

С.П. Новосядлий, Т.П. Кіндрат, Т.Р. Сорохтей, Ю.В. Возняк

Порівняльний аналіз сучасних кремнієвої і арсенідгалієвої субмікронних технологій формування структур швидкісних цифрових великих інтегральних схем

*Кафедра радіофізики і електроніки Прикарпатського національного університету ім. В. Стефаника
вул. Шевченка, 57, 76025 Івано-Франківськ, Україна. e-mail: kindrat@i.ua, majesty@nashemisto.if.ua*

В даній статті показані тенденції і перспективи розвитку розробок транзисторних структур (ТС) для промислового виготовлення конкурентних кремнієвих та арсенідгалієвих швидкісних цифрових ВІС – елементно-технологічної та конструкторської бази засобів обчислювальної техніки (ЗОТ). В даній статті висвітлюються унікальні властивості як кремнієвої, так і арсенідгалієвої субмікронних технологій та можливості їх суміщення.

Ключові слова: Арсенід галію, топологія, НВІС, швидкодія, технологічний процес.

Стаття поступила до редакції 23.12.2011; прийнята до друку 15.06.2012.

Вступ

Удосконалення надвеликих інтегральних схем (НВІС) і надшвидкісних надвеликих інтегральних схем (НЗВІС) проходить на основі розвитку нових фізичних принципів реалізації приладних структур, технологічних проектів і маршрутів виготовлення, структурно-топологічних рішень компонентів, фрагментів схемотехніки, а також сучасних методів математичного моделювання і автоматизованого проектування елементно-технологічної бази кремнієвих та арсенідгалієвих НВІС і НЗВІС [1, 2].

Існуюча невідповідність між можливостями організацій – виготовлювачів високопродуктивних і супер-ЕОМ, і значними складнощами здійснення пошукових на нових фізичних принципах розробок висунули на перший план сучасні і перспективні дослідні і промислові взірці розробок НВІС і НЗВІС на основі інтенсивно розроблюваних суб- і наномікронних технологій на арсеніді галію і кремнію. Величезна зацікавленість до даних розробок може бути, по виготовленню супер - ЕОМ в США, Японії, Західній Європі (фірми Cray, IBM, CDC, Fujitsu, Hitachi, NEC, Siemens) які дуже тісно співпрацюють з напівпровідниковими фірмами в області розробок більш швидкісних і щільно упакованих (арсенідгалієвих польових і біполярних і К-МОН ВІС) з метою реалізації надшвидкодії, високої ступені інтеграції, а також додаткової можливості збільшення швидкодії за рахунок інтенсивного охолодження, включаючи кріогенний режим рідкого азоту (77 К).

Для реалізації суб- і наномікронних НВІС і НЗВІС на сучасному етапі і в найближчому майбутньому будуть використовуватись монокремний і напівізолюючий арсенід галію, який має ряд визначних переваг перед кремнієм: високу рухливість електронів і потенційну можливість застосування напівізолюючої підкладки, що забезпечує сформованим елементам більш високу швидкодію. Рухливість електронів в GaAs може бути досягнута при $T = 300 \text{ K}$ $(7 - 9) \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, в той же час як у Si вона не перевищує $1,2 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; при охолодженні до температури рідкого азоту (77 К) рухливість сильно зростає до величини $(1 \div 10) \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Така велика рухливість електронів досягається і в 2D-електронному газі селективно легованих польових транзисторів на шаруватих арсенідгалієвих структурах. Можливість збільшення швидкодії елементів та приладних структур на «гарячих» електронах реалізує субмікронна арсенідгалієва технологія польових транзисторів (ПТ) з n-каналом, на гетеропольових перехідних транзисторах з високою рухливістю електронів (селективно легованих польових транзисторів СЛПТ), біполярних гетеротранзисторах з варізонним емітером [1, 2, 3].

