

# ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

---

## PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

---

---

PACS numbers: 71.15.Mb, 71.20.-b, 73.22.Pr, 73.23.Ad, 84.32.Ff, 85.35.-p  
DOI: 10.18524/1815-7459.2022.1/2.258445

### ФУНДАМЕНТАЛЬНІ МЕЖІ ДОВЖИН КАНАЛІВ ПРОВІДНОСТІ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ НА МОНОШАРАХ ДИХАЛЬКОГЕНІДІВ ПЕРЕХІДНИХ МЕТАЛІВ

*М. В. Стріха<sup>1,2</sup>, К. О. Корж<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,  
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,  
пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна, тел. (044) 526 0532;

<sup>2</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
пр. Науки, 41, Київ, Україна, тел. (044) 525 6033,  
E-mail: maksym\_strikha@hotmail.com

### ФУНДАМЕНТАЛЬНІ МЕЖІ ДОВЖИН КАНАЛІВ ПРОВІДНОСТІ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ НА МОНОШАРАХ ДИХАЛЬКОГЕНІДІВ ПЕРЕХІДНИХ МЕТАЛІВ

*М. В. Стріха, К. О. Корж*

**Анотація.** В статті проведено моделювання меж функціональності польового транзистора з провідним каналом на основі моношару дихалькогеніду перехідного металу та з різними матеріалами витоку/стоку. Квантовомеханічну прозорість каналного бар'єру розраховано з урахуванням реального вигляду потенціалу такого бар'єру. Показано, що транзистор з 4-нм каналом  $n\text{-MoS}_2$  та контактами витоку/стоку  $\text{MoS}_2$  (металічна модифікація) в області порівняно невеликих напруг на затворі й на стоку ще зберігає достатній рівень функціональності (прозорість бар'єру є меншою від  $1/2$ ). Натомість цей же транзистор для випадку контактів витоку/стоку на основі Pt, коли висота бар'єру Шотткі є суттєво вищою, а прозорість каналного бар'єру – відповідно суттєво меншою, зберігає функціональність і для довжини каналу 2 нм в усьому реалістичному діапазоні напруг на затворі й на стоку. Аналогічний результат одержано й для транзистора з каналом  $p\text{-WSe}_2$  і контактами на основі паладію. Отримані нами оцінки підтверджують реальність створення комплементарного інвертора на основі  $\text{MoS}_2$  транзистора  $n$ -типу і  $\text{WSe}_2$  транзистора  $p$ -типу з ультракороткими довжинами каналів у 2–4 нм.

**Ключові слова:** польовий транзистор, моношар, дихалькогенід перехідного металу, тунелювання, канал, контакти

## FUNDAMENTAL LIMITS FOR THE LENGTH OF CONDUCTION CHANNEL IN THE FET ON TRANSITION METALS DICHALCOGENIDE SINGLE LAYER BASE

*M. V. Strikha, K. O. Korzh*

**Abstract.** The modeling of the limits of functionality for the FET with conduction channel on transition metals dichalcogenide single layer base and with different source/drain contacts material was performed in this article. The quantum mechanical transparency of the channel barrier was calculated with allowance for the realistic form of the barrier potential. It is demonstrated, that the FET with 4-nm channel of n-MoS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub> (metallic modification) source/drain contacts retains high level of functionality for the range of comparatively low gate and drain voltages (the barrier transparency is lower than 1/2). The similar FET with Pt source/drain contacts, when Schottky barrier is essentially higher and the barrier transparency is essentially lower, keep it's functionality for the 2 nm channel as well for all the realistic values of gate and drain voltages. The similar result was obtained for the FET with p-WSe<sub>2</sub> channel and Pd contacts as well. The obtained estimations confirm the possibility of the complementary inverter on MoS<sub>2</sub> *n*-type FET and WSe<sub>2</sub> *p*-type FET with ultra-short channels in 2–4 nm range.

**Keywords:** field effect transistor, single layer, transition metal dichalcogenide, tunneling, contacts

### 1. Вступ. Фундаментальні обмеження для довжин каналів польових транзисторів

Сьогодні процес дальшого масштабування довжин каналів кремнієвих транзисторів MOSFET, які є основою сучасної електроніки, наражається на обмеження фундаментального характеру. Пряме тунелювання носіїв крізь бар'єр дуже короткого каналу призводить до незалежності струму в колі витік-стік від напруги на затворі, а, отже, і до втрати транзистором його функціональності (див. напр. [1]). Оцінка для мінімальної довжини каналу провідності польового транзистора, за якої ймовірність тунелювання крізь бар'єр у наближенні ВКБ все ще не перевищує 1/2, дає формулу:

$$L_{\min} \approx \frac{|\ln(1/2)|}{2} \frac{\hbar}{\sqrt{2m^* E_{\min}}} \quad (1)$$

Тут  $m^*$  – ефективна маса електронів,  $E_{\min} = kT \ln 2$  – мінімальна енергія, необхідна для запису (чи стирання) одного біту інформації [1]. Підстановка в (1) значення ефективної маси для кремнієвого транзистора в площині (001) дає для кімнатної температури  $L_{\min} = 1.2$  нм.

Ще на початку XXI століття було оголошено про створення експериментальних зразків MOSFET із суб-10-нм каналами – спершу порядку 6 нм, а далі й 3 нм [2, 3]. Однак досягнення робочих значень довжин каналів у 5 нм виявилось тривалим процесом, і перші такі транзистори фірма «Samsung» почала випускати лише в 2019 році [4], а надійних функціональних транзисторів із 3 нм каналами досі не створено.

Як показано в [5], однією з причин того, що прогнозованого значення мінімальної довжини каналу  $\sim 1$  нм досягнути не вдається, є те, що просту оцінку (1) зроблено без врахування реального вигляду потенціалу в каналі, фактично в припущенні того, що напруги на стоку немає. Проте цей потенціал за умови прикладеного до стоку прямого зміщення вже не прямокутний, а має вигляд асиметричної кривої з максимумом біля витоку (т.зв. точка віртуального витоку). Критичною для класичного проходження бар'єру є порівняно вузька область біля його вершини (в околі віртуального витоку) з довжиною  $l \ll L$ , де потенціал змінюється мало й електричне поле майже відсутнє. Електрон, що зумів пройти крізь цю вузьку об-

ласть, виноситься сильним електричним полем на стік, навіть зазнаючи зіткнень (див. [6, 7]).

Тому реальний потенціал, що відповідає ситуації прикладення напруги  $V$  на стік, у роботі [5] було апроксимовано виглядом, зображеним на рис. 1. Звідси видно, що реально електрону потрібно тунелювати не крізь усю область  $(0, L)$ , а лише крізь область  $(0, x_0)$ , яка вужчає зі збільшенням напруги на стоку  $eV$ . Це призводить до того [5], що реально мінімальні довжини каналів, для яких імовірність тунелювання не перевищує принаймні значення  $1/2$ , є приблизно втричі більшими, ніж випливає з оцінки (1).

Виходячи з цього, природа труднощів, які упродовж майже двох десятиліть не дозволяють створити функціональні кремнієві транзистори з довжиною каналу, меншою від 5 нм, стає зрозумілою – це пов’язано з фундаментальними обмеженнями, зумовленими тунелюванням крізь бар’єр, і не може бути виправлене технологічними вирішеннями. В свою чергу це означає, що граничних можливих меж масштабування традиційної кремнієвої транзисторів MOSFET уже майже досягнуто, і тому гостро постає питання принципів побудови електроніки “More than Moore”, тобто такої, яка

входить у добу, коли емпіричний закон Мура уже перестає діяти.

Одним з варіантів, що розглядається для одержання надкоротких каналів провідності MOSFET, є використання замість традиційних кремнієвих технологій 2D плівок дихалькогенідів перехідних металів (ДПМ), які є прямозонними напівпровідниками з достатньо широкою забороненою зоною (1,8 eV для моношарового  $\text{MoS}_2$ ) [8]. Загальна конструкція такого транзистора дуже проста і зображена на рис. 2. Плівку ДПМ покладено на шар діелектрика, який є водночас і підкладкою. Прикладаючи напругу до затвору, можна регулювати струм у колі між витоком і стоком.

