

С.П. Новосядлий, І.М. Луцький

Шляхи підвищення швидкодії GaAs-полових транзисторів Шотткі (ПТШ) та селективнолегованих гетеротранзисторів (СЛГТ) для формування сучасних НВЧ-схем

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна

Немає сумніву, що використання технологій польових транзисторів із зотвором Шотткі на GaAs для формування швидкодіючих ВІС має велику перспективу. Не менші перспективи відкриваються перед унікальною за своїми властивостями СЛГТ – технологією для проектування сучасних ВІС/НВІС.

У випадку застосування СЛГТ можна задовільнити 3 головні технологічні критерії: швидкодію, низьку споживану потужність і техноло-гічність процесу виготовлення складних структур ВІС.

Ключові слова: Селективно легований гетеротранзистор, польовий транзистор Шотткі, епітаксія.

Стаття поступила до редакції 23.01.2015; прийнята до друку 15.03.2015.

Вступ

Очевидно, що застосування даної технології є найбільш ефективним для створення нових високочастотних схем з низьким рівнем шуму, логічних схем, замовних ІС/ВІС з унікальними характеристиками і т. д. Дійсно швидкість і максимальна споживана потужність є основною перевагою даної технології.

Дана стаття дозволяє якісно провести аналіз за швидкодією ПТШ і СЛГТ з метою використання останніх у прогресивних схи-мо технічних задачах.

І. Арсенід галієві польові транзистори із затвором Шотткі (ПТШ)

Структура ПТШ подана на рис. 1, такий приклад формується на напів-ізолюючій підкладці GaAs, до параметрів якої пред'являється ряд важливих вимог: термостійкість і мінімальна концентрація домішок та густини дефектів. На поверхні підкладки іонним легуванням формується пасивний шар. Так як у відповідності з фізикою функціонування приладу пасивний шар повністю збіднюється при подачі зміщення на затвор, то повинен існувати взаємозв'язок між рівним легуванням пасивного шару n-типу і його товщиною. Деколи між підкладкою і активним шаром вводять високоомний буферний шар товщиною декілька мікроампер, призначення якого полягає в підвищенні якості межі

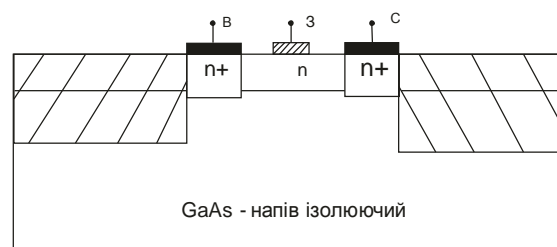


Рис 1. Структура ПТШ на GaAs.

розділу підкладки – пасивний шар і рухливості носіїв заряду. Такий буферний шар формується методами епітаксійного нарощування.

Поверхневий опір активного шару – канала n-типу повинна складати 1550 – 2100 Ом/□. Отримання омичних контактів до шарів з таким опором є практично неможливим, тому в цілому необхідний складний профіль розподілу донорної домішки: 1) локальні поверхневі області з високим рівнем легування для отримання ретроградних контактів до стік-витоків; 2) шар із пониженою концентрацією домішки. Далше після локального легування контактних областей і відпау радіаційних дефектів формуються ізолюючі області локальною іонною імплантацією бору (B^+ , B^{++}) або водою (H^+) або кисню (O^{++}). Для омичних контактів і затвора Шотткі можуть бути використані металеві композиції, що використовується для біполярних ІС в тому числі силіцид чи поліцид.

1.1. Структура ПТШ в інтегральному виконанні на Sita GaAs.