Високе значення питомого об'ємного опору $> 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ внаслідок більш широкої забороненої зони (1,52 eV) у нелегованого матеріалу дозволяє отримувати напівізолюючі GaAs-підкладки, наявність яких при формуванні субмікронних швидкісних структур дозволяє зменшити не тільки паразитні ємності прикладних структур, але і

постійні часу міжелементної лінії зв'язку (ЛЗ).

Національні програми Японії та США по ЕОМ 5-го та 6-го поколінь включають і широко анонсують GaAs-технології, на яких можлива розробка супер-ЕОМ з продуктивністю $> 10^{16}$ операцій/с на початку 2000 років з досягненням степені інтеграції ВІС на ПТ $\geq 10^6$ вент/см² при потужності споживання > 20 Вт/кристал, а максимальна частота переключення зростає до десятків гігагерц. В субмікронній області дуже перспективною є технологія формування ПТ із затвором Шотткі (ПТШ) і логічні схеми на їх основі, які забезпечують в режимі кільцевого генератора затримки < 10 пс, при мінімальному споживанні потужності. Сьогодні знаходять застосування матричні GaAs-BIC із системною затримкою 100 – 200 пс. В області освоєних схем пам'яті з GaAs-BIC на ПТШ також є значні досягнення. Освоєні статичні ОЗП з об'ємом 16 – 256 Кбіт з часом вибірки 0,1 – 2 нс для потужності споживання в 200 мВт. Технологічні можливості дозволяють для GaAs-BIC досягти субнаносекундних часів вибірки при загальному зменшенні енергоспоживання. Тут основна проблема реалізації субнаоструктурних GaAs-BIC на нормально закритих самосуміщених ПТШ полягає в необхідності відтворення і також стабілізації порогової напруги, яка визначає стабільність логічних рівнів.

Фундаментальні дослідження гетероперехідних структур привели до інтенсивного розвитку арсенідгалієвої технології гетероперехідних (ГППТ) або (СЛПТ) і біполярних гетеро-транзисторних структур з варізонним емітером (БГТС). Висока ширина забороненої зони GaAs дозволяє піднести верхню межу температурного діапазону роботи ВІС до температури $+ 350$ °С.

Реальні технологічні успіхи в розробці GaAs-біполярних гетероструктур, які дозволили отримати реальні для ненасичених логічних елементів затримки 3 - 10 пс, при $T = 300$ К, говорять про великі переваги в швидкодії біполярних гетеро-транзисторних структур в порівнянні з моно ТС. Ці переваги полягають в принципових можливостях: суттєво нижчого значення опору бази, що зменшує величину $r'_6 C_k$; дуже високих коефіцієнтів передачі струму в області великих густин струмів (які забезпечують так звані супербета-транзистори); ефективного використання не тільки широкозонного емітера, але і колектора, а також напівізольуючої підкладки; менших величин емітерної бар'єрної ємності, високої радіаційної стійкості $> 10^{17}$ рад. Проте внаслідок початкової стадії розробки тестових кристалів, на основі яких моделюються швидкодіяні логічні схеми, GaAs- біполярні гетероструктури (ГТС) сьогодні також знаходять обмежене застосування в ВІС схем пам'яті і логічних схем з досягнутим рівнем інтеграції $> 10^6$ та системними затримками біля 200 пс. В той же час дослідники, розробники приладів і схем підкреслюють, що потенціальна швидкодія GaAs-ГТС перевищує швидкодію СЛПТ, що повинно привести до освоєння

елементів із затримкою 0,5 - 2 пс.

Ключовими питаннями застосування HBIC і H3BIC, виготовлених за GaAs-технологією в конкретних розробках ЗОТ ЕОМ 5-го і 6-го поколінь безперечно є питання відтворюваності, отримання високого виходу придатних, забезпечення поряд із підвищенням швидкодії підвищення рівня інтеграції і відповідного зниження вартості елементної бази GaAs HBIC та H3BIC.

