

УДК 621.382.323

С. П. НОВОСЯДЛИЙ, С. І. БОЙКО

КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПОЛЬОВИХ ГЕТЕРОТРАНЗИСТОРІВ ВИСОКОЇ ШВИДКОДІЇ ДЛЯ СУБМІКРОННИХ СТРУКТУР ВІС/НВІС

Проведено аналіз швидкодії гетероструктурних польових транзисторів із селективним легуванням (ПТГСЛ), багатоканальних ПТГСЛ та ПТГСЛ з оберненою структурою, а також польових транзисторів з гетерозатвором високої щільності. На практиці отримані ПТГСЛ із значенням часу затримки в кільцевому генераторі $\tau_D = 12,5-25$ пс при $T = 300$ К потужністю $P_D = 0,9-4,0$ мВт. Використання таких транзисторів в комплементарних вентилях, дозволяє збільшити їх швидкодію в 2,5-3 раз, в порівнянні з кремнієвими.

Ключові слова: польовий транзистор, гетероперехід, арсенід галію, двомірний електронний газ.

Вступ. Постійно зростаючі вимоги до комп'ютерів та споживчої електроніки роблять необхідним підвищення швидкодії структур великих інтегральних схем. Використання гетеропереходів в біполярних та польових транзисторах дозволяє значно підвищити їх швидкодію.

Зазвичай, для зміни провідності в напівпровідниках використовуються домішки. Проте, в цьому випадку, електрони провідності розсіюються на домішках, що негативно впливає на їх рухливість, а значить на швидкодію транзистора. В гетероструктурних транзисторах цього можна уникнути. В них для створення каналу використовується контакт двох напівпровідникових матеріалів з різною шириною забороненої зони. Електрони генеруються в сильнолегованому широкозонному напівпровіднику і завдяки вигину енергетичних зон повністю переносяться в нелегований вузькозонний напівпровідник. Таким чином формується тонкий шар електронів з високою рухливістю, які володіють властивостями двовимірного електронного газу.

Тому актуальним є проведення аналізу основ проектування гетероструктурних польових транзисторів високої швидкодії субмікронних структур ВІС/НВІС.

Огляд літературних джерел та постановка проблеми. З середини 60-х років став активно розвиватися новий напрямок у фізиці і техніці напівпровідників – напівпровідникові гетероструктури [1].

У 1970 було висунуто ідею створення напівпровідникових надграток, електронний спектр яких визначається ефектами розмірного квантування [2]. Було синтезовано композиційну надгратку на основі системи GaAsP методом хлоридної газофазної епітаксії, при дослідженні якої, спостерігалися ефекти, пов'язані зі зміною спектру щільності станів [3]. Вже на цьому етапі розвитку технології і досліджень квантоворозмірних (КР) гетероструктур стало зрозуміло, що ця ідея матиме революційний вплив, на всю фізику твердого тіла, дозволяючи створювати штучні матеріали з наперед заданими оптичними і транспортними властивостями і відкриваючи принципово нові можливості як у фундаментальних дослідженнях, так і в створенні приладів [4]. Але стало також ясно, що створення високоякісних КР гетероструктур та, відповідно, реалізація всіх їх можливо-

стей неможливі за допомогою традиційних технологій рідкофазної і хлоридної газофазної епітаксії [5].

Принципові можливості КР гетероструктур були реалізовані лише з розвитком нових технологій: газо-вої епітаксії з металоорганічних з'єднань і молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ) [6].

Вже в 70-і роки були широко розгорнуті дослідження фундаментальних властивостей КР гетероструктур, запропонована і реалізована концепція структур з модульованим легуванням, створені гетеролазери з КР областю рекомбінації [7].

До 1980 року успіхи в області синтезу КР гетероструктур та дослідження їх фундаментальних властивостей стали в значній мірі визначати прогрес в галузі фізики і техніки напівпровідників [8]. Швидкій розробці нового типу польових транзисторів на двовимірному електронному газі сприяла висока концентрація електронів в тонкому шарі, їх висока рухливість і можливість керувати концентрацією носіїв в каналі.

Найбільш вивченими і технологічно відпрацьованими є гетероструктури AlGaAs/GaAs. Перспективними для використання вважаються нітриди галію і алюмінію. Найбільш технологічно освоєні структури GaN/AlGaN [9].

Незважаючи на бурхливий розвиток даної галузі, досі не вирішено такі питання: низькотемпературної епітаксії для формування багаточарових структур; технології формування різких гетеропереходів; літографії з високою роздільною здатністю; металізації контактів з низьким перехідним опором.

Мета та завдання роботи. Метою даної роботи є проведення аналізу сучасних теоретичних основ проектування та формування гетероструктурних польових транзисторів високої швидкодії для субмікронних структур ВІС.

Для виконання цієї роботи були поставлені такі завдання: аналіз процесів формування гетероструктурних транзисторів субмікронних структур ВІС; визначення технологічних процесів необхідних для формування гетероструктурних польових транзисторів у вигляді технологічної САПР; проаналізувати необхідні вдосконалення технології та системи автоматизованого проектування структур ВІС на основі польових транзисторів з гетеропереходом.