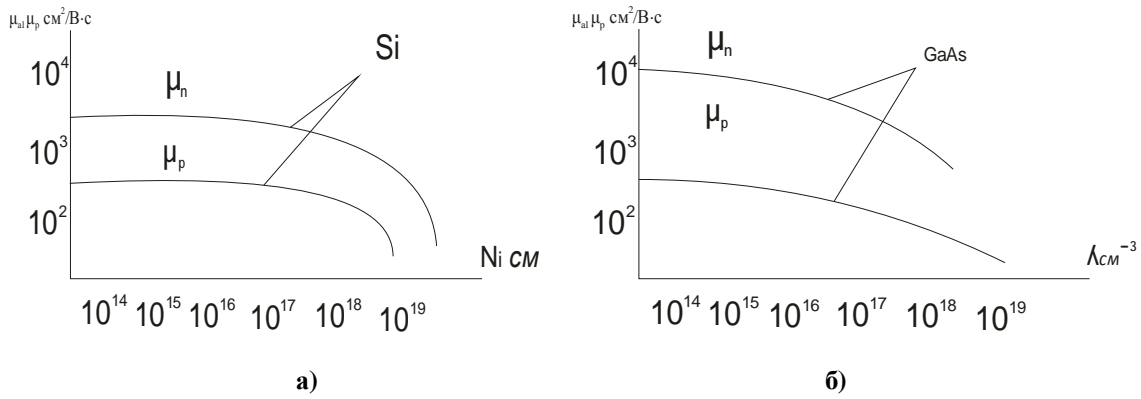


Рис. 1. Залежність рухливості носіїв заряду від концентрації легуючої домішки в підкладці кремнію а) та підкладці арсеніду галію б).

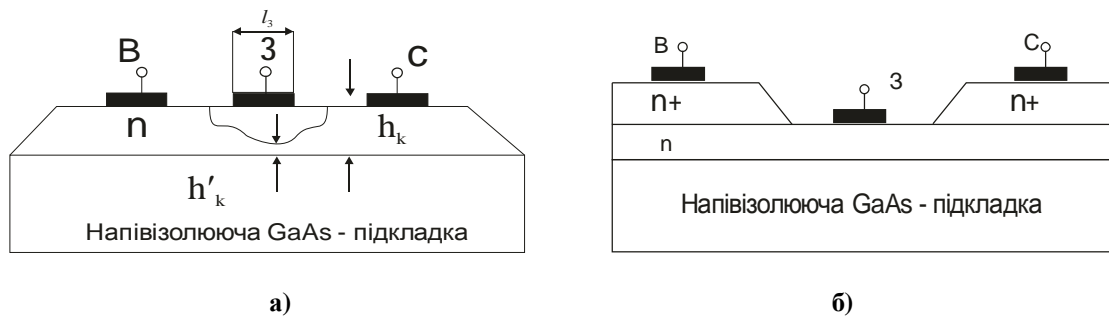


Рис. 2. Транзистор із затвором Шотткі з простою структурою а) і ПТШ із (утопленим затвором) зменшеним опором пасивних областей б).

Важливим моментом в конструкторсько – технологічній розробці ПТШ є зменшення опору витік – канал для підвищення крутизни транзисторів, що збільшує їх швидкодію. Зниження цього опору досягається зменшенням контактного опору метал – напівпровідник, розпоширенням n^+ -областей за межі областей металевих контактів таким чином, щоб відстань між контактом областей n - типу була рівною приблизно трьом довжинам затвора. Суттєвого зниження опору витік – канал можна досягти, використовуючи технологічний прийом самосуміщення затвора. В цьому випадку контактні n^+ - області витоку і стоку формується вже після виготовлення затвора Шотткі, матеріал якого є маскою при локальному іонному легуванні донорною домішкою, наприклад Si^+ . Очевидно, що для структури із самосуміщенням необхідні такі матеріали для затвора Шотткі, які були б термостійкі при температурах відпалу радіаційних дефектів. Так матеріалами можуть бути Тантал (Ta), силіцид вольфраму W_5Si_3 , нітрид вольфраму WN_x .

Польові транзистори із затвором Шотткі на GaAs є одним із основних активних елементів надшвидкодійних мікросхем. Їх перевага над

кремнієвими приладами зв'язана з великою рухливістю електронів (рис. 1) і більш високою швидкістю насичення в сильних електричних колах.

1.2. Моделювання характеристик і параметрів ПТШ.

Принцип роботи ПТШ пояснимо, виходячи із рис. 2,а. Основою ПТШ є напівізолюючий GaAs ($\rho=10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) легований, як правило, хромом (Cr). Електроди витоку і стоку утворюють омичні контакти з епітаксійною областю за рахунок плавлення наприклад, сплаву AuGe-12. Структура, яка подана на рис. 2, представляє собою резистор, по якому протікає струм величиною:

$$I = gn_k h_k ZV \quad (1)$$

де n_i , h_i – концентрація в епішарі і його товщина; Z – ширина контакту, $V = \mu_a E$ – це дрейфова швидкість електронів (μ_a – рухливість електронів, E – напруженість електричного кола в каналі). При збільшенні напруженості електричного поля E в каналі в такому резисторі спостерігається насичення швидкості дрейфа i , відповідно, струму I . Швидкість електронів в каналі є обмежена величиною V_{max} при досягненні напруженості електричного поля значення $E_n = V_{max} / \mu_n$.