Сьогодні спеціалісти справедливо відмічають, що в теперішніх умовах склався один сектор ринку промислового призначення, де широко використовуються цифрові GaAs BIC. Це відповідно область супер-ЕОМ, де головною вимогою є максимальна швидкодія елементно-технологічної бази арсенідгалієвих ВІС в порівнянні з кремнієвими. За прогнозом GaAs-BIC повинні забезпечувати принципово кращу комбінацію вартості та продуктивності складних обчислювальних систем, розробник яких С. Крей стверджував, що сучасні ЕОМ на GaAs-елементній базі будуть на 1 - 2 порядки кращими за швидкодією в порівнянні з кремнієвими, а інтеграція ВІС збільшиться при цьому на порядок, тобто темпи її зростання будуть аналогічні кремнієвій суб- та наномікронній технології. Це, зокрема: низькотемпературне плазмове осадження шаруватих структур в реакторах електронно-циклотронного резонансу; ретроградна багатозарядна імплантація; анізотропне плазмохімічне травлення в зоні підсвічення; швидкий фотонний відпал імплантованих шарів; низькотемпературне формування у високочастотній магнетронній плазмі капсулюючих шарів нітридів кремнію і бору; формування силіцидної багаторівневої розводки та прихованого контакту; маршруту автоматизованого проектування з використанням моделювання екстракції та тестового контролю проектних норм конструкторсько-технологічних обмежень; гетерні процеси. Визначимо фактори, які дозволять сумістити ці дві технології.

I. Фактори, що обмежують конкурентоздатність GaAs-BIC

При розгляді практичних результатів промислового освоєння GaAs-BIC у НВО «Сатурн» (м. Київ) доцільно мати на увазі не тільки оптимістичні прогнози самого технологічного прогресу, але й основні фактори, що обмежують конкурентоздатність сучасних і перспективних GaAs-BIC, у першу чергу по відношенню до швидко набираючої оберти кремнієвої субмікронної технології біполярних HBIC та H3BIC. При чому конкурентоздатність GaAs-BIC необхідно об'єктивно оцінювати із порівняння сукупності технічно експлуатаційних параметрів детальних виробів, а також характеристик виготовлення і виробництва не із стандартних Si-BIC, освоєними у 80 – 90-ті роки, а із сучасними субмікронними біполярними H3BIC на

ненасичених елементах, створених на основі розвитку і удосконалення нових технологічних методів формування біполярних структур 2000-2010 років. Революційними технологічними методами, які забезпечують можливість одночасного збільшення швидкодії і степені інтеграції, є ізоляція елементів глибокими канавками, заповнених аеросилом (SiO_2) або полікремнієм; самосуміщення активних областей ТС; створення ретроградних сильнолегованих областей ТС за рахунок багатозарядної імплантації чи легovanого полікремнію; силіцидів, капсулюючих шарів, анізотропного плазмового травлення, вертикальної інтеграції.

Незважаючи на оптимістичні прогнози ідеолога мікроелектроніки С. Крея і ряду представників фірм-виробників цифрових GaAs-BIC, традиційні поставники кремнієвих біполярних BIC, такі як Fairchild, IBM, Motorola, AMD, TI, INOX, Siemens, Tektronix, NEC, Toshiba, Honeywell, Rockwell, Hitachi, Fujitsu, NTT, зберігають впевненість в тому, що їм вдасться зберегти велику долю ринку збуту високоякісних HVIC і H3BIC. На відміну від ряду попередніх років, коли у широко озвучених оптимістичних прогнозах вказувались оцінювані об'єми ринків GaAs-BIC широкої номенклатури, вже в кінці 90-х років самі розробники і виготовлювачі цих BIC стали більш зважено оцінювати потенціал і екстраполяції GaAs-технології. За оцінками відповідних спеціалістів фірм виготовлювачів, головною перешкодою на шляху цифрових GaAs-BIC до серійного промислового виробництва є те, що згаданий ринок носить надто спеціальний обмежений характер, оснований виключно на високій технологічній швидкодії GaAs приладів (в першу чергу – в режимі кільцевих генераторів), не враховувались можливості структури швидкодіючих ECL-BIC та KMOH-BIC.