© С. П. Новосядлий, С. І. Бойко. 2015

Польові транзистори на гетероструктурах AlGaAs/GaAs із селективним легуванням. Такий ПТ представляє собою нанесений на напівпровідникову підкладку із чистого GaAs із концентрацією залишкових домішок $10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-3}$ над яким розміщений спейсер – тонкий нелегований шар $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ з $N_d < 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а потім – шар сильнолегованого з $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ з $x = 0,3$. На останньому шарі розміщуються контакти витоку, затвору, стоку. Активною областю транзистора виступає двомірний канал, що утворюється у гетеропереході AlGaAs/GaAs. Для покращення контакту з каналом області під стік-витоківими областями можуть бути ретроградно сильно легованими (з використанням самосумщеного затвору), а затвор заглиблений. Така структура ПТГСЛ отримала найбільше поширення і називається нормальною або прямою на відміну від оберненої.

На рис. 1, а, б подана структура такого транзистора та його зонна структура.

Така структура вимагає технології: 1) низькотемпературної епітаксії; 2) формування ретроградних стік-витоківих областей багатозарядною імплантацією; 3) літографії високої роздільної здатності.

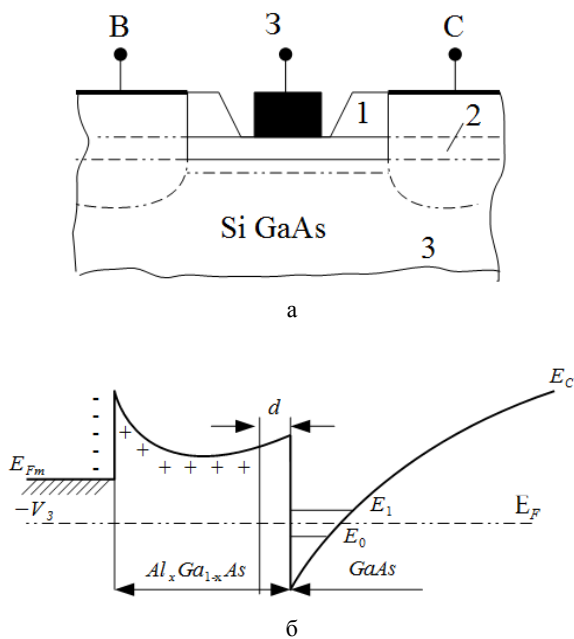


Рис. 1 – Структура ПТГСЛ: 1 – n-AlGaAs, 2 – нелегований AlGaAs, 3 – GaAs; а - 2D ЕГ; б - зонна структура ПТГСЛ в області затвору

Фізичний принцип роботи ПТГСЛ в загальному такий же, як і МДНПТ. В роботі і в структурі ПТГСЛ є, проте, суттєві специфічні особливості, які вимагають створення нової комп'ютерної моделі для опису його основних параметрів і характеристик так необхідних для схемотехнічного моделювання. Його основною особливістю є дуже висока провідність і квантові стани в досить вузькому каналі, а також велика близькість металу затвору до каналу, при великій діелектричній постійній шару GaAs в порівнянні з SiO_2 . Завдяки цим відмінним особливостям крутизна ПТГСЛ в області насичення струму перевищує

крутизну МДНПТ, що і забезпечує його високу швидкість.

Для обчислення характеристик ПТГСЛ потрібно знайти залежність концентрації і рухливості електронів в каналі від прикладених до затвору і стоку напруг. За допомогою метода контролю заряду для концентрації електронів в каналі отримаємо:

$$n_{ss}(x) = \frac{\epsilon}{q(d_d^r + d_i)} (V - V(x) - V), \quad (1)$$

де ϵ – діелектрична проникність AlGaAs, d_d – товщина легованого і d_i – нелегованого шару AlGaAs (рис. 1б); $V_G = \phi_b - \Delta E_c/q + \Delta E_F/q - V_p$; $V_p = q(N_D)^2(d_d)^2/2$; величини ϕ_b , ΔE_c , ΔE_F – параметри гетероструктури.

Саме ці параметри відрізняють вираз для концентрації електронів в каналі для ПТГСЛ від МЕНПТ.

Положення рівня Фермі в гетеропереході і AlGaAs/GaAs при $n_s > 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при $T = 300 \text{ К}$ лінійно залежить від n_s і можна вважати, що $\Delta E_F = an_s$ де $a = 0,125 \cdot 10^{-16} \text{ еВ} \cdot \text{м}^2$.