Електрод затвора (рис. 2,а) утворює з епітаксійною плівкою n – типу контакт Шотткі. Змінюючи напругу на затворі, змінюється товщина шару просторового заряду контакта Шотткі (на рис. 2а) і, відповідну товщину області каналу і його опір. Величина h'_k визначає мінімальну товщину каналу. Вихідна вах ПТШ містить як круту, так і пологоу області і має вигляд, що нагадує характеристику МОН – транзистора (рис. 3).

Таким чином, ПТШ є резистор із змінним опором, струм якого управляється напругою на затворі. Товщина каналу h_k складає доли, а довжина L – одиниці мікрометрів і менше. Значення $h_k = 4 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Структура ПТШ нарис. 1,б вже має менший опір пасивних областей.

Величина

$$V_{\max} = \begin{cases} V_{\max 0} = 1.5 \cdot 10^7 \text{ см/спри} L \geq 1 \text{ мкм} \\ V_{\max 0} = 1 + L_{02}/L_2 \text{ при } 0,2 \leq L \leq 1 \text{ мкм} \end{cases} \quad (2)$$

де $L_0 = 0,27 \text{ мкм}$.

Управління струмом стоку може здійснюватися як при від'ємних, так і при позитивних напругах на затворі за рахунок зміни об'ємного заряду контакта Шотткі. В залежності від наявності або відсутності каналу при нульовому потенціалі на затворі ПТШ поділяються на нормально відкриті або нормально закриті.

Важливим параметром ПТШ є порогова напруга

$$R_2 = \rho_k L_{c-3} / (Z h_k (1-a)) \cdot \ln 1/a \quad R_3 = \rho_k (L_3 + L_{в.3}) / (Z h_k (1-a)) \ln 1/a \quad (6)$$

Тоді, підставляючи значення опорів R_1, R_2, R_3, R_4 отримаємо вираз для U_c :

$$U_c = a I_H \rho_k / h_k Z \cdot (2\sqrt{m h_k} + (L_3 + L_{в.3} + L_{с.3}) / (1-a) \cdot \ln 1/a) \quad (7)$$

Напруга на затворі U_3 , що забезпечує заданий струм I_c та відповідну напругу U_c , визначається наступним чином:

$$U_3 = U_{3,к} + U_k \quad (8)$$

де U_k – потенціал каналав точці, де товщина каналу є рівною h'_k і $U_{3,к}$ – напруга затвор-канал, що забезпечує максимальну товщину шару просторового заряду. Величина потенціалу $U_k = I_c (R_3 + R_4)$. Підставляючи в даний вираз значення опорів R_3 і R_4 , отримаємо значення

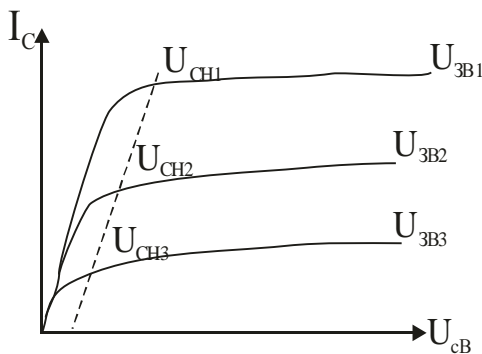


Рис. 3. Вихідна характеристика ПТШ.

U_c , яка представляє собою напругу на затворі, при якому відкривається канал при струмі в 10 мкА. Ця напруга є позитивна для нормально закритих ПТШ-транзисторів і від'ємна для нормально відкритих.

При позитивних напругах на затворі ПТШ об'ємний заряд або затвором зменшується і струм стоку збільшується. При підвищенні напруги на затворі можливе відпирання контакта Шотткі і появи затворних струмів. Це пояснює той факт, що вах транзистора інколи виходять не із початку координат.

Максимальний струм стоку (струм насичення), який може протікати в даній структурі при відсутності шару просторового заряду контакта Шотткі, отримаємо з врахуванням (1):

$$I_H = g n_k h_k Z V_{\max} \quad (3)$$

Як впливає із співвідношень (1) і (3) зміна струму стоку I_c визначається тільки зміною h'_k . Це означає, що $I_c = a I_H$, де $a = h'_k / h_k$. Величина

$$U_c = I_c \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \quad (4)$$

де R_1, R_2, R_3, R_4 – опір відповідних областей. Опір омичних контактів витік-затвор-канал R_4 і стік-канал R_Y ($R = \sqrt{R_s / \rho_n / b}$). При однаковій довжині омичних стік-витоківих контактів:

$$R_1 = R_Y = \rho_n \sqrt{h_k m} / (h k) \quad (5)$$

де $m = \rho_n / \rho_k$, $\rho_k = (g h_k p^*)^{-1}$ – питомий опір каналу.