До недоліків практично всіх GaAs технологій і схем, крім їх високої вартості, яка перевищує в 5 - 10 разів вартість Si-BIC, також слід віднести високу хрупкість матеріалу арсеніду галію, що створює значні складнощі при обробці пластин на автоматизованому кластерному обладнанні, труднощі отримання відтворюваної якості GaAs підкладки великого діаметру (> 150 мм), типових для Si-технологій, а також порівняно велику споживану потужність більшості схем, при забезпеченні необхідної чи максимальної швидкості і відповідно складність у відведенні тепла, зв'язано з низькою теплопровідністю арсенідгалію. Так як GaAs має в 3 рази меншу, ніж кремній теплопровідність, то наприклад, при повітряному охолодженні максимальна потужність розсіювання кристалів GaAs-BIC складає 1 - 2 Вт в порівнянні з 5 Вт у BIC на кремнії (незважаючи на те, що із-за великого зниження ширини забороненої зони GaAs-BIC можуть працювати до температури 350 °C).

Відносно великої переваги в технологічній швидкодії GaAs приладів також існують заперечення. Дрейфові швидкості насичення електронів в Si і GaAs відрізняються незначно (~ 107 см/с). Тому можна допустити, що наприклад, різниця в

інерційних характеристиках кремнієвих і арсенідгалієвих ПТ із субмікронним каналом при роботі з режимами напруг вище порогової буде практично невеликою. З іншої сторони, невірним є твердження, що, наприклад, в 5 - 10 разів більша рухливість електронів в GaAs забезпечує в 5 - 10 разів більш високу тактову частоту GaAs-BIC, незважаючи на відому розробникам пропорційність крутизни ПТ і рухливості носіїв заряду. Крім того, перевага виготовлених за GaAs-технологією приладних структур в порівнянні з кремнієвими, що досягається із-за більш високої рухливості електронів в GaAs, практично щезає при вимозі забезпечення високої степені інтеграції схем – більше $(5 \div 10) \cdot 10^5$ елемента/кристалі, навіть в тих практичних розробках ЗОТ, де вимагається простий, відносно дешевий корпус HVIC чи H3BIC. Що відноситься до технологічної швидкості, то вже зараз удосконалена біполярна субмікронна Si технологія дозволяє отримувати швидкодію вентилів на рівні 10-30 пс при кімнатній температурі, тобто приблизно на такому ж рівні, як і арсенідгалієва технологія при $T = 300$ К. В той же час спеціалісти-розробники як GaAs, так і біполярних Si-BIC відмічають потенціальну перевагу останніх у більш високій навантажувальній здатності, яка реалізується ефективним управлінням смісним навантаженням. Обмежена конкурентоздатність GaAs-BIC на ПТ проявляється в більш низькій навантажувальній здатності, в першу чергу, для схем, які працюють в режимі збагачення-збіднення. Це призводить до збільшення затримок в міжелементних лініях зв'язку (ЛЗ) кристалу і до необхідності перетворення напруги ззовні кристала, що в кінцевому рахунку приводить до зниження продуктивності цифрового пристрою.

Аналогічна ситуація складається і у відношенні потужності споживання: вентилі цифрових GaAs-BIC, які працюють в режимі збіднення-збагачення, переважають за технологічною швидкістю, наприклад, вентилі КМОН BIC, але на рівні кристала із збільшенням степені інтеграції результат порівняння системної швидкості вентилів виявився зовсім іншим. Втрати системної швидкості вентилів GaAs-BIC пов'язані як з меншою теплопровідністю GaAs, так і з більшою динамічною споживаною потужністю на високих робочих частотах.

Спеціалісти сьогодні відмічають ще одну обставину, яку необхідно враховувати при рішенні питання про доцільність використання GaAs-BIC в цифрових високопродуктивних системах, а саме те, що завадозахищеність таких схем є меншою, ніж у кремнієвих BIC, і тому для підвищення їх надійності необхідно резервувати додаткову площу кристалів.