Для рухливості електронів в каналі як її залежність від напруженості електричного поля використовують різні апроксимації на механізм розсіювання носіїв заряду на фононах і дефектах матеріалу, а саме як $v = f(\mu E)$

$$v = \frac{\mu E}{1 + \mu E/v_s}, v = \frac{\mu E}{(1 + (\mu E/v_s)^2)^2} \quad (2)$$

$$v = \frac{v_s}{\left(1 - \exp\left(-\frac{\mu E}{v_s}\right)\right)}, v = (v_s E_s) \left(2 - \frac{E}{E_s}\right) E,$$

$$0 < E < E_s,$$

$$v = v_s, E > E_s,$$

де v_s – швидкість насичення, μ – низькопольова рухливість.

Добре співпадіння з експериментом отримано в останньому виразі. Підстановка v_s і $v(E)$ за (1) і (2) у вираз для струму стоку дозволяє побудувати стокові характеристики $I_c = f(V_c, V_g)$. Похідна цієї залежності по v_s в області насичення характеристики $I_c = f(V_c, V_g)$ дає крутизну ПТ в цій області. На рис. 2, а, б приведені розрахункові залежності крутизни g_m від напруги на затворі V_g і максимальної крутизни $g_{m\text{макс}}$ від довжини затвору λ .

Порогові частоти для отриманого підсилення струму f_T і підсилення потужності $f_{m\text{макс}}$ визначається виразом:

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_{зв}} = \frac{\bar{v}}{2\pi\lambda}, \quad (3)$$

$$f_{m\text{макс}} = f_T \left(2 \left((R_{зв} + R_b + R_s) / R_{св} + 2\pi f_T R_s C_{св} \right)^2 \right)$$

Для порівняння в табл. 1 подані параметри МЕНПТ і ПТГСЛ, що визначені на основі всіх цих транзисторів.

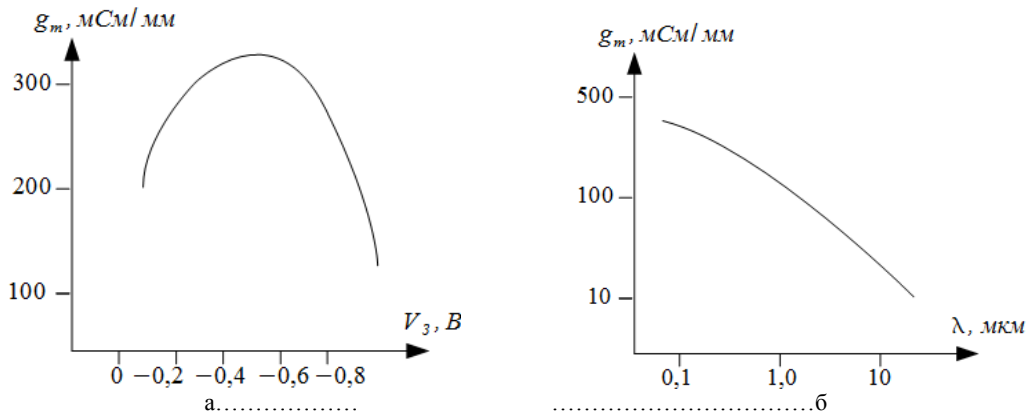


Рис. 2 – Залежність крутизни g_m від: а - напруги на затворі V_g для ПТГСЛ при $\lambda = 1$ мкм і $T = 300$ К; б - від довжини затвора λ для нормально відкритого ПТГСЛ.

Таблиця 1 – Порівняльні параметри МЕНПТ і ПТГСЛ при $\lambda = 1$ мкм

| Тип | g_m | $C_{зв}$ | $C_{зс}$ | R_3 | $R_{зв}$ | R_B | $R_{св}$ | f_T | $f_{макс}$ |
|-------|-------|----------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|------------|
| МЕНПТ | 100 | 1,1 | 0,11 | 4 | 3,6 | 0,93 | 120 | 14 | 30 |
| ПТГСЛ | 140 | 1,3 | 0,09 | 4 | 7 | 1,5 | 220 | 20 | 50 |

Як бачимо у ПТГСЛ швидкодія зростає в 1,4–1,8 раз, а при $\lambda = 0,5$ мкм – в 2-2,3 рази.

Підвищення значень f_T відповідає також зниженню шумів ПТГСЛ.

На сьогодні при моделюванні отримані ПТГСЛ із значенням часу затримки в кільцевому генераторі $\tau_D = 12,5-25$ пс при $T = 300$ К потужністю $P_D = 0,9-4,0$ мВт [10]. Малі значення амплітуди таких ПТГСЛ дозволяють працювати при малих значеннях $\tau_D \cdot P_D$ і тим самим забезпечити високий ступінь інтеграції ВІС і малу затримку логічних схем. Проте, як і у випадку МЕНПТ основним обмеженням є складність отримання однорідних значень поперечних напруг V_T з мінімальним розкидом по пластині ($< 10-15$ мВ). Але субмікронна технологія з багатозарядною імплантацією цю складність усуває.

Створення ПТГСЛ з двомірним дірковим каналом дозволяє застосовувати їх в комплементарних вентилях схем з швидкодією, що є в 2,5-3 рази більшою, ніж у кремнієвих комплементарних вентилях.