Опори R_2 і R_3 знаходимо за формулами:

потенціалу:

$$U_k = a I_H \rho_k / h_k Z \cdot (\sqrt{m h_k} + (L_3 + L_{в.3} / (1-a)) \cdot \ln 1/a) \quad (9)$$

Але напруга

$$U_{3,к} = \phi_n - h_k^2 (1-a)^2 q n_k / 2 \epsilon_n \epsilon_0 \quad (10)$$

При $a = 0$ отримаємо із виразу (10) значення порогової напруги

$$U_T = \phi_n - h_k^2 q h_k / 2 \epsilon_n \epsilon_0 \quad (11)$$

Напруга на стоці при $I_c = 0$ буде визначатись виразом

$$U_{c0} = \begin{cases} 0 & \text{при } U_3^* \leq U_{ш}^* \\ U_3 - U_{ш}^* & \text{при } U_3^* > U_{ш}^* \end{cases}$$

Залежність крутизни СПТШ на пологій області вах

$$S = dI_c / dU_{зв} = b (U_{зв} - U_{звт}) = \sqrt{2 b I_c},$$

де $b = \epsilon_n \epsilon_0 \mu_0 Z / (L h)$ – питома крутизна, а середній опір на крутій області вах:

$$R_i = (U_c - U_{c0}) / I_c$$

Швидкодія ПТШ визначається аналогічно швидкодії МОН-транзистора за двома основними параметрами: часом прольоту носії через канал і постійно заряджених ємності затвора через опір каналу.

II. Фізико-технологічні особливості формування структур СЛГТ

Як ми знаємо швидкодія транзисторів визначається як часом життя носіїв заряду, та їх рухливістю. Тому для підвищення швидкодії транзисторів використовують як технологічні, так і схемотехнічні рішення, направлені на збільшення даних параметрів. Величина цих параметрів контролюється технологічною САПР з використанням тестових структур.

Тому в даному розділі ми обговоримо матеріалознавчі структурні та схематичні аспекти селективно легованих гетеротранзисторів (СЛГТ), що досягнуті нами в конструкторсько-технологічних розробках.

В основі СЛГТ лежить ефект двомірного електронного газу (ДЕГ), що утворюється на межі широкозонного (AlGaAs) напівпровідника і вузькозонного GaAs-напівпровідника, тобто структури сформованої на основі епісійного вирощування.

2.1. Сучасні вимоги до матеріалів для формування структур СЛГТ.

Молекулярно-променева епітаксія – це в своїй основі термічне напilenня у високому вакуумі, суттєве покращення завдання більш прецизійному контролю променевого потоку і умов напilenня. Саме цей метод в перше забезпечив отримання різних меж розділу AlGaAs–GaAs, строго встановленої товщини шарів і точний контроль роботи легування (на основі технологічної САПР), що була необхідною умовою створення СЛГТ. МПЕ – універсальний метод вирощування тонких плівок напівпровідників, металів та озольотів. МПЕ напівпровідникових сполук А"В" вимагає в себе реалізацію потоку атомів або молекул III або V груп з підігрітою до даної температури монокристалічною підкладкою. Коротко опишемо систему МПЕ на базі установки GEN-11 фірми Varian.

Сьогодні всі промислові системи МПЕ включають в себе завантажувальну камеру, аналітичну камеру і камеру росту, кожна із яких має свою незалежну систему відкачень і ізолювана від других вакуумними затворами. Електронна промисловість пішла по шляху збільшення діаметру підкладок GaAs, так що система МПЕ сьогодні забезпечують епіріст на підкладках діаметром ≥ 76 мм.

Частота і рівномірність росту плівки GaAs при МПЕ досягається за даною швидкістю росту, яка складає ~ 1 мкм/год. Температура росту для GaAs і AlGaAs знаходиться на рівні 600 і 700 °C відповідно, хоча можна використовувати і більш низькі температури, наприклад НВЧ-енітаксію в реальних електронно-циклотронного резонансу (ЕЦП). Тут співвідношення As/Ga в потоці повинна бути трохи більше одиниці з метою отримання дзеркальної поверхні. Звичайними домішками для легування використовують кремній (n-типу) і берилій (p-типу).

