

С.П. Новосядлий, В.М. Луковкін, Р. Мельник, А.В. Павлишин

## **Фізично-топологічне моделювання кремнієвого/арсенідгалієвого транзистора Шотткі субмікронної технології ВІС**

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна, [kkie@pu.if.ua](mailto:kkie@pu.if.ua)*

В даній статті описані досліджені основи і фізичні механізми, арсенідгалієвих ПТШ на моно-Si-підкладках на бар'єрі Шотткі. Проведено комп'ютерне моделювання ПТШ з р-каналом: розподілів потенціалу, об'ємного заряду, струму в каналі та його характеристик. На основі проведеного моделювання відкрито новий ефект в ПТШ, а саме екранування об'ємного заряду, що суттєво впливає на струмовий розподіл в каналі.

**Ключові слова:** електроніка, ВІС, польові транзистори Шотткі, моделювання, GaAs.

*Подано до редакції 17.02.2020; прийнято до друку 15.06.2020.*

### **Вступ**

Сьогодні існуюча теорія польового транзистора і його модель, яка була розроблена Шоклі і, яка базувалась на плавній зміні товщини каналу, не задовольняє субмікронну технологію ВІС, за допомогою якої формуються швидкісні транзистори на основі епішарів GaAs, осаджених на монокремнієвих підкладках. Сьогодні відсутня єдина систематизована картина функціонування ПТ, незважаючи на появу комплементарних ПТШ як на гомопереході так і на гетеропереході. Тому метою даного дослідження є узгодження механізмів роботи ПТ, виходячи вже із двомірної фізико-топологічної моделі.

### **I. Фізико-топологічна модель ПТШ, її крайові умови**

Розглянемо двомірну модель ПТ, виходячи з його геометричної структури, що показана на рис. 1. Вважатимемо, що всі фізичні процеси в стаціонарному режимі роботи ПТ з каналом р-типу описуються фундаментальною системою рівнянь, що приймають для внутрішнього опису  $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq h$  такий вигляд:

$$-j = -q\mu \text{grad}(U) - qD \text{grad}(n) \text{div}(j) = 0; \quad \text{div}(\text{grad}(U)) = q/\epsilon(p - N_A), \quad (1)$$

де  $j$  — повна густина струму діркового струму,  $q$  — заряд епішару,  $p$  — концентрація дірок,  $\mu$  — рухливість дірок,  $D$  — коефіцієнт дифузії дірок,  $\epsilon$  — діелектрична проникність напівпровідника,  $U$  — потенціал,  $N_A$  — концентрація акцепторів. До цих рівнянь треба також додати відоме співвідношення

Ейнштейна, що  $D = \mu \frac{kT}{q}$ . Як ми знаємо,

функціональна залежність рухливості носіїв заряду визначаються матеріалом напівпровідника (Ga, Si, GaAs). Нами проведено моделювання ПТШ на моно-Si, коли справедлива апроксимація:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \mu_0 E v_{np}}$$

$E$  — напруженість електричного поля в каналі;  $v_{np}$  — гранична швидкість дірок в моно-Si.

Крайові та початкові умови для нашого моделювання виражаються такими виразами:

- $U = 0$  при  $x = 0$ ,  $0 \leq y \leq U$ ;
- $U = U_c$  при  $x = 1$ ,  $0 \leq y \leq U$ ;
- $p = 0$ ,  $U = U_3$  при  $l_{e-3} \leq x \leq l_{e-3} + l_3$ ,  $y = 0$ ;
- $\frac{dU}{dy} = 0$  при  $0 \leq x \leq 1$ ,  $y = U$ ,  $0 \leq x \leq l_{e-3}$ ,  $l_{e-3} + l_3$

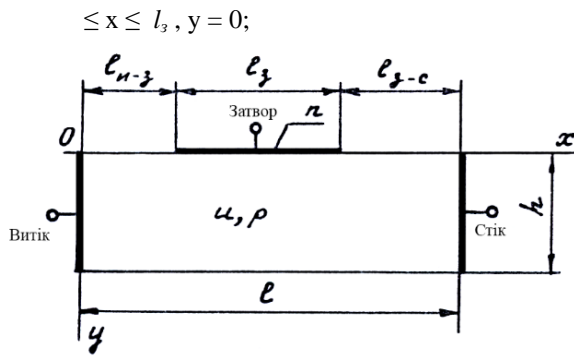


Рис.1. Двовимірна розрахункова область моделі ПТ.