Обернені і багатоканальні структури транзисторів на гетероструктурах AlGaAs/GaAs із селективним легуванням. Низька пробивна напруга затвору і стоку ПТГСЛ з прямою структурою обмежує можливості його використання в потужних і НВЧ-пристроях. Мала пробивна напруга зумовлена високолегованим шаром n^+ - AlGaAs, що розміщується зразу під затвором. З метою підвищення пробивної напруги і одночасного покращення високочастотних параметрів в НВЧ-діапазоні рядом дослідників запропоновано ПТ з нелегованою оберненою гетеро структурою, яка розміщується між металом електродів і нормальною гетеро структурою із селективним легуванням та каналом з двомірним електронним газом (рис. 3 а, б). Напруга пробою в такому ПТ може бути збільшена до 10-15 В, а частота f_T до 50-70 ГГц з коефіцієнтом шуму менше 0,95 дБ на частоті 12 ГГц та розміром затвору 0,5-250 мкм.

Визначальними перевагами перед прямою структурою ПТГСЛ (метал/AlGaAs/GaAs) має інвестована

або обернена структура (метал/GaAs/AlGaAs) (IMODFET):

1) в технологічному плані сформувати бар'єр Шоттки і омичний контакт до GaAs є легше, ніж до AlGaAs;

2) поверхня GaAs є більш стабільною, ніж AlGaAs;

3) крутизна ПТ з оберненою структурою слабо залежить від ступеня легування AlGaAs і не знижується при зниженні легування.

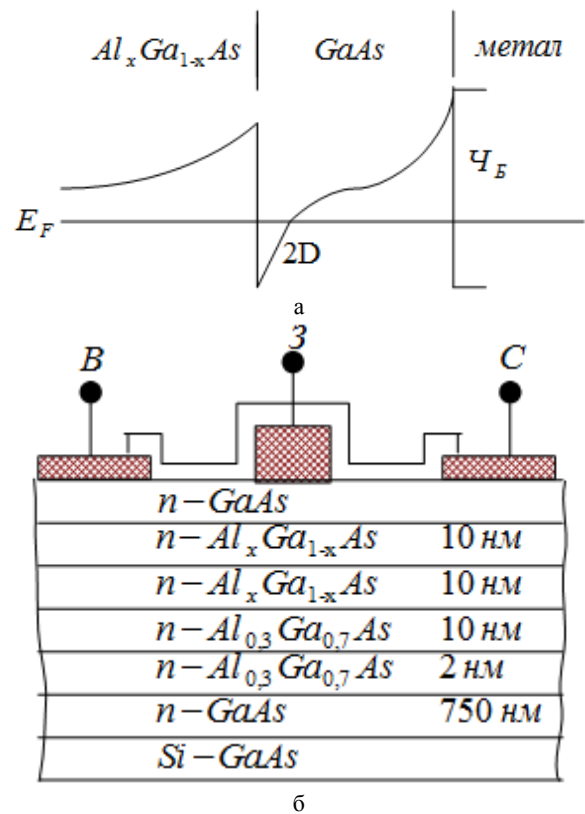


Рис. 3 – Транзистор з оберненою гетероструктурою: а - схематичне зображення оберненої структури ПТГСЛ (зонна діаграма); б - структура ПТ з нелегованою оберненою гетероструктурою

Як і в прямій структурі, шар GaAs є слабо легованим для досягнення високої рухливості в каналі. Шар AlGaAs легований як постачальник електронів в канал і може бути достатньо товстим, але не настільки, щоб його провідність шунтувала двомірний канал в GaAs.

Теорія роботи і комп'ютерне моделювання ПТГСЛ з оберненою структурою на сьогодні недостатньо розроблені. На рис. 4 приведені розрахунки максимальної крутизни в залежності від порогової напруги. В режимі збіднення (коли $V < 0$) транзистор з оберненою структурою не має переваг (крім технологічних) перед транзистором з прямою структурою. Проте в режимі збагачення ($V > 0$) крутизна транзистора з оберненою структурою є вищою, ніж в прямій при однаковій пороговій напрузі. Це зв'язано з тим, що двомірний електронний газ в оберненій структурі є ближчим до металу затвору, ніж в прямій. Особливо значною крутизна є в ПТГСЛ з оберненою структурою при малій товщині шару GaAs, так при товщині шару GaAs рівній 10 нм крутизна $g_m = 1180$ мСм/мм при $T = 300$ К, що майже в 3 рази більше ніж у прямої структури.

Для збільшення крутизни і потужності ПТГСЛ запропоновані структури з кількома паралельно діючими двомірними каналами. Структура двоканального ПТГСЛ (ПТДГСЛ/SDDHFET), складається з ніби то паралельне включення прямої і оберненої структур ПТ. В багатоканальних ПТГСЛ такі структури багатократно чергуються.