Чистота нелегованого спеціальним чином GaAs може бути дуже високою, з рівним фонової

концентрації носіїв на рівні 10^{13} – 10^{14} см⁻³. Головною

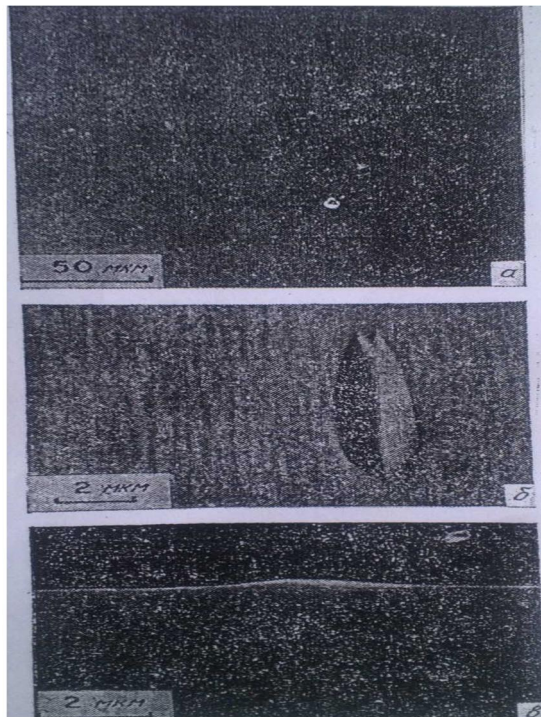


Рис. 4. Дефекти в епішарах: а, б – овальні, в – межі розділу.

забруднюючою домішкою є вуглець. Такі плівки мають напів-ізолюючі властивості з питомим опором $> 10^6$ Ом*см. При обертанні взірця в процесі росту рівномірність товщини і рівне легування по поверхні GaAs-підкладки діаметром 50 і 76 мм повинна бути $\pm 0,5$ та 1 % відповідно. Для шару n-типу Al_{0,32}Ga_{0,62}As однорідність за товщиною складає ≤ 1 % для підкладки Ø56 мм, аоднорідність легування ± 1 % для підкладок Ø76 мм.

Поверхня плівок, отриманих методом МПЕ, завжди містить макроскопічні дефекти, які називають овальними дефектами (рис. 4). Вони представляють собою бугорки, які орієнтовані в напрямі [100] на підкладках GaAs, орієнтованих по площині (100). Зазвичай їх площа складає від 10 до 100 мкм² (для плівок СЛГТ товщиною 1 мкм). Сьогодні типове значення густини таких дефектів на GaAs – підкладках з гетерним шаром складає ≤ 10 см⁻², бо саме гетерна технологія зменшує їх щільність на 1 - 2 порядки.

Причини утворення таких дефектів полягають у сегрегації атомів Ga на домішці (залишковому вуглеці або оксидах) або на дефектах структури (дислокації) на поверхні або в епішарі, присутності Ga₂O в розплаві або бризгах із комірки випаровування Ga.

2.2. Види структур СЛГТ і особливості технології їх формування.

Для формування селективнолегованих гетеротранзисторів високої швидкодії використовують цілий ряд оригінальних структур:

1. Інвертована структура, що подана на рис. 5 – це структура, в якій область нелегованого GaAs

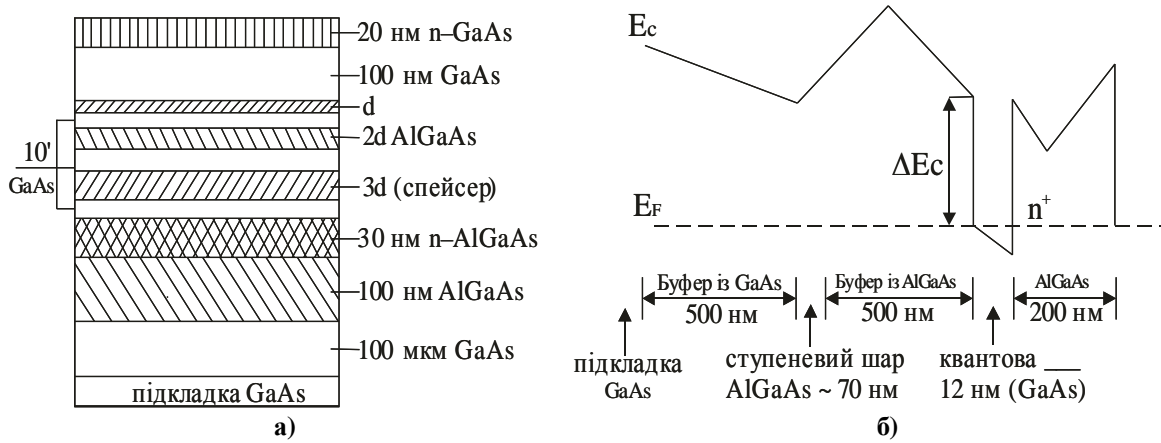


Рис. 5. Поперечні стани інвертованої структури СЛГТ із спейсером у вигляді надгратки а) та діаграма зони провідності структури СЛГТ з одним квантованою ямою б).