Розглянуті і представлені нами розподіли потенціалів, об'ємних зарядів та густин струму в каналі ПТШ — це і є результат числового моделювання та розв'язку нелінійної системи визначеної вище. Тут слід було б врахувати дію ізотипних  $p+p$  або  $n+n$  — стік-витоківих переходів, сформованих дуальною багатозарядною імплантацією для зменшення опорів витоку та стоку та збільшення крутизни ПТШ. Крім цього тепер слід було б врахувати дію процесу епітаксійного осадження  $p$  чи  $n$ -шарів GaAs на монокремнієвих підкладках, бо ці два процеси підвищують як мінімум на порядки швидкодію сформованого ПТШ і на його основі дозволяють формувати комплементарні пари, що зменшують суттєво потужність споживання субмікронних ВІС.

## II. Результати моделювання параметрів ПТШ: розподілу потенціалу, об'ємного заряду і густини струму в структурі транзистора

Як видно із представлення рівнянь для моделювання та їх крайових умов, струм в структурі ПТШ залежить від градієнта потенціалу  $U$ , градієнта концентраційного профілю дірок. Тому розглянемо і змодельуємо вплив цих факторів на роботу ПТШ. Тут слід відзначити, що потенціал — це є незалежна змінна, значенням якої на електродах можна в певних місцях змінювати. Тому при варіанті потенціалів на електродах в нашому прикладі буде змінюватись розподіл потенціалу в каналі і, як наслідок, розподіл концентрації дірок. Для доброї наочності промодельуємо процеси в структурі ПТШ, поданої на рис. 1, де вважатимемо, що канал є однорідно легований акцепторами з концентрацією  $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а перехід (бар'єр Шоттки) затвор-канал є різким і концентрація домішок затвору є на кілька порядків більшою ніж концентрація домішок в каналі, бо затвор сформований на основі плівок із алюмінієвого сплаву АКГо-11. Геометричні розміри тестової структури були вибрані такими:  $l_{p-n} = l_{n-p} \leq 5 \text{ мкм}$ ,  $l_z = 1 \text{ мкм}$ .

Виходячи із вище сказаного, розглянемо перерозподіл потенціалу в ПТШ при утворенні об'ємного заряду. Нехай напруга на затворі

$U_3 = U_{3-g} + \phi_k = 2,8B$  (де  $\phi_k$  — бар'єр Шоттки), а потенціали витоку і стоку рівні нулю. Тоді вихідний розподіл потенціалу до утворення об'ємного заряду описується рівнянням:  $\text{div}(\text{grad}(U)) = q \cdot \varepsilon(p - N_A)$  і характеризується рівномірним спаданням потенціалу від затвору до стік-витоківих електродів. На рис. 2а подано розподіл у вигляді штрихової лінії і падає симетричність електричного поля. Електричне поле  $E = \text{grad}(U)$ , що сформоване напругою на затворі  $U_3$ , буде відштовхувати дірки із підзатворної області, що приведе до утворення об'ємного заряду.

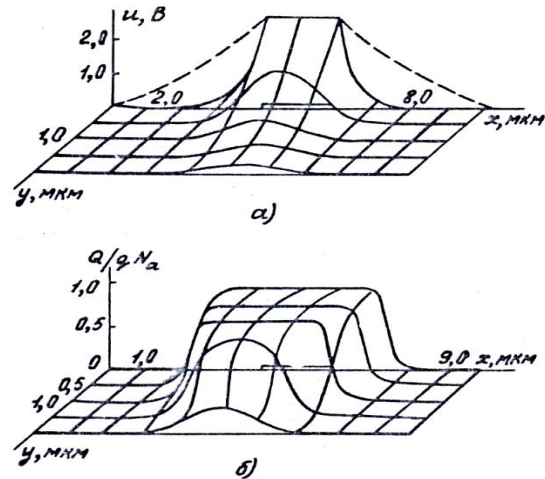


Рис. 2. Розподіл потенціалу (а) і об'ємного заряду (б) в структурі.