Конкурентами GaAs-BIC виступають ECL - H3BIC. Розробники кремнієвих H3BIC на ненасичених елементах зрозуміли, що в найближчі 10 років в результаті удосконалення технології, схемотехніки та системотехніки їх структури кристалів будуть конкурувати з GaAs-BIC в пікосекундному діапазоні для кімнатних і азотних температур, маючи при цьому, як мінімум, на пів

порядку більш високий рівень інтеграції при адаптивних проектних нормах конструкторсько-технологічних обмежень.

Віт Уілсон, який орієнтувався на розробку кристалів із степінню інтеграції > 100 тис. вентилів/кристал в субнаносекундному діапазоні, вважає, що хоча GaAs-BIC і захопили дуже важливий ринок збуту швидкодіючих схем малого і середнього рівня інтеграції, проте протягом, як мінімум, 20 - ти років переважаючи більшість HVIC та H3VIC буде виготовлятися за кремнієвою технологією. А академік Всеросійської національної Академії наук Валієв К.А. на запитання: «Що буде після кремнієвої технології?» дуже чітко відповів – «Кремній». Таким чином, об'єктивне вивчення стану розробки сучасних цифрових BIC дозволяє зробити певні висновки. По відношенню щільного пакування технології структур BIC кремнієва технологія переважає арсенідгалієву при приблизно однаковому досягнутій технологічній швидкодії, по крайній мірі, у двох аспектах. Перш за все GaAs-BIC відстають від Si-BIC (як біполярних, так і МОН) не менше ніж на два покоління.

У 90-і роки GaAs-схеми лише тільки досягли рівня BIC, і створення дослідних та промислових кристалів з інтеграцією вище 10^4 вентилів/кристал, поки що є предметом дискусій. Так як КМОН – BIC, які запускаються у виробництво, містить від $3 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ еквівалентних вентилів. Досягнутий діапазон складності біполярних BIC складає $(2 \div 10) \cdot 10^4$ вентилів/кристал і виходить на рівень 105 вентилів/кристал із забезпеченням швидкодії десятки–сотні пікосекунд. Навіть при однакових технологічних нормах логічні GaAs-BIC відстають від Si-BIC за щільністю пакування із-за більш високої густини дислокацій і дефектів на підкладках, меншій завадозахищеності вентилів, обмежень, які накладаються на міжеlementні логічні зв'язки, дещо нижчої навантажувальної здатності. Наприклад, при топологічних нормах 1 мкм GaAs-BIC можуть мати рівень складності 10^4 вентилів, а біполярні Si-BIC – до 10^5 вентилів, а КМОН-BIC вже $> 10^6$ вентилів/кристал.

Існує також проблема сумісності GaAs-BIC із великою номенклатурою Si-BIC, від рішення якої залежить широке практичне застосування GaAs-схем. Вони повинні бути сумісними із існуючими розробленими схемами Si-BIC, а для цього приходиться жертвувати внутрішньою швидкістю вентилів і врахувати втрати швидкодії за входом і виходом.

Але важлива перевага GaAs-BIC залишається – це висока радіаційна стійкість $> 10^7$ рад, та широкий діапазон робочих температур від 77 K до 400 K і GaAs-BIC розглядаються як найбільш імовірні кандидати для їх використання в обладнанні космічного базування в рамках робіт по стратегічній оборонній ініціативі (COI). Сьогодні GaAs-технологія потребує модернізації в частині формування капсулюючих покриттів; нарощування шаруватих структур; розвиток і металізація; вирощування зливків напівізолюючого GaAs

великого діаметру (> 150 мм); автоматизації САПР і тестового контролю електрофізичного діагностування; епітаксії арсенідгалієвих структур на монокремнії.