У [9] вперше повідомлено про створення транзистора на основі моношару  $\text{MoS}_2$  на підкладці  $\text{HfO}_2$  (її висока діелектрична проникність 25 пригнічує розсіювання електронів на іонізованих домішках підкладки і дозволяє досягнути в каналі високих значень рухливості  $\sim 200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ). У ролі контактів для такого каналу було використано металеву модифікацію того ж  $\text{MoS}_2$ . Використовують також інші модифікації таких транзисторів, інколи з додатковими затворами, які дозволяють наближати властивості контактів до омичних.

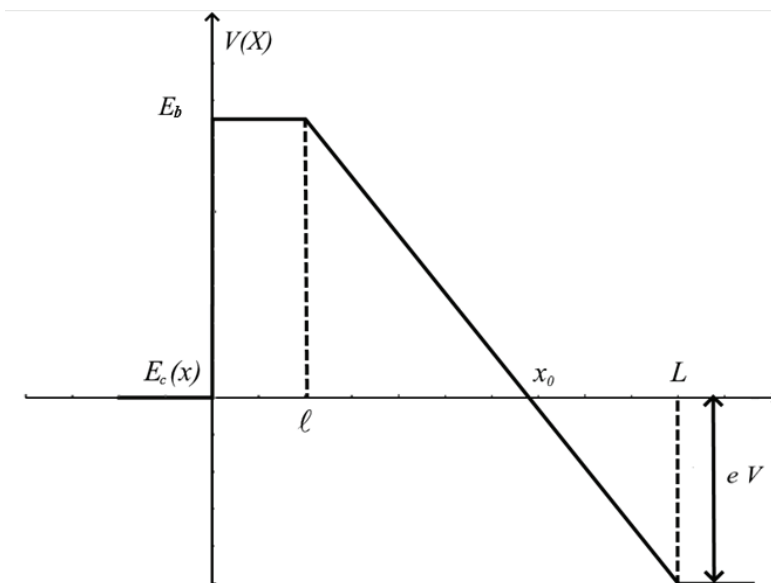


Рис. 1. Апроксимація ходу потенціалу в каналі кремнієвого MOSFET завдовжки  $L$  [5]. Електрони тунелюють крізь бар’єр з витоку на стік зліва направо. На стік прикладено напругу  $V$ .

У роботі [10] з урахуванням реального вигляду бар'єрного потенціалу та виникнення бар'єру Шоттки на тісному контакті між металом витоку і стоку та напівпровідником каналу показано, що достатньо велика ефективна маса електронів у напівпровідниковому моношарі  $\text{MoS}_2$  теоретично дозволяє створити на основі моношару такого матеріалу на підкладці  $\text{HfO}_2$  функціональні транзистори з довжиною каналу 2,5–3 нм, які потенціаль-

но можуть бути використані для новітніх 5G пристроїв.

Однак на шляху створення таких FET зараз стоїть фактична нерозробленість відповідних технологій (на той час, коли існує великий вибір досконало відпрацьованих кремнієвих технологій). Тому питання можливості заміни кремнію іншими матеріалами при створенні робочих FET з ультракороткими каналами досі залишається дискусійним.

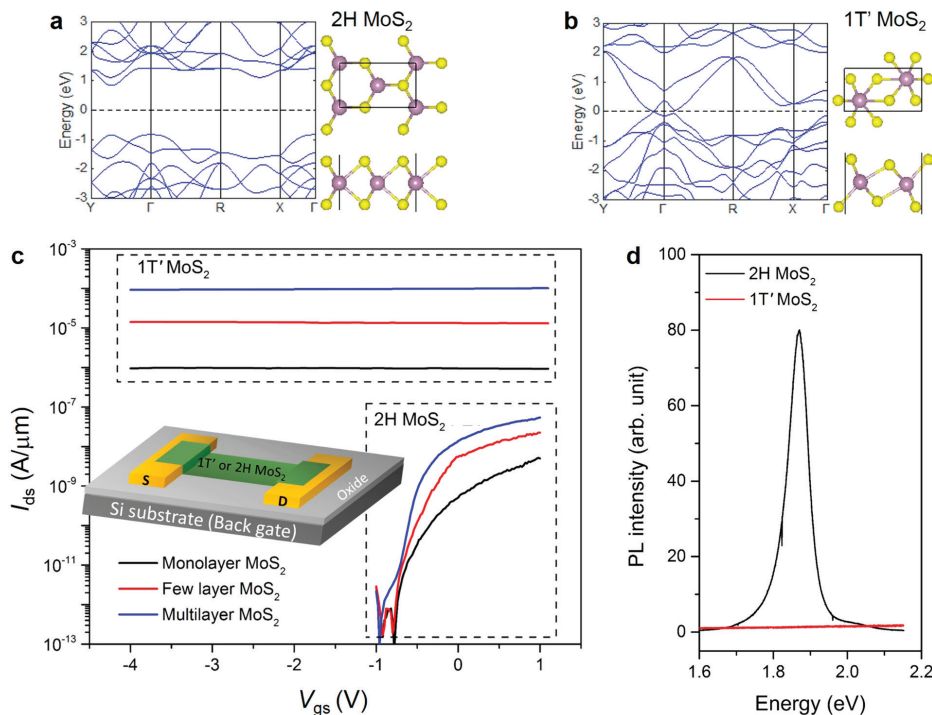


Рис. 2. Транзистор на моношарі  $\text{MoS}_2$  [9] (знизу ліворуч, як підкладку використано кремній). Згори зображено зонні діаграми його напівпровідникової (ліворуч) та металічної (праворуч) модифікацій. Знизу праворуч – фотолюмінесценція з напівпровідникової модифікації виявляє характерний пік з енергією, що відповідає ширині забороненої зони. Для металічної модифікації пік відсутній.

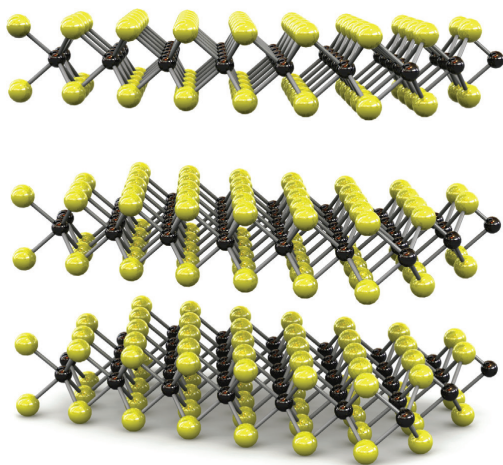
## 2. Фізичні особливості бар'єрів транзисторів на моношарах ДПМ

Протягом останніх років триває активне вивчення надтонких 2D структур дихалькогенів перехідних металів (англійська аббревіатура TMD, або українська ДПМ, загальна формула  $\text{MX}_2$ , де М-метал і Х-халькоген) [11]. Ці структури поєднують граничну тонкість графену з властивостями напівпровідника (сам гра-

фен є напівметалом, або безщілинним напівпровідником, і через те на ньому так і не було створено робочого польового транзистора, оскільки симетрична ВАХ такого пристрою ускладнює створення чітко розрізнених станів ON та OFF). Це призвело до інтенсивних досліджень MOSFET транзисторів на основі 2D (одно- або багатощарових) ДПМ.

На відміну від графену, моношар ДПМ має товщину в три атоми. Один шар атомів

металу (такого, як молібден або вольфрам) розташовується між двома шарами атомів халькогену (рис. 3).



**Рис. 3. Моношари ДПМ (чорна кулька – метал, біла – халькоген) у напівпровідниковій фазі.**

До важливих властивостей ДПМ можна віднести те, що:

- ДПМ не мають центру інверсії, що дозволяє досягти нового ступеня свободи носіїв заряду;
- сильна спін-орбітальна взаємодія в моношарах ДПМ призводить до спін-орбітального розщеплення у сотні меВ у валентній зоні та в декілька меВ у зоні провідності, що дозволяє керувати спіном електрона зміною енергії фотонів лазера;
- моношари  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ,  $\text{MoTe}_2$  є напівпровідниками із прямою забороненою зоною, в яких перехід електрона із зони провідності до валентної зони не супроводжується зміною імпульсу.