Таким чином створений об'ємний заряд створює власне електричне поле, яке поступово по мірі віддалення від затвору в певній мірі компенсує первинне поле затвору. Результат розподілу потенціалу  $U$  є подані на рис. 2а (нештриховані лінії), а об'ємного заряду на рис. 2б. Протяжність об'ємного заряду обмежена таким чином, що за його межами викликане ним поле і поле затвору повністю компенсуються. Тобто межі об'ємного заряду і потенціального рельєфу при відсутності рухомих носіїв заряду повинні співпадати. Експеримент в повній мірі підтверджує цей факт. За рахунок дифузії дірок перехід від повністю збідненої області до нейтральної частини напівпровідника — є досить плавним. При цьому в нейтральній області напівпровідника потенціал стає постійним, тобто його градієнт дорівнює нулю. Тут необхідно відмітити, що якщо при відсутності об'ємного заряду поле затвору поширювалось по всій структурі ПТШ, то вже при об'ємному заряді поле локалізується в призатворній області. Таким чином, утворений об'ємний заряд екранує нейтральну область ПТШ від впливу потенціалу затвору.

Співпадіння меж об'ємного заряду і самого потенціального рельєфу при відсутності струму інколи вважається причиною неправильного розуміння механізмів протікання струму в каналі ПТШ. Рахується, що канал, по якому протікає струм, є обмежений об'ємним зарядом. Фактичною перешкодою для протікання струму може бути потенціальний бар'єр. Тут не можна стверджувати,

що через область об'ємного заряду не може протікати струм. Але він може протікати тільки в напрямі збільшення потенціалу  $U$ . А коли дірки, які попали в область об'ємного заряду, вже вільно скочуються по схилам утвореного рельєфу.

Якщо тепер до стоку ПТШ прикладена від'ємна напруга, то результуючий розподіл потенціалу створюється напругами, прикладеними до затвору і стоку, а також нерухомим об'ємним зарядом та рухомими дірками. На рис. 3 надано розподіл потенціалу при напрузі на стоці  $U_{c-b} = -5$  В. Основна відмінність такого розподілу, на відміну від рис 2а – потенціальний схил між витоком і стоком, по якому дірки рухаються до стоку, утворюючи струм каналу. Тому область, по якій протікає струм(канал), є обмежена схилами потенціального рельєфу. В своєму русі від витоку до стоку дірки будуть обтікати потенціальну гірку, яка сформована затвором, так що канал утвориться вузьким в області затвору. Оскільки дірки стараються зайняти положення з мінімальним потенціалом, то розкиди густини струму по каналу вже є нерівномірними(обхідним). На рис. 4 стрілками і показаний розподіл густини струму, при цьому довжина і напрям кожної стрілки характеризує густину струму і його напрям у відповідній точці каналу.

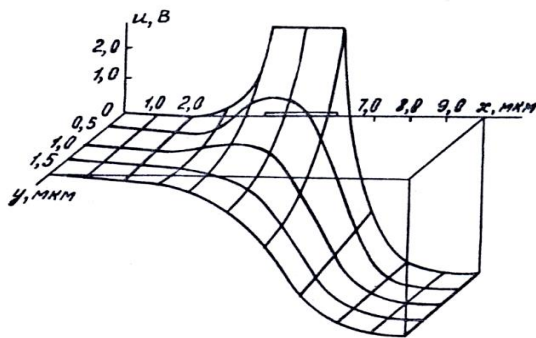


Рис. 3. Потенціальний рельєф в структурі ПТ при протіканні струму.



Рис. 4. Розподілення струму в каналі ПТ.

### III. Моделювання характеристики ПТШ: вхідної, вихідної, передатної

Прослідкуємо для прикладу формування вихідних характеристик ПТШ при зміні напруги на затворі і стоці та пов'язаного з цим змінного розподілу потенціалу. Тут вважатимемо, що рухливість носіїв заряду в каналі є постійна і не залежить від електричного поля.