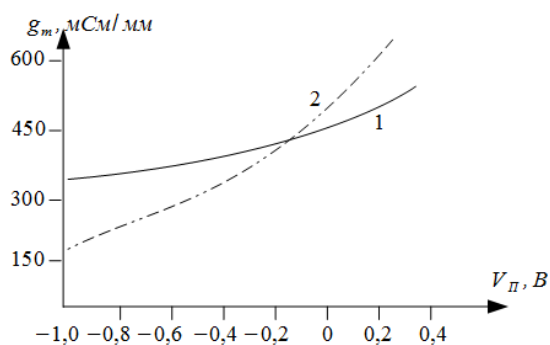


Рис. 4 – Залежність максимальної крутизни від порогової напруги для прямої (1) та інвертованої структури (2) ПТГСЛ

Двоканальні ПТГСЛ необхідно розглядати як необхідні прилади для НВЧ-техніки та швидкодіючих НВЧ-схем, так як щільність електронів у подвійному каналі ПТГСЛ є в 2 рази вищою, ніж в одно каналному (потужність теж зростає у 2 рази), що поряд з підвищенням крутизни дає зниження опору витоку. Для таких структур ВІС необхідний САПР нового покоління, де б була задіяна нова база швидкодіючих транзисторів для субмікронних структур ВІС/НВІС. Це досить складна задача [11].

Хоча ПТГСЛ на структурі AlGaAs/GaAs мають суттєві переваги перед гомоструктурними ПТ у швидкодії на Si і GaAs, їм характерний і ряд факторів, що дещо запобігають подальшому покращенню параметрів: домішкові DX-центри в AlGaAs, тенденція Al до окислення, обмежена рухливість в GaAs, малий ро-

зрив зони провідності на межі гетеропереходу, мала теплопровідність GaAs. [12]

Як бачимо, для даної групи швидкісних транзисторів ПТГСЛ потрібні докладні дослідження і своя нова САПР, включаючи топологічну САПРТС.

Польові транзистори з гетерозатвором високої щільності. Одним із основних недоліків ПТ із затвором Me-N є значний розкид порогових напруг при малому рівні допустимого перепаду логічних рівнів напруги. З цим недоліком зв'язаний малий запас завадостійкості і обмеження максимальної крутизни ПТШ. З метою збільшення висоти бар'єра затвора і зменшення ΔU_T рядом дослідників запропоновано ряд більш складних ПТ з гетеро структурними затворами.

Дамо короткий аналіз нових світових досліджень цього напрямку [13-15].

В кремнієвому ПТ шляхом формування між металом затвору і каналом тонкого шару трійного сплаву металевого аморфного кремнію (α -Si-Ge-B), що має високий бар'єр з кристалічним монокремнієм, вдалося отримати малий розкид $U_T (< 11$ мВ) для ПТ з $\lambda = 0,5$ мкм на підкладці діаметром 100 мм, високу крутизну (> 130 мСм/мм) при логічній амплітуді 0,5 В. Такий транзистор отримав назву МАКПТ/MASFET. Розроблена технологія дозволила шляхом само формування (самосуміщення) отримати затвор з $\lambda = 0,5$ мкм, що забезпечило високу швидкодію МАКПТ: $\tau_D = 114$ пс при $P_D \tau_D = 1,6$ пДж і $P_D \tau_D = 3,3$ пДж при $\tau_D = 26$ нс. Аналогічно отримано МАКПТ на n-GaAs, що забезпечить логічну амплітуду 0,94 В при $\tau_D = 34$ пс і $P_D = 1,9$ мВт [13].

Порогова напруга ПТ на гетероструктурі Me/GaAs/AlGaAs/GaAs визначається за формулою:

$$V_{T0} = \phi + \frac{\Delta E_c}{q} - \frac{qN_d d_d^2}{(2\epsilon)}$$

де ϕ_e – висота бар'єра Шоттки, ΔE_c – стрибок енергії дна зони провідності на гетеропереході, N_d , d_d – концентрація легуючої домішки і товщина шару n-AlGaAs. Так як N_d і d_d є важковідтворюваними параметрами запропоновано використовувати нелегований AlGaAs замість легованого і утворювати структуру ПТ Me/ізолятор/напівпровідник/гетероперехід (МІНГПТ/MISHFET) [14]. Розрахунки ВАХ таких транзисторів, оснований на моделі контролю заряду, такого транзистора [15]. Такі транзистори називають гетероструктурним ПТ з ізольованим затвором (ГІЗПТ, HIGFET), де від знаку прикладеної напруги до затвора ПТ може змінювати тип провідності в каналі, тобто стає як індукований (інверсний).

У випадку n-канального МІНГПТ на GaAs між металом затвору і верхнім шаром GaAs наноситься шар n^+ -Ge для зближення постійних ґраток. Тоді різниця електронної подібності між GaAs і Ge визначала порогову напругу яка на пластині діаметром 50 мм мала ± 10 мВ. Зменшення товщини AlGaAs дозволило збільшити крутизну ПТ. На основі цього була сформована комплементарна комірка із n-i-p- канальних МІНГПТ із затвором $\lambda = 1,5$ мкм. Транзистори з n- і r-каналами мали g_m відповідно рівну 160 і 130 мСм/мм. Час перемикування комплементарної комірки складав 125 пс при потужності 1 мВт.