Набір таких властивостей призводить до того, що ДПМ відмінно підходять для створення транзисторів в електроніці та випромінювачів і датчиків в оптиці. Але для товстих структур ДПМ, таких, як двошари та тришари, заборонена зона є вже непрямую, і властивості люмінесценції втрачаються, хоч їх використання для транзисторів далі залишається перспективним.

Більшість моношарів ДПМ реалізуються як матеріали  $n$ -типу. Саме такими, зокрема, є транзистори на  $\text{MoS}_2$ , досліджені в [9, 10]. Відсутність функціонального транзистора  $p$ -типу обмежує їх застосування в комплементарній металооксидній напівпровідниковій електроніці. Однак уже в [12] повідомлялося про створення комплементарного інвертора, одного з основних логічних елементів електроніки, який базується на  $\text{MoS}_2$  транзисторі  $n$ -типу і  $\text{WSe}_2$  транзисторі  $p$ -типу. Переваги, надані технологією CMOS і високопровідними каналами ДПМ, дозволили виготовити на одній підкладці комплементарний інвертор з високим коефіцієнтом підсилення 13,7.

У [13] 2D PN-переходи Ван-дер-Ваальса (vdW) на основі ДПМ були використані для створення гетероперехідних діодів, де струм проходить переважно через інтерфейс переходу. Таку структуру переходу було використано для конструювання польових транзисторів (JFET), де можливий як струм у площині моношару, так і струм через інтерфейс 2D-2D гетеропереходу. Було показано, що JFET на основі 2D ДПМ може використовувати як  $p$ -, так і  $n$ -канали для роботи з низькою напругою, що може бути унікальною особливістю такого пристрою. У [13] повідомляється про vdW JFET як пристрій з гетеропереходом між напівпровідниковими  $p$ - та  $n$ -ДПМ. Оскільки такий vdW JFET має низьку концентрацію пасток на інтерфейсі vdW, то, на відміну від польових транзисторів метал-ізолятор-напівпровідник (MISFET), він має й невеликий гістерезис вольт-амперної характеристики. У створеному в [13] пристрої було досягнуто найкращі значення підпорогового розкиду  $\sim 100$  мВ/дек. Робоча порогова напруга затвора була близько 0 В, а найвища рухливість досягала  $\sim 500$   $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  для  $n$ -канального JFET з каналом  $\text{MoS}_2$ . Для 1В JFET операцій найкраще співвідношення струмів увімкнення/вимкнення досягало  $\sim 10^4$ .

При створенні згаданих вище пристроїв особливого значення набувають властивості контактів між провідним каналом та областями витоку і стоку. В оглядовій статті [14] представлені експериментальні та теоретичні

дослідження польових транзисторів на основі 2D матеріалів. У ній описано контакти метал-графен, а також метал-ДПМ. У той час, як контакти метал-графен можна налаштувати напругою відповідного зворотного затвора, контакти метал-ДПМ демонструють сильне закріплення рівня Фермі, що означає неомічність та істотно обмежений максимально можливий струм між витоків і стоком. Далі в [14] докладно розглянуті польові транзистори з  $\text{WSe}_2$ . Використання підкладок із потрібним затвором дозволяє налаштувати виток, канал і стік шляхом застосування відповідної напруги відповідного затвора, щоб пристрій можна було переналаштувати і як для роботи з провідним каналом  $n$ - типу,  $p$ - типу, і як так званий міжсмуговий тунельний польовий транзистор на тому ж шарі  $\text{WSe}_2$ .

У [15] продемонстровано польові транзистори  $p$ - типу на основі бічних гетеропереходів графен- $\text{WSe}_2$ , вирощених за допомогою масштабованого методу CVD. Багат шаровий  $\text{WSe}_2$  перекривається з багат шаровим графеном (MLG) на переходах MLG- $\text{WSe}_2$  таким чином, що контактний опір зменшується. Важливо, що багат шаровий  $\text{WSe}_2$  формується лише в області з'єднання, тоді як канал все ще підтримується як моношаровий  $\text{WSe}_2$  для роботи транзистора. Крім того, шляхом легування графенових витоків та стоків отримують збільшення на 2 порядки співвідношення  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  до  $\sim 10^8$  та характеристики уніполярного  $p$ - типу незалежно від роботи виходу металу в умовах навколишнього повітря. Багат шаровий графен запропоновано як 2D версію нового підходу до створення витоків/стоків в електроніці.

Однак розповсюджені й альтернативні способи створення контактів. У [16] досліджуються 2D польові транзистори з бар'єром Шоттки (SBFET), що містять у площині провідного каналу гетеропереходи між 1T металевою фазою та 2H напівпровідниковою фазою самих ДПМ (такий самий технологічний прийом застосовано дещо раніше і в [9], див. рис. 4). Проведене моделювання показує граничні межі ефективності таких пристроїв і пропонує позиції кращих матеріалів ДПМ для їх створення. Дослідження показує, що висоти

бар'єру Шоттки контактів 1T/2H у площині провідного каналу менші, ніж бар'єри Шоттки позаплощинних контактів. Через атомну товщину моношару ДПМ середній підпороговий розкид SBFET із такими контактами близький до межі 60 мВ/декада і є меншим, ніж у позаплощинного TMD-SBFET пристрою. Робиться прогноз, що в майбутньому на основі  $\text{WTe}_2$ -SBFET буде створено високоефективні транзистори з довжиною каналу до 10 нм, передбачені Міжнародною технологічною картою для напівпровідників.

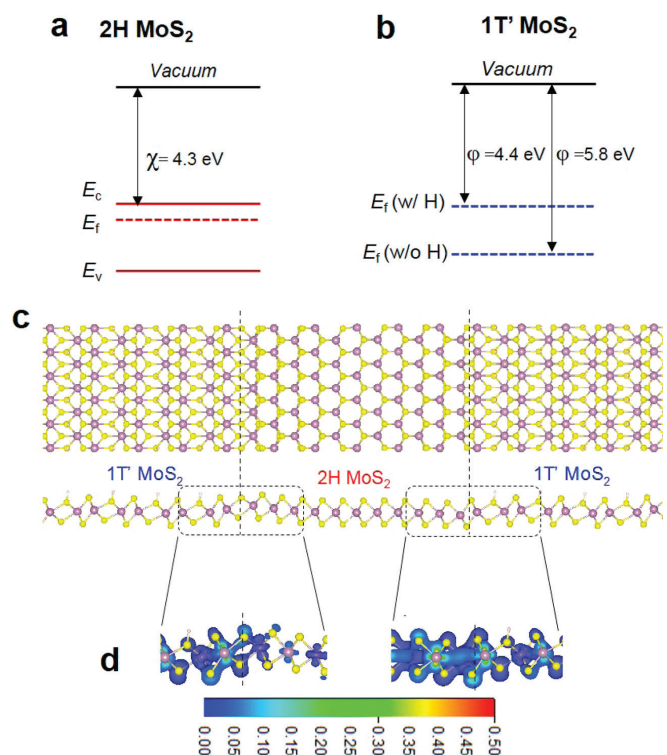


Рис. 4. Контакти між напівпровідниковою і металевими фазами  $\text{MoS}_2$  [9]. Зображено конфігурацію атомів металу і халькогену при погляді згори та збоку.

Таким чином, актуальним стає визначення фундаментальних обмежень для мінімальних довжин каналів польових транзисторів на основі моношару ДПМ як  $n$ -, так і  $p$ - типу. Основним при цьому є питання про форму потенціального бар'єру в каналі такого транзистора при його надкоротких довжинах.