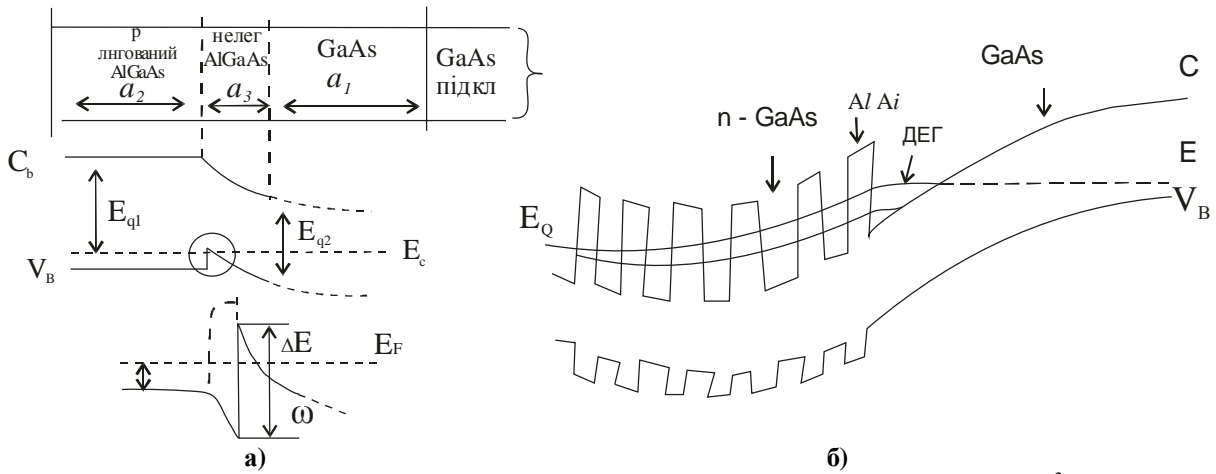


Рис. 6. Зонна діаграма р – каналної структури СЛГТ а) та зонна діаграма структури С²ЛГТ б).

вирощена поверх донорного шару AlGaAs. В такій може бути покращений омичний контакт до ДЕГ, а також знижений витоковий опір, бо метал омичного контакту AuGe – Ni не проникає через шар AlGaAs, яка не має місця в звичайній структурі.

2. Структура СЛГТ з однією квантовою ямою. Для отримання такої структури нормальна структура СЛГТ вирощується на товстому буферному шарі AlGaAs з ДЕГ і який займає квантову яму (товщиною 12 нм) в GaAs. Тут вже електрони із ДЕГ можуть тунелювати через тонкі бар'єри AlAs (~ 1,5 – 2 нм) і збиратися в потенціальній ямі на межі розділу між надграткою і нелегованим буферним шаром GaAs (рис. 5,б). Для такої структури для ДЕГ при T = 77 K вдалося отримати рухливість і поверхневу концентрацію відповідно $10^5 \text{ см}^2/\text{V}\cdot\text{с}$ і $< 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

3. р – канална структура СЛГТ. Для комплементарних схем представляє інтерес дослідження р – каналних СЛГТ, що містять вже двомірний дірковий газ (ДДГ). Про ДДГ вже були аналогічні дослідження як і для ДЕГ. Так як розрив зонної структури у валентній зоні складає десь 20 – 25 % розриву зони провідності, то для утримання ДДГ вміст Al в сполуці AlGaAs повинна бути

збільшеною до величини $x = 0,5 - 0,7$ (рис. 6,а), при поверхневій концентрації дірок $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ вдалося отримати рухливість $\mu_p = 4 \cdot 10^4$ при T < 10 K.