Для підвищення напруги перемикачання на затворі транзистора ПТГСЛ запропоновано підвищити бар'єр Шотткі в звичайному ПТГСЛ з структурою AlGaAs/GaAs шляхом нанесення шару p+-GaAs між металом затвора і AlGaAs (рис. 5, а,б). В такому транзисторі із збільшеним бар'єром Шотткі (ЗШПТГСЛ, ESMODFET), максимальна напруга на затворі в прямому напрямі підвищилась з 0,8 до 1,6 В, що і збільшило логічний період в 2 рази.

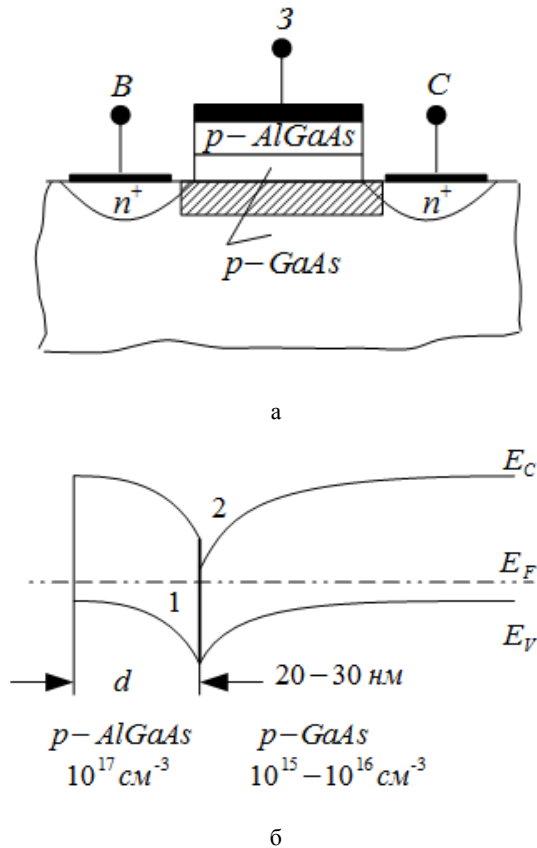


Рис. 5 – ПТГСЛ із збільшеним бар'єром Шотткі: а - структура; б - зонна діаграма, 1 – шар заряджених донорів, 2 – інверсний шар електронів

Як бачимо, новий клас гетероструктурних ПТ відкриває собою сама ідея використання планарного легування гетеропереходу з утворенням горбоподібного потенціального бар'єру (рис. 5, б). ПТ з такою структурою будемо називати ПТ з планарним легуванням гетерозатвором (ПТПЛГ). ПТПЛГ має великі переваги в порівнянні з іншими типами, що ми розглядали вище, включаючи ПТГСЛ. Це добре, бо дозволяє об'єднати всі види транзисторів до планарної кремнієво-арсенідової технології.

Експериментально виготовлений ПТ з дірковим гетерозатвором і планарно-легованими донорами (рис. 5, а) мав $g_m = 500$ мСм/мм при $\lambda = 2$ мкм, а максимальний струм стоку 430 мА/мм при рухливості в каналі 4000 см²/Вс. Зменшення довжини каналу до 1 мкм всі ці показники збільшить в 2 рази. Як бачимо із даного порівняння можна зробити такий важливий висновок: перевага ПТПЛГ перед ПТГСЛ полягає у можливості формувати канал як n-, так і p-типу і реалізації роботи ПТ в режимі як в режимі збіднення,

так і збагачення, тобто формувати комплементарні структури для логічних схем високої швидкодії.

Висновки. В даній статті проведено аналіз основ проектування гетероструктурних польових високої швидкодії для субмікронних структур ВІС/НВІС, а саме: ПТ на гетероструктурах AlGaAs/GaAs із селективним легуванням; обернених і багатоканальних структур ПТГСЛ; ПТ із гетерозатвором;

2. Для практичної реалізації таких структур необхідні наступні технологічні вдосконалення: субмікронна літографія (електронна, іонна, рентгенівська) з високою роздільною здатністю, контрастністю та прицевійним ПФО; багатозарядна імплантація з фотонним відпалом (активацією) для формування ретроградних концентраційних профілей та прицевійною підгонкою порогових напруг; низькотемпературна епітаксія сполук А^{III}В^V для формування багатозарядних структур із заданими електрофізичними параметрами; анізотропне плазмохімічне та іонно-променево травлення (профілювання) діелектриків, металів, напівпровідників, багатозарядних структур і контактів; НВЧ-магнетронна технологія формування багаторівневої комутації на основі силіцидів/поліцидів; низькотемпературна епітаксія арсенід галієвих сполук на кремнієвих підкладках великого діаметру.

3. Для вдосконалення системи автоматизованого проектування структур ВІС/НВІС необхідно розробити бібліотеку транзисторних елементів високої швидкодії та система електрофізичного комп'ютерного моделювання і діагностування транзисторних елементів на основі тестових структур .