Як відомо, висота бар'єру в каналі традиційного кремнієвого MOSFET визначається

легуванням областей витоку і стоку з одного боку, й підкладки з протилежним типом провідності – з другого, а також температурою [6] (рис. 5а):

$$E_b^{(i)} = kT \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}. \quad (2)$$

Тут  $N_d$ ,  $N_a$  – концентрації донорів та акцепторів,  $n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$ , де  $N_c$ ,  $N_v$  – ефективні густини станів у зоні провідності та в валентній зоні. Реальні значення легування кремнію призводять до величин такого бар'єру в 0,7–0,8 еВ. Натомість за умови рівності робіт виходу напівпровідника каналу і металу контактів витоку і стоку висота бар'єру для електронів у каналі FET на основі  $n$ -моношару ДПМ становить (рис. 5б):

$$E_b^{(n)} = kT \ln \frac{N_c^{(s)}}{N_d^{(s)}}. \quad (3)$$

Зазначмо, що в (3) входять уже 2D концентрації, і ефективна густина станів  $N_c^{(s)} = \frac{m_c kT}{\pi \hbar^2}$ . Для значень концентрацій, характерних для легування ДПМ, висота такого бар'єру суттєво менша від 0,1 еВ [10]. Аналогічно можна записати й вираз для висоти бар'єру для дірок у каналі FET на основі  $p$ -моношару ДПМ (рис. 5в):

$$E_b^{(p)} = kT \ln \frac{N_v^{(s)}}{N_a^{(s)}}; N_v^{(s)} = \frac{m_v kT}{\pi \hbar^2}. \quad (4)$$

Проте в загальному випадку роботи виходу напівпровідника каналу й металу контактів різняться, що призводить до виникнення бар'єру Шотткі (докладніше див. [17]). Висоти потенціальних бар'єрів для електронів і дірок при русі з металу в напівпровідник при цьому становлять:

$$E_{bs}^{(n)} = \Phi_m - e\chi, \quad (5)$$

$$E_{bs}^{(p)} = \Phi_m - (E_g + e\chi). \quad (6)$$

Тут  $\Phi_m$  – робота виходу металу,  $e\chi$  – спорідненість електрона до вакууму в напівпровіднику,  $E_g + e\chi$  – потенціал іонізації напівпровідника. Можливі ситуації для різних співвідношень роботи виходу, спорідненості та потенціалу

Коли спорідненість електрона до вакууму перевищує роботу виходу для контакту металу з  $n$ -напівпровідником, або ж потенціал іонізації менший від роботи виходу для контакту металу з  $p$ -напівпровідником, то виникає так званий від'ємний бар'єр Шотткі (рис. 6, б, д). Для об'ємного контакту така ситуація є бажаною, оскільки робить контакт омичним. Проте, як побачимо далі, для випадку FET на основі моношару ДПМ вона фактично нівелює бар'єр у каналі, а тому робить неможливим керування струмом у колі витік-стік зміною напруги на затворі. Тому такий транзистор

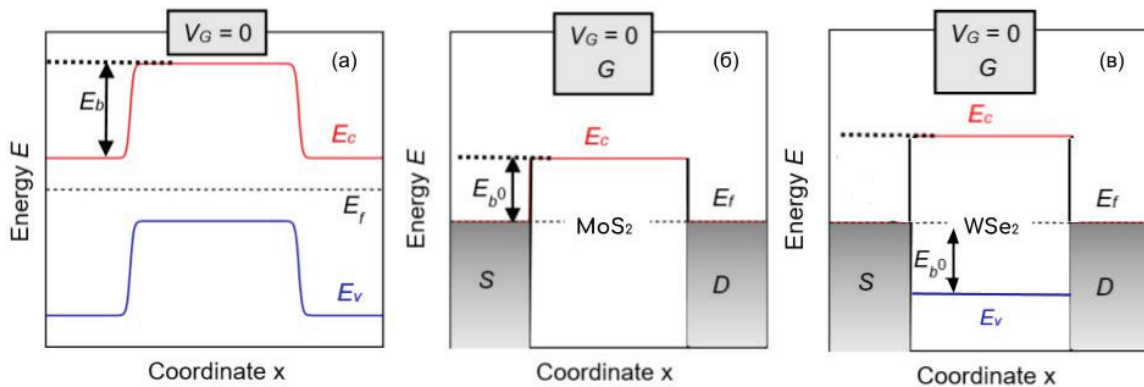
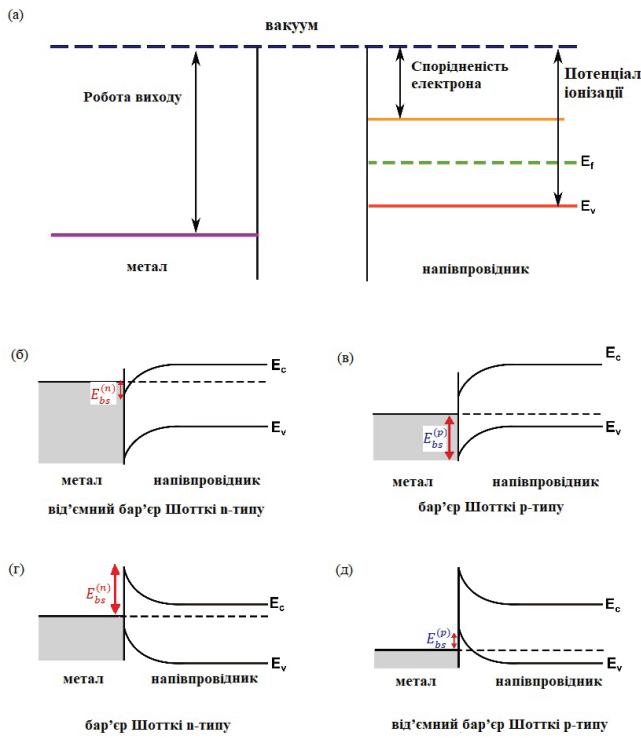


Рис. 5. Бар'єри для електронів і дірок у традиційному кремнійовому MOSFET (а) та в каналі FET на основі  $n$ -моношару (б) та  $p$ -моношару (в) ДПМ (роботи виходу напівпровідника ДПМ каналу і металу контактів вважаємо рівними).



**Рис. 6.** Робота виходу металу, спорідненість електрона до вакууму та потенціал іонізації напівпровідника (а), різні типи бар'єрів Шоттки, які виникають для різних співвідношень цих величин (б – д).

відразу ж позбавлений функціональності і не становить практичного інтересу. Таким чином, надалі ми розглядатимемо випадки стандартних додатних бар'єрів Шоттки (рис. 6, в, г).

Відзначмо, що, коли за нуль відліку енергії обрати рівень Фермі в металі, енергія дна зони провідності напівпровідника *n*-типу в площині контакту описується виразом (5), а в глибині напівпровідника вона має значення (3). Аналогічно енергія вершини валентної зони напівпровідника *p*-типу в площині контакту дорівнює (6), а в глибині напівпровідника вона характеризується значенням (4) (обидва ці значення при цьому беруться зі знаком «мінус»).

У наближенні виснаження (або шару Шоттки) ця зміна потенціалу в напівпровіднику відбувається на проміжку глибини шару Шоттки (див. напр. [18])

$$W_D^{(n,p)} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_o(E_{bs}^{(n,p)} - E_b^{(n,p)})}{e^2N_{d,a}}}. \quad (7)$$

Тут  $\varepsilon_s$  – діелектрична проникність напівпровідника,  $\varepsilon_o$  – діелектрична проникність вакууму,  $N_{d,a}$  – об'ємні концентрації донорів і акцепторів у моношарі ДПМ товщиною  $t_s$ , пов'язані з відповідними поверхневими концентраціями очевидним співвідношенням  $N_{d,a} = N_{d,a}^{(s)} / t_s$ . Реальні значення різниць енергій ( $E_{bs}^{(n,p)} - E_b^{(n,p)}$ ), що входять до (7), є для більшості комбінацій матеріалів і контактів достатньо великими (див. напр. [17]) – порядку кількох десятків еВ. При цьому висота бар'єру Шоттки (5, 6) є значно більшою від значень глибин залягання рівня Фермі (3, 4) для реальних параметрів легування. Для значення ( $E_{bs}^{(n,p)} - E_b^{(n,p)}) = 0.3 \text{ eV}$ ,  $\varepsilon_s = 16$  і для концентрацій донорів/акцепторів у діапазоні  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ – $10^{18} \text{ см}^{-3}$  одержуємо значення величини (7) у діапазоні 1000–10 нм.