4. Структура – надгратка – СЛГТ (С²ЛГТ). В такій структурі С²ЛГТ шар AlGaAs замінюють надграткою AlAs – n – GaAs. Так як ширина квантової ями в GaAs є малою (< 2 нм), основний електронний рівень в надгратці піднімається суттєво вище дна зони провідності об'ємного GaAs. Тоді електрони можуть тунелювати через тонкі бар'єри AlAs (1,5 – 2 нм) і збиратися в потенціальній ямі на межі розділу між надграткою і нелегованим бар'єрним шаром GaAs (рис. 6,б).

2.3. Особливості технології формування структур селективно легованого гетеро транзисторами основи швидкодіючих схем.

СЛГТ входить в сімейство ПТ і тому має багато спільного з добре нам відомими кремнієвими МОН – транзисторами і ПТ із затвором Шоттки на GaAs, розглянутому в першому розділі даної статті. Як ми вже знаємо, в СЛГТ струм протікає в тонкому шарі паралельно поверхні і управляється металевим затвором, розміщеним між виток і стоком. Напруга U_z , яка прикладана до затвору, модулює

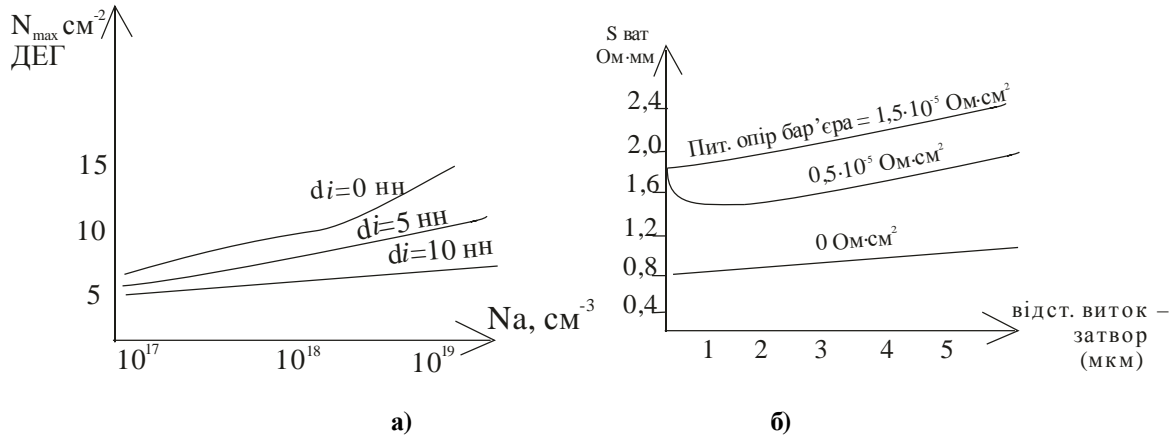


Рис. 7. Залежність максимальної поверхневої концентрації ДЕГ від рівня легування донорного шару AlGaAs в СЛГТ при різній товщині спейсера d_i а) і залежність опору витоку СЛГТ від відстані витік – затвор б).

густину носіїв в каналі (n_s) і, відповідно, визначає величину струму. Так як заряд, удалений від каналу, накопичується на затворі, то приведена крутизна q_m і ємність затвора C_3 зв'язані між собою співвідношенням:

$$\tau_0 = C_3/q_m = \epsilon L_3/v_{ef} \quad (13)$$

де ϵ – діелектрична матеріала під затвором, L_3 – довжина затвора, v_{ef} – середня швидкість носіїв заряду під затвором.

Подібність СЛГТ з МОН – транзисторами на кремнії визначається аналогічними залежностями поверхневої концентрації індукованих носіїв від напруги на затворі $n_s = f(U_g)$ та квантування енергетичних станів у вертикальному напрямі. Управління зарядом в СЛГТ дуже подібне на управління зарядом в n – МОН – транзисторі. Зазвичай в СЛГТ нелегований шар GaAs має малу діркову провідність, і в області гетеропереходу із сторони GaAs створюється канал з інверсією електронної провідності.

Другою властивістю СЛГТ, що робить його структуру подібною до кремнієвих МОН – транзисторів, є наявність розмірного квантування у вертикальному напрямі. Товщина потенціальної ями складає тільки 10 нм, так що декілька нижніх підзон зазвичай є розділені енергетично на 30 – 50 meV. Тому квантові ефекти не відіграють практичної значності в приладах, які працюють при $T > 77$ К.