Розглянемо спочатку етап процесу в ПТШ, при якому при відсутності напруги на стоці потенціал затвору є недостатнім для перекриття транзистора

об'ємним зарядом. При порівнянні рис. 2а і 3 видно, що при деякому постійному потенціалі затвору ріст напруги на стоці сприяє переносу дірок від витоку до стока, оскільки при цьому збільшується схил потенціального рельєфу між витоком і стоком, і дірки легше скочуються до стоку. В той же час залежність струму від напруги є нелінійною. При малих напругах на стоці, поки об'ємний заряд не перекриє канал, струм буде рости швидко. При великих напругах на стоці, що відповідає вже повному перекриттю каналу об'ємним зарядом, ріст струму сповільнюється, тобто формується так звана характеристика пентодного типу. Це викликано тим, що значна частина потенціалу стоку витрачається на розширення області об'ємного заряду в області між затвором і стоком і ми можемо це інтерпретувати вже як екранування каналу і витокової області від впливу стока об'ємним зарядом. Тоді внаслідок цього основна частина напруги стоку падає на область об'ємного заряду області затвор-стік і тільки незначна частина – на витокову область. В результаті градієнт потенціалу, що створений у витоковій області потенціалом стоку, так і струм ПТШ залежить від ступеня екранування, значення мало зростає із розширенням об'ємного заряду при зростанні потенціалу стоку.

Звідси висновок, при формуванні нелінійної вихідної характеристики ПТШ основну роль відіграє не охолодження шляху протікання струму об'ємного заряду, а саме екрануюча дія цього заряду каналу і витокової області ПТШ. Тут екранування об'ємним зарядом має місце як при наявності, так і при відсутності струму в каналі.

В реальних ПТШ на розглянутий механізм роботи накладається вплив залежності рухливості носіїв заряду від електричного поля в каналі. При цьому, незважаючи на ріст концентрації носіїв заряду від електричного поля в каналі із зростанням напруги на стоці, струм стоку може не тільки монотонно насичуватись, наприклад в кремнієвих та суміжних GaAs – на монокремнієвих підкладках, але і мати дуже цікаву область від'ємного опору. Це дає можливість такі ПТШ використовувати як самозбуджуючі автогенератори.

Прослідкуємо тепер процес перерозподілу потенціалу і виникнення каналу в ПТШ, який у вихідному стані є закритим зовнішньою напругою на затворі або контактною різницею потенціалів затвор-канал. Як видно із рис. 2а при  $U_{c-g} = 0$  об'ємний заряд розповсюджений на всю глибину каналу ПТШ, що в перерізі транзистора відповідає  $y = h$ , де має місце потенціальний бар'єр для дірок між витоком і стоком та струм в приладі є відсутній (рис. 5 крива 1 при  $U_{c-g} = 4$  В).

Якщо тепер подати напругу на стік, то об'ємний заряд в області затвор-стік ще більше розшириться в сторону стоку. Проте пониження потенціалу на стоці зменшує потенціальний бар'єр між витоком і стоком. Саме крива 2 рис. 5 подає випадок, що відповідає напрузі  $U_{c-g} = -3$  В, коли бар'єр понизився, але його значення залишається ще недосяжним для дірок, а струму в ПТШ немає. Тут екрануюча дія об'ємного заряду проявляється в тому, що для того щоб

понизити потенціальний бар'єр до нуля, то на стік треба подати досить високу напругу. Дійсно, подальше підвищення напруги на стоці приводить до зменшення бар'єру Шоттки аж до його зникнення спочатку в січенні  $y = h$ , а потім в більш широкій області, тобто до утворення каналу, по якому вже дірки скочуються до стоку (рис.5 крива 3  $U_{c-g} = -10$  В). Утворена таким чином вихідна характеристика може ідентифікуватися як тріодна (транзисторна).

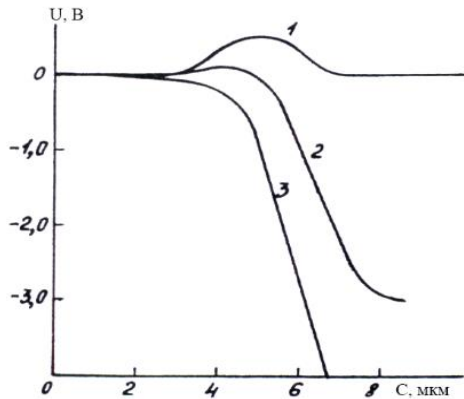


Рис. 5. Розподіл потенціалу в січенні  $y = h$  при різних напругах на стоці.