Це означає, що при аналізі ультракороткоканалних FET на моношарах ДПМ добрим наближенням для форми бар'єру за нульової напруги на затворі й на стоці є прямокутник з висотою, що описується виразами (5), (6) (див. рис. 5б, в). При прикладенні до стоку напруги  $V_{DS}$ , як показує розв'язок двовимірного рівняння Пуассона [19], глибина каналу, на який потенціал витоку збудує потенціал у каналі, описується параметром

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon_s t_s t_{ox}}{\varepsilon_{ox}}}, \quad (8)$$

куди входить товщина напівпровідникового каналу  $t_s$  та його діелектрична проникність  $\varepsilon_s$  (для моношару  $\text{MoS}_2$  вважатимемо, що  $\varepsilon_s = 5, t_s = 0,7 \text{ нм}$  [9]), а також товщина оксидного прошарку  $t_{ox}$  та його діелектрична проникність  $\varepsilon_{ox}$ . З вигляду (8) видно, що для моношару  $\text{MoS}_2$  при використанні як підкладки діелектрика  $\text{HfO}_2$  з високою діелектричною проникністю  $\varepsilon_{ox} = 25$  і товщиною близько 5 нм збудження проникає в канал лише на відстань порядку 2 нм, і тому в каналі відбувається ефективне екранування, яке зменшує небажаний ефект зниження бар'єру під впливом стоку



DIBL та знижує підпороговий розкид SS [6, 7]. Однак якщо як діелектрик використано традиційний SiO<sub>2</sub> з  $\epsilon_{ox} = 3,9$  і товщиною в 2 нм, цей параметр стає майже вдвічі більшим.

$$V(x, V_G, V_{DS}) = \begin{cases} E_b(V_G, V_{DS}), & 0 < x \leq L - \Lambda \\ E_b(V_G, V_{DS}) - \frac{E_b(V_G, V_{DS}) + |qV_{DS}|}{\Lambda}(x - L + \Lambda), & L - \Lambda < x \leq L \end{cases} \quad (9)$$

Тут висота бар'єру залежить від напруги на затворі і на стоку як:

$$E_b(V_G, V_{DS}) = V_{bs}^{(n)} - \alpha(V_G - V_T) - \beta V_{DS}. \quad (10)$$

Перший доданок у правій частині (10) описується виразом (5), другий описує зміну висоти бар'єру при прикладанні напруги на затвор, третій – описує зниження висоти бар'єру за рахунок ефекту DIBL. Порогова напруга  $V_T$  відповідає переходу транзистора від стану OFF (коли електрони провідності в каналі ДПМ відсутні) до стану ON, коли в каналі є рухливі носії (рис. 7). Коефіцієнт  $\alpha \ll 1$  за рахунок того, що переважна частина прикладеної на затворі напруги падає на оксидному шарі, причому в загальному випадку цей коефіцієнт так само залежить від  $V_G$ . У каналі з достатньо малим параметром екранування (10) коефіцієнт  $\beta$  близький до нуля.

Однак для мінімальних довжин каналу  $L \leq \Lambda$  витік уже не є електрично екранованим від стоку, і тому на всій довжині каналу ми

У загальному випадку ненульової напруги на стоку вигляд потенціалу в  $n$ -каналі (вирази для  $p$ -каналу записуються аналогічно) може бути апроксимовано як [10]:

можемо використовувати в першому наближенні лінійну апроксимацію, яка впливає з (9):

$$V(x, V_{DS}) = E_b(V_G, V_{DS}) - \frac{x}{L}(E_b(V_G, V_{DS}) + |qV_{DS}|). \quad (11)$$

Знаючи вигляд бар'єрного потенціалу (11), можна оцінити мінімальну довжину каналу провідності FET на основі моношару ДПМ. Висота бар'єру в режимі «OFF» повинна бути принаймні не меншою від  $E_{min} = kT \ln 2$  – мінімальна енергія, необхідної для запису (чи стирання) одного біту інформації [1] (але може бути й суттєво більшою від цієї величини). При цьому мінімальна ширина бар'єру (довжина каналу) визначається квантовомеханічним тунелюванням через бар'єр. Ймовірність того, що електрон з витоку тунелює крізь бар'єр, можна оцінити в наближенні Вентцеля-Крамєра-Бріллюєна (ВКБ), яке дає відому формулу для ймовірності тунелювання частинки з енергією  $E$  та масою  $m_c$  крізь бар'єр із потенціалом  $V(x)$  між точками  $x_1$  та  $x_2$ :

$$P \approx \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m_c(V(x) - E)} dx\right). \quad (12)$$

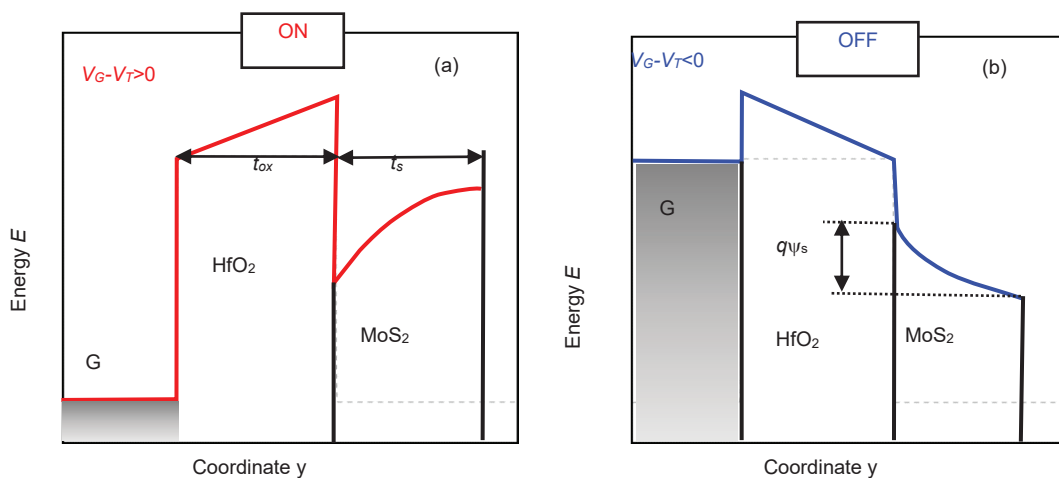


Рис. 7. Перемикання транзистора на  $n$ -каналі MoS<sub>2</sub> зі стану ON у стан OFF [10]

Поклавши потенціал бар'єру прямокутним на всій довжині каналу  $L$  і рівним мінімальному значенню  $E_{\min}$ , ми відразу отримуємо для мінімальної довжини каналу провідності оцінку (1).

Однак, як легко бачити з виду (11), коли прикладанням відповідної напруги на затвор забезпечено співвідношення  $E_b(V_G, V_{DS}) = E_{\min}$ , то прикладання на стік мінімальної додатної напруги в 17 меВ зменшить для пристрою, що працює при кімнатній температурі, довжину тунелювання для електрона, що інjektується з енергією Фермі витоку, вдвічі, і призведе до відповідного збільшення мінімальної довжини каналу. Підставивши (11) до (12), отримаємо значення мінімальної довжини каналу, що залежить від напруги на стоку:

$$L_{\min} = \frac{|\ln(1/2)|}{2} \frac{\hbar}{\sqrt{2m_c E_{\min}}} \chi; \quad \chi = \frac{3}{2} \frac{E_{\min} + |qV_{DS}|}{E_{\min}}. \quad (13)$$

Звернемо увагу на те, що (13) не дає точного граничного переходу до (1) при прямованні напруги на стоку до нуля, оскільки ми припустили, що вже за мінімальних напруг на стоку потенціал (11) має вже не прямокутний, а трикутний вигляд. Використання точних самоузгоджених розв'язків рівняння Пуассона для малих напруг повинне усунути таку розбіжність.

Для довільного значення висоти та ширини бар'єру підстановка (11) до (12) дає значення коефіцієнту прозорості цього бар'єру:

$$P = \exp\left[-\frac{2L}{\chi(V_G, V_{DS})} \frac{\sqrt{2m_c E_b(V_G, V_{DS})}}{\hbar}\right] \quad (14)$$

Цілком очевидно, що для  $L \rightarrow \infty$  (бар'єр нескінченно широкий) його прозорість нульова, а для  $L = 0$  вона дорівнює одиниці.

Далі нашою метою є табулювання (14) для різних значень наборів матеріалів та контактів та для різних довжин каналу як функції від напруги на затворі й на стоку. Метою є визначення для кожного випадку обраної пари матеріал-контакти областей напруг і довжин каналу, де  $P < 1/2$  і транзистор усе ще зберігає свою функціональність. Звідси буде зроблено

висновки, які пари матеріал-контакти є перспективнішими з погляду отримання мінімальних довжин каналу польового транзистора.