II. Конкурентоздатні біполярні H³BIC і КМОН – BIC: переваги і недоліки

В Si мікротехнології можна сьогодні виділити два напрями розвитку – біполярна і МОН та КМОН-технологія, яку називають за типом активного елемента. Між технологічними напрямками в розвитку елементної бази засобів обчислювальної техніки (ЗОТ) спостерігається серйозна конкуренція за сукупністю техніко-економічних параметрів BIC. Проте із всієї сукупності параметрів ні один із типів кремнієвих BIC немає безспірних переваг. В теперішній час спостерігається деяке зменшення темпів росту степені інтеграції кремнієвих біполярних і КМОН-BIC. З однієї сторони, це зв'язано із сильним проявленням факторів технологічності для субмікронних компонентів, зменшенням виходу придатних із ростом степні інтеграції HVIC. З другої сторони, незважаючи на те, що розміри кристалів (субкристалів > 40 мм²) і HVIC продовжують зростати, проте значення гранично допустимої потужності, що розсіюється корпусом BIC, практично не збільшується і обмежується рівнем відведення тепла при повітряному (5 Вт) і рідинному (20 Вт) охолодженні. Причому ріст степені інтеграції (а також швидкодії) HVIC все ж пов'язаний не з еволюційним ростом розмірів кристала, а з неперервним удосконаленням технології кремнієвих BIC перш за все методів, що забезпечують зменшення кремнієвих розмірів структур в суб- і наномікронній області.

Ведучою енергетичною тенденцією, яка характеризує загальний розвиток МОН і біполярних субмікронних розмірів, є безумовно, зменшення їх геометричних розмірів, які досягаються в області удосконалення прецизійної ультрафіолетової проекційної літографії, а також електронної, іонної та рентгенівської, поряд з методами самосуміщення, ізоляції компонентів, функціональної та інтегральної інтеграції.

Всі зусилля по удосконаленню технології і структури елементно-технологічної бази направлені на задоволення всіх сучасних вимог, які пред'являються до HVIC і H3VIC в цілому і окремо до логічних елементів. До них відносяться покращення параметрів: системної швидкодії, завадозахищеності, навантажувальної здатності, потужності розсіювання, енергії переключення, площі кристалу, дефектності, технологічності процесу. Наприклад, вимоги досягнення необхідної або граничної швидкодії елементів BIC направлено на мінімізацію їх часових затримок при збереженні обмежень на розсіювану потужність, щільність компонування топології, технологічність маршруту формування структур.

Значні результати досягнуті в області технологічних удосконалень, зокрема, в методах літографії, мінімізації дефектності і розмірів фотошаблонів (використання амплітудно-фазозсувних ПФО), іонної імплантації і відпалу, плазмохімічного осадження і травлення, спрощення технологічних маршрутів формування кремнієвих МОН і К-МОН-НВІС. Для К-МОН елементів споживання потужності проходить тільки під час переключення, а статична потужність практично при цьому є рівною нулю. Таким чином, К-МОН-елементи споживають потужність лише протягом 5-15 % загального часу їх функціонування. Відповідно при фіксованих густинах потужності кристала можна збільшувати степінь інтеграції НВІС, а також покращувати системну швидкість елементів, так як К-МОН-елементи є надійними перемикачами напруги з невисокими вихідними опорами. Тому застосування К-МОН-НВІС на невисоких частотах для більш повільних процесорів, безперечно, є переважачим фактором, ніж біполярні НВІС. Розробка дуже технологічних із субнаносекундними затримками елементів відкриває ефективний шлях до побудови ЗОТ високої продуктивності з малим енергоспоживанням і габаритними розмірами. В 90-ті роки за КМОН-технологією були розроблені не тільки НВІС динамічної пам'яті на 16 - 64 Мбіт з часом звертання 20 - 24 нс, але і НВІС статичного ОЗП на 1 - 4 Мбіт з часом звертання 20 - 30 нс при активній потужності 100 - 200 мВт.