Список літератури: 1. Вакулин, И. Н. Физика полупроводниковых приборов [Текст] / И. Н. Вакулин, В. И. Стафеев. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с. 2. Пожела, Ю. К. Физика быстродействующих транзисторов [Текст] / Ю. К. Пожела. – Вильнюс: Моклас, 1989. – 264 с. 3. Москалюк, В. А. Сверхбыстродействующие приборы электроники [Текст] / В. А. Москалюк, В. И. Тимофеев, А. В. Федяй – Киев: НТУУ КПИ, 2012. – 480 с. 4. Lee, J. S. Reduction of current collapse in AlGaIn/GaN heterostructure FETs [Text] / J. S. Lee, J. W. Kim, J. H. Lee et al. // Electron. Lett. – 2003. – Vol. 39 Issue 9. – P. 705–752. 5. Shur, M. S. Low Ballistic Mobility in Submicron HEMT's [Text] / M. S. Shur // IEEE Electron Device Letters. – 2002. – Vol. 23 Issue 9. – P. 511–513. 6. Rudge, P. Investigation Into Intermodulation Distortion in HEMT's Using a Quasi-2-D Physical Model [Text] / P. Rudge, R. Miles, M. Steer, C. Snowden // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2001. – Vol. 49, Issue 12. – P. 2315–2320. 7. Einspruch, N. G. VLSI Electronics: Microstructure Science. Heterostructures and Quantum Devices [Text] / N. G. Einspruch, W. R. Frensley. – San Diego: Academic Press, Inc., 1994. – 452 p. 8. Kasemsuwan, V. Microwave Model for High Electron Mobility Transistors [Text] / V. Kasemsuwan, A. A. Nikali // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1997. – Vol.45 Issue 3. – P. 420–427. 9. Chu, R. AlGaIn-GaN Double-Channel HEMTs [Text] / R. Chu, Y. Zhou, J. Liu et al. // IEEE Transactions On Electron Devices. – 2005. – V.52, Issue 4. – P. 438–445. 10. Yao, J. Comparison of theory and experiment in a modified BICFET/HFET structure [Text] / J. Yao, J. Cai, H. Opper et al // Solid-State Electronics. – 2009. – Vol. 53, Issue 9. – P. 979–987. 11. Borgarino, M. Gate-lag effects in AlGaAs/GaAs power HFET's [Text] / M. Borgarino, G. Sozzi, A. Mazzanti, G. Verzellesi // Microelectronics Reliability. – 2001. – Vol. 41, Issues 9–10. – P. 1585–1589. 12. Sikder, M. J. Scalability of the drain-current drive of AlGaIn/GaN HFETs with gate-length [Text] / M. J. Sikder, P. Valizadeh // Solid-State Electronics. – 2013. – Vol. 89. – P. 105–110. 13. Aggarwal, R. Improved linearity performance of AlGaIn/GaN MISHFET over conventional HFETs: An optimization study for wireless infrastructure applications [Text] / R. Aggarwal, A. Agrawal, M. Gupta, R. S. Gupta // Superlattices and Microstructures. – 2011. – Vol. 50, Issue 1. – P. 1–13. 14. Aggarwal, R. Gate

dielectric engineering of quarter sub micron AlGaIn/GaN MISHFET: A new device architecture for improved transconductance and high cut-off frequency [Text] / R. Aggarwal, A. Agrawal, M. Gupta, R. S. Gupta // State Electronics. – 2007. – Vol. 52, Issue 10. – P. 1610–1614. **15.** Tian, F. Physical and electrical characteristics of hafnium oxide films on AlGaIn/GaN heterostructure grown by pulsed laser deposition [Text] / F. Tian, E.F. Chor // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 518, Issue 24. – P. 121–124.

Bibliography (transliterated): **1.** Vakulin, I. N., Stafeev, V. I. (1980). Fizika poluprovodnikoviyh priborov. Moscow: Sov. radio, 296. **2.** Pozhela, Yu. K. (1989). Fizika bystrodeystvuyushchih tranzistorov. Vilnius: Mokslas, 264. **3.** Moskalyuk, V. A., Timofeev, D. I., Fedyaj, A. V. (2012) Sverhbystrodeystvuyushchie pribory ehlektroniki. Kyiv: NTUU KPI, 480. **4.** Lee, J. S., Kim, J. W., Lee, J. H. et al (2003). Reduction of current collapse in AlGaIn/GaN heterostructure FETs. Electron. Lett., 39(9), 705–752. **5.** Shur, M. S. (2002). Low Ballistic Mobility in Submicron HEMT's. IEEE Electron Device Letters, 23(9), 511–513. **6.** Rudge, P., Miles, R., Steer, M., Snowden, C. (2001). Investigation Into Intermodulation Distortion in HEMT's Using a Quasi-2-D Physical Model. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 49(12), 2315–2320. **7.** Einspruch, N. G., Frenley, W. R. (1983). VLSI Electronics: Microstructure Science. Heterostructures and Quantum Devices. San

