox}$. Емкость C_{it} не влияет на насыщение, а только на начальный участок зависимости $C_G(Q)$, рис.3. Аналогичные зависимости характерны и для $C_{CH}(Q)$.

Получены соотношения $k_G = C_G/C_{ox}$ и $k_{CH} = C_{CH}/C_{ox}$ в зависимости от C_{ox} при варьировании значений V_G , E_g , C_{it} , рис. 4. Установлено, что с ростом C_{ox} , k_{CH} растет, стремясь к k_G при больших C_{ox} . При этом зависимости $k_G(C_{ox})$ немонотонные с наличием минимума при некотором значении C_{ox} , который проявляется сильнее при меньших потенциалах полевого электрода. Минимум отношения k_G связан с нелинейностью зависимости $C_G(C_{ox})$ и обусловлен влиянием квантовой емкости.

Отмеченные выше закономерности $\mu(V_G)$ определяются ограничением роста заряда канала с увеличением электрохимического потенциала μ , рост которого также ограничен величиной потенциала полевого электрода и соотношением емкостей C_{it}/C_{ox} . Последняя причина связана с тем, что разность зарядов полевого электрода и канала, регулируемая потенциалом V_G , определяется электрохимическим потенциалом канала. Это приводит к взаимосвязи зарядов полевого электрода и канала через электрохимический потенциал. Таким образом, электрохимический потенциал выполняет двойную 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 элек-

тронов в канале, т.е. уменьшении его заряда, что и приводит к соответствующему росту электрохимического потенциала при прочих равных условиях.

Этими же причинами объясняются и полученные закономерности взаимосвязи квантовой емкости и заряда канала. Вырождение зависимостей квантовой емкости от заряда канала при варьировании ширины запрещенной зоны, емкости подзатворного диэлектрика и емкости интерфейса говорит о наличии в рассматриваемой системе полной компенсации снижения заряда канала с увеличением E_g за счет роста химического потенциала. Таким образом, зависимость квантовой емкости от заряда канала отражает наличие в системе самосогласованного изменения электрофизических параметров. Влияние емкости подзатворного диэлектрика и емкости интерфейса состоит в изменении зарядового баланса структуры.

Использование полученных взаимосвязей электрофизических параметров при моделировании транзисторных структур с каналами из двумерных кристаллов позволяет выявить особенности токопереноса в них и повысить эффективность функционирования таких приборов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены взаимосвязи электрофизических параметров транзисторной структуры с каналом из двумерного полупроводника. Установлены закономерности влияния потенциала полевого электрода, ширины запрещенной зоны двумерного полупроводника, емкости подзатворного диэлектрика и емкости интерфейсных состояний на электрохимический потенциал и заряд канала, его квантовую емкость, емкость затвора и емкость канала. Показано, что квантовая емкость, емкость канала и емкость затвора при постоянных емкостях подзатворного диэлектрика и интерфейса определяются только зарядом канала и не зависят от ширины запрещенной зоны. Установлено, что отношения емкостей затвора и канала к емкости подзатворного диэлектрика носят нелинейный характер и существенно зависят от потенциала полевого электрода. Установленные взаимосвязи объясняются наличием синхронного изменения заряда канала и его электрохимического потенциала при изменении емкости подзатворного диэлектрика, емкости интерфейсных состояний и ширины запрещенной зоны двумерного полупроводника. Такая синхронность вызвана самосогласованием концентрации носителей заряда и электрохимического потенциала, обусловленного условием электронеutrальности транзисторной структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. 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.
2. Чернозатонский, Л.А. Квазидвумерные дихалькогениды переходных металлов: структура, синтез, свойства и применение / Л.А. Чернозатонский, А.А. Артюх // УФН. – 2018. – Т.188, №1. – С.3–30.
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.
4. Zebrev, G.I. Graphene Field Effect Transistors: Diffusion-Drift Theory/ G.I. Zebrev // Physics and Applications of Graphene-Theory. Ed. by S. Mikhailov. – InTech, 2011. – P. 476–498.