Для чисельних оцінок спробуємо оцінити коефіцієнт  $\alpha$  в (10) для області виснаження. При цьому рівняння Пуассона для моношару напівпровідника ДПМ запишеться як:

$$\varepsilon_s \varepsilon_o \frac{d^2 \psi(y)}{dy^2} = -\frac{eN_d}{t_s}. \quad (15)$$

Розв'язок цього рівняння з крайовими умовами рівності нулю потенціалу і напруженості поля на межі напівпровідник-вакуум  $y = t_s$  (рис. 7) дає вираз для величини потенціалу на межі напівпровідник-оксид:

$$\psi_s = \frac{eN_d t_s}{2\varepsilon_s \varepsilon_o}. \quad (16)$$

За формою розв'язок (16) відповідає відомому розв'язкові для висоти бар'єру Шоттки [18], де, однак, значення ширини шару Шоттки заміняє на порядки менше й жорстко фіксоване значення товщини моношару ДПМ. Підстановка в (16) наведених вище значень параметрів дає  $\psi_s = 30$  меВ.

Водночас падіння напруги на шарі оксиду дорівнює

$$\Delta V_{ox} = E_{ox} t_{ox}. \quad (17)$$

Використовуючи для напруженості поля в оксидному шарі теорему Гаусса, остаточно одержимо:

$$\Delta V_{ox} = \frac{eN_d t_{ox}}{\varepsilon_{ox} \varepsilon_o}. \quad (18)$$

Підставляючи до (18) наведені вище параметри, одержуємо  $\Delta V_{ox} = 0,4$  еВ. З урахуванням напруги плоских зон  $V_{FB} = 0,25$  В [9], зумовленої невеликою відмінністю спорідненості електрона до вакуума в кремнії та бісульфаті молібдену ( $e\chi_{Si} = 4,05$  еВ,  $e\chi_{MoS_2} = 4,3$  еВ), і без урахування заряду, зв'язаного на межі напівпровідник-оксид, це дає значення  $\alpha = 0,04$ . Отримати аналітичний простий розв'язок для випадку режиму збагачення неможливо, але стандартні міркування, аналогічні до проведе-

них у [7, 19], дозволяють зробити висновок, що в цьому випадку значення  $\alpha$  є ще меншим, і з досягненням режиму збагачення підвищення напруги на затворі веде лише до дуже незначного додаткового вигину зон униз. Ефект зниження бар'єру під дією стоку DIBL вважаємо малим [19],  $\beta = 0,005$ .

Відзначмо, що для транзистора з каналом р-типу (рис. 5в) вираз (14) модифікується як:

$$P = \exp\left[-\frac{2L}{\chi(V_G, V_{DS})} \frac{\sqrt{2m_v E_b^{(p)}(V_G, V_{DS})}}{\hbar}\right], \quad (19)$$

де  $m_v$  – ефективна маса дірок,

$$\chi = \frac{3}{2} \frac{E_b^{(p)} + |qV_{DS}|}{E_b^{(p)}}, \quad (20)$$

$$E_b^{(p)}(V_G, V_{DS}) = V_{bs}^{(p)} - \alpha(V_T - V_G) - \beta V_{DS}. \quad (21)$$

### 3. Моделювання прозорості бар'єру для реальних ультракоротких каналів на основі моношару ДПМ.

На рис. 8. наведено результати розрахунку за формулою (14) коефіцієнта прозорості  $P$  для транзистора з каналом n-MoS<sub>2</sub>, діелектричним проміжком HfO<sub>2</sub> та контактами MoS<sub>2</sub> (металічна модифікація, а, б) та Pt (в, г) як функцію напруги на стоку  $V_{ds}$  та затворі  $V_{gt}$  для різних довжин каналу  $L$ . Висота бар'єру Шоттки (5) для першого випадку складала 0.1eВ, а для другого – 0,53 eВ [14]. Криві графіків рис. 8 а, б корелюють з результатами, отриманими для цього випадку в [10]. Вони демонструють: в області порівняно невеликих напруг на затворі й на стоку транзистори з 4-нанометровим каналом ще зберігають достатній рівень функціональності (прозорість бар'єру є меншою від 1/2). Натомість для випадку платинових контак-

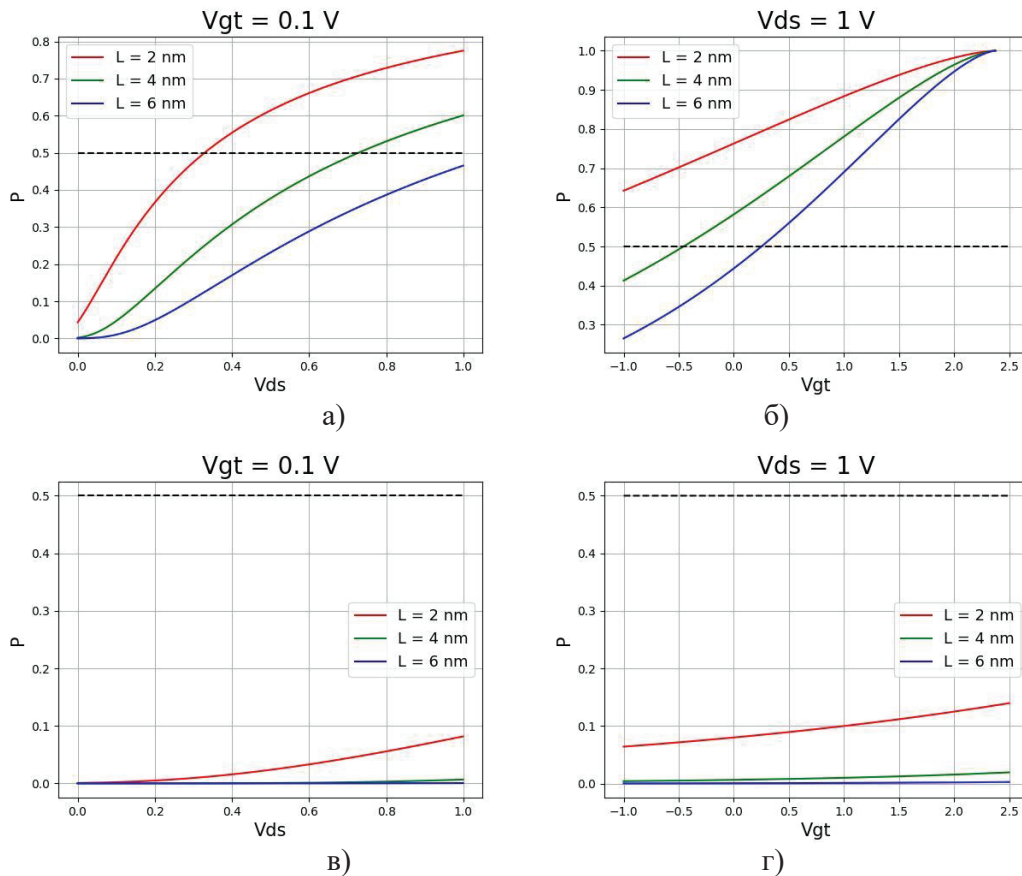


Рис. 8. Коефіцієнт прозорості  $P$  (14) для транзистора з каналом n-MoS<sub>2</sub> та контактами MoS<sub>2</sub> (металічна модифікація, а, б) та Pt (в, г) як функція напруги на стоку  $V_{ds}$  та затворі  $V_{gt} = V_G - V_T$  для різних довжин каналу  $L$ .

тів, для якого висота бар'єру Шоттки є суттєво вищою, а прозорість каналного бар'єру – відповідно суттєво меншою, функціональність транзистора зберігається й для довжини каналу 2 нм в усьому реалістичному діапазоні напруг на затворі й на стоку.

На рис. 9. наведено аналогічні результати розрахунку за формулою (19) коефіцієнта прозорості  $P$  для транзистора з каналом  $p\text{-WSe}_2$ , діелектричним проміжком  $\text{HfO}_2$  та контактами

$\text{Pd}$ . Паладій, як показує аналіз, проведений у [20], є найкращим кандидатом для створення прийнятної висоти бар'єру Шоттки у 0,22 еВ при формуванні провідного каналу транзистора на  $p\text{-WSe}_2$  (контакт моношарів з напівпровідниковою та металевою фазою  $\text{WSe}_2$  призводить до від'ємного бар'єру Шоттки типу зображеного на рис. 6 д, що не є перспективним з погляду функціональності транзистора в силу обговорених вище причин).