А тепер перейдемо до подібності СЛГТ до ПТ із затвором Шотткі на GaAs. В СЛГТ затвори також виконують на бар'єрі Шотткі, який обмежує перепад прямої напруги. У всіх схемних рішеннях, відомих на сьогоднішній день, алюмінієві затвори наносили на $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$, в результаті чого утворюється бар'єр висотою 1В, що дозволяє збільшити перепад логічних рівнів і заодно завадостійкість. Як і в ПТ із затвором Шотткі, канали в СЛГТ представляє собою напівпровідник з провідністю, яка є близька до власної, і з затвором, що не перекривається з областями омичних контактів витоку – стоку.

2.4. Унікальні властивості СЛГТ: частотна характеристика, гранично частота і швидкодія.

Структури СЛГТ мають ряд унікальних

властивостей, які ж мають ПТ на МОН – транзисторах. Одним із них є наступна залежність порогової напруги:

$$U_T = \phi_B - U_{p2} + (\Delta E_c - \Delta E_f) / e \quad (16)$$

де $U_{p2} = (eN_a/2\epsilon)d_a^2$.

Визначальним в цьому виразі є висота бар'єра Шотткі ϕ_B , рівень легування N_a ізолятора AlGaAs, товщина легованого матеріалу d_a та величина розриву зони провідності ΔE_c . Ні один з цих параметрів не входить в аналогічну формулу для ПТ із затвором Шотткі. Управління зарядом в структурах СЛГТ визначається максимальною поверхневою концентрацією ДЕГ, яка відповідно є обмежена зарядом в донорному шарі N_a .

Розрахунок цієї максимальної поверхневої концентрації заряду n_{s0} подано на рис. 7а) для різних товщини спейсерного шару.

Опір витоку в СЛГТ також має свою особливість. В тому випадку, коли в структурі СЛГТ використовується верхній шар GaAs для зменшення поверхневого опору в області витік – затвор, донорний шар з шириною забороненою зоною є бар'єром для вертикального переносу і все падіння потенціалу проходить на ньому (рис. 7,б).

І третьою унікальною властивістю СЛГТ є висока рухливість, яка досягається селективним легуванням.

Висновки

1. Не підлягає сумніву, що використання технології ПТ із затвором Шотткі на AlGaAs для розробки швидкодіючих ВІС має широкі перспективи. Не менш перспективним відкривається перед унікальною за своїми можливостями СЛГТ – технологією для проектування цифрових швидкодіючих ВІС.

2. Встановлено, що основними технологічними операціями для формування структур СЛГТ є операції, які потребують модернізації під арсенід галієву технологію: низько температурна НВЧ – епітаксія в реакторах ЕЦП; газофазна епітаксія з використанням металоорганічних сполук; багатозарядна іонна імплантація; субмікронна

проекційна літографія; іонно – плазмова та плазмо–хімічна травлення багаточарових структур; металізація низькоомних контактів; формування компенсуючих покриттів для GaAs, які мінімізують зарядковий стан на міжефозній межі розділу; технологічна САПР.

3. Експериментальними дослідженнями визначено три основних технологічних критеріїв технології СЛГТ: висока швидкодія, в тому числі при низьких температурах; низька споживана потужність ВІС; висока технологічність формування структур складних ВІС (аналогово–цифрових).

- [1] С.П. Новосядлий, Суб-і наномікронна технологія структур ВІС. Монографія (Місто НВ, Івано-Франківськ, 2010).
- [2] С.П. Новосядлий, Matlab в радіофізиці і електроніці. Навчальний посібник з грифом МОН України (Сімик, Івано-Франківськ, 2013).
- [3] С.П. Новосядлий, Р.Б. Атаманюк, Фізика і хімія твердого тіла 10(1), 205 (2009).
- [4] С.П. Новосядлий, В.М. Вівчарук, Технология и конструирование в электронной аппаратуре 3(81), 35 (2009).
- [5] С.П. Новосядлий, В.М. Вівчарук, С.М. Вертепний, Восточно-Европейский журнал передових технологій. 1/7(37), 26 (2009).
- [6] С.П. Новосядлий, В.М. Вівчарук, В.П. Перегінський, Фізика і хімія твердого тіла 10(4), 957 (2009).
- [7] С.П. Новосядлий, С.М. Марчук, Т.Р. Сорохтей, Ю.В. Возняк, Фізика і хімія твердого тіла 13(2), 416 (2012).
- [8] С.П. Новосядлий, Т.П. Кіндрат, Т.Р.Сорохтей, Ю.В. Возняк, Фізика і хімія твердого тіла 13(3), 618 (2012).
- [9] С.П. Новосядлий, Л.В. Мельник, Т.П. Кіндрат, В.М. Варварук, Східно-Європейський журнал новітніх технологій 4/5(64), 1 (2013).