Як бачимо, практично струм в ПТШ появляється, коли потенціальний бар'єр все ще існує, але він настільки малий, що найбільш енергетичні носії заряду вже можуть його долати, після чого вільно скочуються до стоку. Тут слід відмітити суттєвий ефект, що в цьому випадку за переходу струму від виходу до бар'єру є відповідальною дифузійна складова струму, а від бар'єра до стоку – дрейфова. Це важливо для розуміння швидкодії ПТШ.

В ПТШ з малою відстанню витік-стік (коротким каналом  $L_s < 1$  мкм) вплив потенціалу стоку на висоту бар'єра, тобто керованість із сторони стоку, проявляється досить сильно і тут властивий тріодний вид характеристики. В ПТШ з довгим каналом область затвора, де знаходиться бар'єр, вже сильно

екранована об'ємом заряду від впливу струму. Тому, для того щоб відкрити закритий ПТШ, вже необхідно подати на стік настільки високий потенціал, навіть більший напруги пробою. Тобто, тріодність вихідної характеристики, а саме керованість із сторони стоку, проявляється в таких ПТШ тільки кінцеве значення вихідного опору в області насичення, а це значить, що стік-витокові переходи треба формувати ізотипним, виду  $p+-p$  або  $n+-n$ , використовуючи дуальну багатозарядну імплементацію.

Таким чином, в результаті моделювання ПТШ на монокремнії відкрито ефект екрануючої дії, що суттєво впливає на формування його характеристик і швидкодії.

## Висновки

1. Проведено комп'ютерне моделювання ПТШ з р-каналом: розподіл потенціалу, об'ємного заряду, струму в каналі та його характеристик.

2. На основі проведеного моделювання відкрито новий ефект в ПТШ, а саме екранування об'ємного заряду, що суттєво впливає на струмовий розподіл в каналі.

3. Відкритий ефект екранування дозволяє формувати ПТШ із вихідною характеристикою з наявним від'ємним опором, що є особливо корисним для самозбудження автогенераторів.

4. Для збільшення швидкодії комплементарної пари ПТШ запропоновано оригінальний метод формування за допомогою ізотипних стік-витокових областей ( $p+-p$  або  $n+-n$ ), використанням дуальної багатозарядної імплементації іонів та фотонного імпульсного відпалу.

**Новосядлий С.П.** – д.т.н., професор;  
**Луковкін В.М.** - аспірант;  
**Мельник Р.** – аспірант;  
**Павлишин А.В.** – студент.

- [1] T. Mizutani, Japanese Journal of Applied Physics (1982).
- [2] V.I. Sen'ko, M.V. Panasenko, Electronics and microcircuitry (Oberehy, Kyiv, 2000).
- [3] M. Shur, Modern devices based on GaAs (Mir, Moscow, 1991).
- [4] F. Tian, E.F. Chor, Thin Solid Films 518(24), 121 (2010).
- [5] M.J. Sikder, P. Valizadeh, Solid-State Electronics 89, 105 (2013).
- [6] V.A. Moskalyuk, D.I. Timofeev A.V. Fedyaj, Ultrafast electronic devices (NTUU KPI, Kyiv, 2012).

S.P. Novosyadliy, V.M. Lukovkin, R. Melnyk A.V. Pavlyshyn

## Physical-Topology Modeling of Silicon/Gallium Arsenide Schottky Transistor of Submicron Technology LSI

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, [kkie@pu.if.ua](mailto:kkie@pu.if.ua)

In this paper described researched essentials and physical mechanisms of MESFET on epitaxy layers of GaAs with monocrystalline silicon wafer. Conducted computer modeling of MESFET with p-channel: distributions of potential, volumetric charge, current in channel and its characteristics. Based on conducted modeling discovered new effect in MESFET, shielding of volumetric charge, which sufficiently influences on current distribution in channel.

**Key words:** electronics, LSI, MESFET, modeling, GaAs.