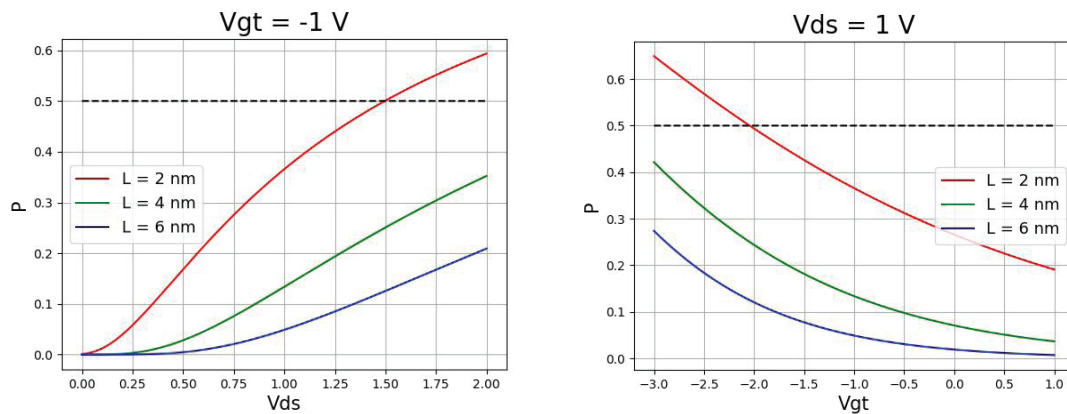


Рис. 9. Коефіцієнт прозорості  $P$  (19) для транзистора з каналом  $p\text{-WSe}_2$  та контактами  $\text{Pd}$  (а, б) як функція напруги на стоку  $V_{ds}$  та затворі  $V_{gt} = V_G - V_T$  для різних довжин каналу  $L$ .

З рис. 9 видно: в області порівняно невеликих напруг на затворі й на стоку навіть транзистори з 2-нанометровим каналом ще зберігають достатній рівень функціональності (прозорість бар'єру є меншою від  $\frac{1}{2}$ ). Натомість для довжини каналу 4 нм функціональність зберігається в усьому реалістичному діапазоні напруг на затворі й на стоку. Цьому сприяє й висока ефективна маса дірок у  $p\text{-WSe}_2$ , яка дорівнює 1,4 маси вільного електрона [21] і в кілька разів перевищує значення ефективної маси електронів як для кремнієвого транзистора в площині (001)  $0.22m_0$  [1], так і для транзистора на моношарі  $\text{MoS}_2$   $0.55m_0$  [10].

Отримані нами оцінки підтверджують реальність створення комплементарного інвертора на основі  $\text{MoS}_2$  транзистора з каналом  $n$ -типу і  $\text{WSe}_2$  транзистора з каналом  $p$ -типу, аналогічного до вже реалізованого в [12], але з ультракороткими довжинами каналів у 2–4 нм.

#### 4. Висновки

Нами проведене моделювання меж функціональності польового транзистора з провідним каналом на основі моношару дихалькогеніду перехідного металу та з різними матеріалами витоку/стоку. Квантовомеханічну прозорість каналного бар'єру розраховано з урахуванням реального вигляду потенціалу такого бар'єру. Показано, що транзистор з 4-нм каналом  $n\text{-MoS}_2$  та контактами витоку/стоку  $\text{MoS}_2$  (металічна модифікація) в області порівняно невеликих напруг на затворі й на стоку ще зберігає достатній рівень функціональності (прозорість бар'єру є меншою від  $\frac{1}{2}$ ). Натомість цей же транзистор для випадку контактів витоку/стоку на основі  $\text{Pt}$ , коли висота бар'єру Шоттки є суттєво вищою, а прозорість каналного бар'єру – відповідно суттєво меншою, зберігає функціональність і для довжини каналу 2 нм в усьому реалістичному

діапазоні напруг на затворі й на стоку. Аналогічний результат одержано й для транзистора з каналом  $p$ - $WSe_2$  і контактами на основі палладію. Отримані нами оцінки підтверджують реальність створення комплементарного інвертора на основі  $MoS_2$  транзистора  $n$ -типу і  $WSe_2$  транзистора  $p$ -типу з ультракороткими довжинами каналів у 2–4 нм.

Це ще раз демонструє перспективність застосування транзисторів з ультракороткими каналами на основі дихалькогенідів перехідних металів в електроніці «доби після Мура», зокрема в комплементарних металооксидних напівпровідникових технологіях. Однак практична реалізація таких комплементарних пристроїв з ультракороткими каналами, припустимими з погляду фундаментальних квантово-механічних обмежень, ще наражатиметься на численні труднощі технологічного характеру, оскільки технології ДПМ розроблено на цей момент значно гірше порівняно з традиційними кремнійовими.

#### Список використаної літератури

[1]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. Physics of MOSFET nanotransistors: fundamental limits and restrictions. *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.* 17, No.3, 4–28 (2021). (in Ukrainian).

[2]. Doris, Bruce B.; Dokumaci, Omer H.; Jeong, Meikei K.; Mocuta, Anda; Zhang, Ying; Kanarsky, Thomas S.; Roy, R. A. (December 2002). *Digest. International Electron Devices Meeting: 267–270*. doi:10.1109/IEDM.2002.1175829

[3]. Wakabayashi, Hitoshi; Yamagami, Shigeharu; Ikezawa, Nobuyuki; Ogura, Atsushi; Narihiro, Mitsuru; Arai, K.; Ochiai, Y.; Takeuchi, K.; Yamamoto, T.; Mogami, T. (December 2003). *IEEE International Electron Devices Meeting 2003: 20.7.1–20.7.3*. doi:10.1109/IEDM.2003.1269446

[4]. <https://www.anandtech.com/show/13445/tsmc-first-7nm-euv-chips-taped-out-5nm-risk-in-q2>

[5]. M. V. Strikha, A. I. Kurchak. Fundamentalni obmezhenia dlia dovzhyny kanalu providnosti MOSFET z urakhuvanniam realnoho vyhliadu khodu bariernoho potentsialu. *UJP*, 66, 625–629 (2021). (in Ukrainian).

[6]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. Physics of nanotransistors: structure, metrics, and control. *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.* 15, No.4, 18–40 (2018). (in Ukrainian).

[7]. Yu. O. Kruglyak, M. V. Strikha. Physics of nanotransistors: unification of transmission model with virtual source model – MVS-transmission model. *Sens. elektron. mikrosist. tehnol.* 17, No.4, 4–22 (2020). (in Ukrainian).

[8]. Filip A. Rasmussen and Kristian S. Thygesen. Computational 2D Materials Database: Electronic Structure of Transition-Metal Dichalcogenides and Oxides. *J. Phys. Chem. C* 119, 13169–13183 (2015).

[9]. Amirhasan Nourbakhsh, Ahmad Zubair, Redwan N. Sajjad, Amir Tavakkoli K. G., Wei Chen, Shiang Fang, Xi Ling, Jing Kong, Mildred S. Dresselhaus, Efthimios Kaxiras, Karl K. Berggren, Dimitri Antoniadis, and Tomás Palacios.  $MoS_2$  Field-Effect Transistor with Sub-10 nm Channel Length. *Nano Lett.* 16, 7798–7806 (2016).

[10]. Maksym V. Strikha, Mykola Yeliseiev, and Anna N. Morozovska. Fundamental miniaturization limits for MOSFETs with a monolayer  $MoS_2$  channel, *Appl. Phys. Lett.* 119, 042102 (2021); doi: 10.1063/5.0056720

[11]. Sajedeh Manzeli, Dmitry Ovchinnikov, Diego Pasquier, Oleg V. Yazyev & Andras Kis. 2D transition metal dichalcogenides. *Nature Reviews Materials* 2, 17033 (2017).