Diego: Academic Press, Inc., 452. **8.** Kasemsuwan, V., Nikali, A. A. (1997). Microwave Model for High Electron Mobility Transistors. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 45(3), 420–427. **9.** Chu, R., Zhou, Y., Liu, J. et al (2005). AlGaIn-GaN Double-Channel HEMTs. IEEE Transactions On Electron Devices, 52(4), 438–445. **10.** Yao, J., Cai, J., Opper, H. et al (2009). Comparison of theory and experiment in a modified BICFET/HFET structure. Solid-State Electronics, 53(9), 979–987. **11.** Borgarino, M., Sozzi, G., Mazzanti, A., Verzellesi, G. (2001). Gate-lag effects in AlGaAs/GaAs power HFET's. Microelectronics Reliability, 41(9-10) 1585–1589. **12.** Sikder, M. J., Valizadeh, P. (2013). Scalability of the drain-current drive of AlGaIn/GaN HFETs with gate-length. Solid-State Electronics, 89, 105–110. **13.** Aggarwal, R., Agrawal, A., Gupta, M., Gupta, R. S. (2011). Improved linearity performance of AlGaIn/GaN MISHFET over conventional HFETs: An optimization study for wireless infrastructure applications. Superlattices and Microstructures, 50(1), 1–13. **14.** Aggarwal, R., Agrawal, A., Gupta, M., Gupta, R. S. (2007). Gate dielectric engineering of quarter sub micron AlGaIn/GaN MISHFET: A new device architecture for improved transconductance and high cut-off frequency. Solid-State Electronics, 52(10), 1610–1614. **15.** Tian, F., Chor, E. F. (2010). Physical and electrical characteristics of hafnium oxide films on AlGaIn/GaN heterostructure grown by pulsed laser deposition. Thin Solid Films, 518(24), 121–124.

Надійшла (received) 20.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новосядлий Степан Петрович – доктор технічних наук, професор, Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаніка, Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76025; e-mail: nsp@mail.pu.if.ua.

Бойко Сергій Іванович – аспірант, Прикарпатський Національний університет ім. В. Стефаніка, Кафедра комп'ютерної інженерії і електроніки, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76025; e-mail: sergiy1300@gmail.com.

УДК 669.295

Д. О. ЛИСТОПАД, Г. В. КАРПЕНКО, О. А. ДЖУГАН

АЛЬТЕРНАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТИТАНУ ТА ЙОГО СПЛАВІВ

В огляді розглянуті існуючі та нові технології виробництва титану, їхні переваги й недоліки. Розглянуто три підходи розвитку технологій отримання титану та його сплавів. Надано короткі описи більшості альтернативних електрохімічних, плазмохімічних та металотермічних процесів, а також наведено механохімічні способи отримання титану. Окреслені перспективи розвитку подібних технологій. Визначені питання, що обмежують промислове впровадження альтернативних технологій отримання титану та його сплавів. Зазначено, що актуальними є задачі значного зниження витрат та підвищення продуктивності обладнання стосовно магнієтермічного способу отримання титану.

Ключові слова: титан губчастий, метод, відновлення, технологія, вихідна сировина, розчин, порошок, сплав, реактор, тетрахлорид титану

Вступ. Сучасний процес отримання губчастого титану був запропонований Кроллем в 1940 [1] та швидко отримав промислове впровадження. Процес складається з металотермічного відновлення тетрахлориду титану (ТХТ) рідким магнієм, очищення отриманого титану губчастого від продуктів реакції та наступним його переплавом. Метод Кролля витіснив натрійтермічний процес, запропонований Хантером в 1910 році, та використовується зараз у світі практично на всіх значних титанових металургійних підприємствах.

Сучасна технологія є складною та енерговитратною, тому розробка нових більш економічних способів отримання титану не припиняється протягом багатьох років.

Технології виробництва титану та його сплавів. Розробка технології, альтернативній традиційному промислового способу отримання губчастого титану на основі магнієтермічного відновлення ТХТ є

на сьогодні вельми перспективним напрямком, що активно розвивається. Значні зусилля дослідників спрямовані на розробку нових технологій отримання титану. Ці зусилля можна розділити за принципово різним підходом до технології процесу: електрохімічні, металотермічні та плазмохімічні способи отримання титану. Більшість електрохімічних технологій в якості вихідної сировини використовують TiO_2 , за виключенням Ginatta-процесу, в якому використовується ТХТ.

Найвідомішим проектом серед усіх електролітичних способів отримання титану є Кембрідж-процес (FFC) [2]. Для цього процесу використовували реторту зі сплаву інконель з розплавленим електролітом ($CaCl_2$) в якій вводилися електроди з графіту та зі спечених дисків з діоксиду титану і легувальних елементів. Заявлена досягнута якість за вмістом кисню

© Д. О. Листопад, Г. В. Карпенко, О. А. Джуган. 2015