[12]. Ah-Jin Cho, Kee Chan Park & Jang-Yeon Kwon. A high-performance complementary inverter based on transition metal dichalcogenide field-effect transistors. *Nanoscale Research Letters*, 10, 115 (2015).

[13]. June Yeong Lim, Minju Kim, Yeonsu Jeong, Kyeong Rok Ko, Sanghyuck Yu, Hyung Gon Shin, Jae Young Moon, Young Jai Choi, Yeonjin Yi, Taekyeong Kim & Seongil Im. Van der Waals junction field effect transistors with both n- and p-channel transition metal dichalcogenides. *npj 2D Materials and Applications*. 2, 37 (2018).

[14]. T. Finge, F. Riederer, M.R. Mueller, T. Grap, K. Kallis, J. Knoch. Investigations on Field-Effect Transistors Based on Two-Dimensional Materials. *Annalen der Physik*. 529, 1700087 (2017).

[15]. Hao-Ling Tang, Ming-Hui Chiu, Chien-Chih Tseng, Shih-Hsien Yang, Kuan-Jhih Hou,

Sung-Yen Wei, Jing-Kai Huang, Yen-Fu Lin, Chen-Hsin Lien, and Lain-Jong Li. Multilayer Graphene–WSe<sub>2</sub> Heterostructures for WSe<sub>2</sub> Transistors. *ACS Nano* 2017, 11, 12817–12823 (2017).

[16]. Zhi-Qiang Fan, Xiang-Wei Jiang, Jun-Wei Luo, Li-Ying Jiao, Ru Huang, Shu-Shen Li, and Lin-Wang Wang. In-plane Schottky-barrier field-effect transistors based on 1T/2H heterojunctions of transition-metal dichalcogenides. *Phys. Rev. B* 96, 165402 (2017).

[17]. Adiba Zahin. Schottky Barrier Heights at Two-Dimensional Metallic and Semiconducting Transition-Metal Dichalcogenide Interfaces. A Thesis submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering. University of California, Riverside. December 2017.

[18]. H. P. Peka, V. I. Strikha. Poverkhnevi ta kontaktni yavlyshcha u napivprovodnykakh (K.: Lybid 1992). (*in Ukrainian*).

[19]. M. Lundstrom, *Fundamentals of Nanotransistors* (Singapore: World Scientific: 2018); www.nanohub.org/courses/NT

[20]. Yangyang Wang, Ruoxi Yang, Ruge Quhe, Hongxia Zhong, Linxiao Cong, Meng Ye, Zeyuan Ni, Zhigang Song, Jinbo Yang, Junjie Shi, Ju Li, and Jing Lu. Does P-type Ohmic Contact Exist in WSe<sub>2</sub>-metal Interfaces? arXiv:1508.00300 (2015).

[21]. Po-Chun Yeh, Wencan Jin, Nader Zaki, Datong Zhang, Jonathan T. Liou, Jerzy T. Sadowski, Abdullah Al-Mahboob, Jerry I. Dadap, Irving P. Herman, Peter Sutter, and Richard M. Osgood, Jr. Layer-dependent electronic structure of an atomically heavy two-dimensional dichalcogenide. *Phys. Rev. B* 91, 041407 (R) (2015).

Стаття надійшла до редакції 14.04.2022 р.

PACS numbers: 71.15.Mb, 71.20.-b, 73.22.Pr, 73.23.Ad, 84.32.Ff, 85.35.-p

DOI: 10.18524/1815-7459.2022.1/2.258445

## FUNDAMENTAL LIMITS FOR THE LENGTH OF CONDUCTION CHANNEL IN THE FET ON TRANSITION METALS DICHALCOGENIDE SINGLE LAYER BASE

*M. V. Strikha*<sup>1,2</sup>, *K. O. Korzh*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Taras Shevchenko Kyiv National University  
Faculty of Radiophysics, Electronics and Computer Sciences,  
4g Hlushkov Av, Kyiv, Ukraine, phone (044) 526 0532

<sup>2</sup>V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine,  
41 Nauky Av, Kyiv, Ukraine, phone (044) 525 6033  
E-mail: maksym\_strikha@hotmail.com

### Summary

The modeling of the limits of functionality for the FET with conduction channel on transition metals dichalcogenide single layer base and with different source/drain contacts material was performed in this article. The quantum mechanical transparency of the channel barrier was calculated with allowance for the realistic form of the barrier potential. It is demonstrated, that the FET with 4-nm channel of n-MoS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub> (metallic modification) source/drain contacts retains high level of functionality for the range of comparatively low gate and drain voltages (the barrier transparency is lower than ½). The similar FET with Pt source/drain contacts, when Schottky barrier is essentially higher and the barrier transparency is essentially lower, keep it's functionality for the 2 nm channel as well for all the realistic values of gate and drain voltages. The similar result was obtained for the FET with p-WSe<sub>2</sub> channel and Pd contacts as well. The obtained estimations confirm the possibility of the complementary inverter on MoS<sub>2</sub> n-type FET and WSe<sub>2</sub> p-type FET with ultra-short channels in 2–4 nm range.

This demonstrates the perspectives for the application of the FETs with ultra-short channels on transition metal dichalcogenides base in “more than Moore” electronics, especially in the complementary metal-oxide semiconductor technologies. The practical application of such complementary devices with ultra-short channels, possible from the point of view of the fundamental quantum mechanical restrictions, will, however, meet the numerous technological difficulties, because the TMD technologies are developed now much worthier than the traditional silicon ones.

**Keywords:** field effect transistor, single layer, transition metal dichalcogenide, tunneling, contacts

PACS numbers: 71.15.Mb, 71.20.-b, 73.22.Pr, 73.23.Ad, 84.32.Ff, 85.35.-p

DOI: 10.18524/1815-7459.2022.1/2.258445

## ФУНДАМЕНТАЛЬНІ МЕЖІ ДОВЖИН КАНАЛІВ ПРОВІДНОСТІ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ НА МОНОШАРАХ ДИХАЛЬКОГЕНІДІВ ПЕРЕХІДНИХ МЕТАЛІВ

*М. В. Стріха<sup>1,2</sup>, К. О. Корж<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,  
факультет радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем,  
пр. Глушкова, 4г, Київ, Україна, тел. (044) 526 0532;

<sup>2</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
пр. Науки, 41, Київ, Україна, тел. (044) 525 6033,  
E-mail: maksym\_strikha@hotmail.com

### Реферат

В статті проведено моделювання меж функціональності польового транзистора з провідним каналом на основі моношару дихалькогеніду перехідного металу та з різними матеріалами витоку/стоку. Квантовомеханічну прозорість каналного бар'єру розраховано з урахуванням реального вигляду потенціалу такого бар'єру. Показано, що транзистор з 4-нм каналом n-MoS<sub>2</sub> та контактами витоку/стоку MoS<sub>2</sub> (металічна модифікація) в області порівняно невеликих напруг на затворі й на стоку ще зберігає достатній рівень функціональності (прозорість бар'єру є меншою від 1/2). Натомість цей же транзистор для випадку контактів витоку/стоку на основі Pt, коли висота бар'єру Шотткі є суттєво вищою, а прозорість каналного бар'єру – відповідно суттєво меншою, зберігає функціональність і для довжини каналу 2 нм в усьому реалістичному діапазоні напруг на затворі й на стоку. Аналогічний результат одержано й для транзистора з каналом p-WSe<sub>2</sub> і контактами на основі паладію. Отримані нами оцінки підтверджують реальність створення комплементарного інвертора на основі MoS<sub>2</sub> транзистора n-типу і WSe<sub>2</sub> транзистора p-типу з ультракороткими довжинами каналів у 2–4 нм.

Це ще раз демонструє перспективність застосування польових транзисторів з ультракороткими каналами на основі дихалькогенідів перехідних металів в електроніці «доби після Мура», зокрема в комплементарних металооксидних напівпровідникових технологіях. Однак практична реалізація таких комплементарних пристроїв з ультракороткими каналами, припустимими з погляду фундаментальних квантовомеханічних обмежень, ще наражатиметься на численні труднощі технологічного характеру, оскільки технології дихалькогенідів перехідних металів розроблено на цей момент значно гірше порівняно з традиційними кремнієвими.

**Ключові слова:** польовий транзистор, моношар, дихалькогенід перехідного металу, тунелювання, канал, контакти