Для ЕОМ вищих поколінь дуже є актуальними розробки високошвидкісних мало- потужних високо-інтегрованих статичних ОЗП, які об'єднують в себе переваги КМОН-ОЗП з малою потужністю споживання високою ступеню інтеграції і біполярних ОЗП (з високою швидкістю). Сьогодні вже розроблені Ві-К-Д-МОН-ОЗП НВІС з використанням досягнення самосуміщеної субмікронної літографії на АФЗ ПФО прецизійної літографії, з комірками пам'яті на р-МОН і n-МОН і вихідними Д-МОН або n-p-n-БТ, що дозволяє забезпечити мінімальну потужність споживання в статичному режимі і максимальну швидкість в режимі переключення. Наприклад, Ві-К-МОН-НВІС динамічного ОЗП на 1 Мбіт забезпечує уже час звертання на рівні 20 нс, а Ві-К-МОН-НВІС статичного ОЗП для 256 кбіт - час звертання стає < 5 нс при потужності споживання 350 мВт. Застосування К-МОН-НВІС при температурі рідкого азоту (77 К) дозволяє на 100 - 200 % збільшити системну швидкість і в кристалі отримати затримки на рівні 25 - 500 пс при ступені інтеграції більше 105 елементів/кристал. В цей же час в режимі високих тактових частот ЕОМ (> 250 МГц), незважаючи на великі досягнення в області надінтеграції і збільшення системної швидкості Ві-Н-Д-МОН-НВІС не будуть конкурувати з біполярними ЕСЛ-НВК і НЗВІС.

Більшості КМОН-елементам належать також недоліки, які обтяжують їх використання в НЗВІС довільної логіки для високопродуктивних цифрових пристроїв: значне зростання споживної динамічної потужності при збільшенні частоти переключення,

велике імпульсне споживання струму під час переключення навантажених елементів, високий рівень завад, зменшення системної швидкості при роботі на асінхронне навантаження.

Як бачимо, обидві технології, як кремнієва, так і арсенідгалієва мають свої переваги і недоліки, які в основному визначаються технологічними і економічними особливостями формування структур ВІС. Даний аналіз дозволяє сформулювати наступні висновки для створення сучасної арсенідгалієвої технології на кремнієвих підкладках.

III. Селективно-леговані польові транзистори (СЛПТ): структура, властивості, вольт-амперні та вольт-фарадні характеристики

В даному питанні розглянемо модель, що описує залежність концентрації 2 - D електронів в каналі СЛПТ від напруги на затворі, яку будемо називати моделлю керування зарядом.

На рис. 1 а, б подані дві можливі структури СЛПТ. Структура, що в СЛПТ дозволила досягнути високих значень рухливості 2 - D елементів і високої крутизни вольт-амперних характеристик.

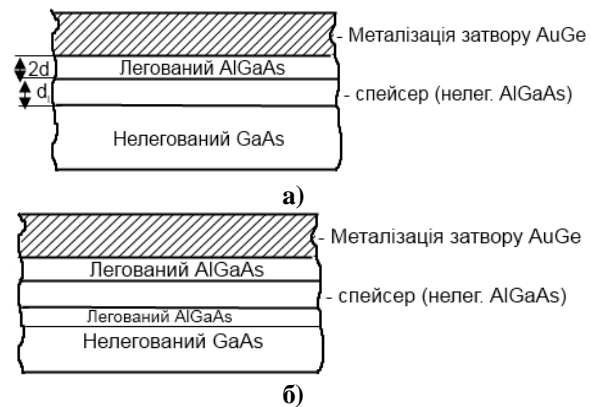


Рис. 1. Структури для формування селективно-легованих польових транзисторів із шириною 2D-електронного газу з високою рухливістю : а) пряма; б) обернена.

Напилення на поверхню широкозонного напівпровідника AlGaAs металевого затвору (сплаву золото-германій), до утворення з напівпровідником бар'єр Шотткі, приводить до утворення під затвором збідненого шару. Легований шар AlGaAs є тонким (<10нм) і якщо до затвору прикласти досить високу від'ємну напругу, то збіднений шар гетеропереходу і бар'єр Шотткі зменшиться (рис. 2).

В цьому випадку поверхнева густина 2-D-електронного газу визначається згідно виразу :

$$n_s = \frac{e}{gd} \left\{ U_{3-\phi} - \left[U_{\phi} - U_{p2} + U(d_i^+) - \frac{\Delta E_c}{q} \right] \right\} \quad (1)$$

де U_B – висота бар'єру Шотткі, U_{3-B} – напруга між затвором і витоком, U_{p2} – напруга перекриття

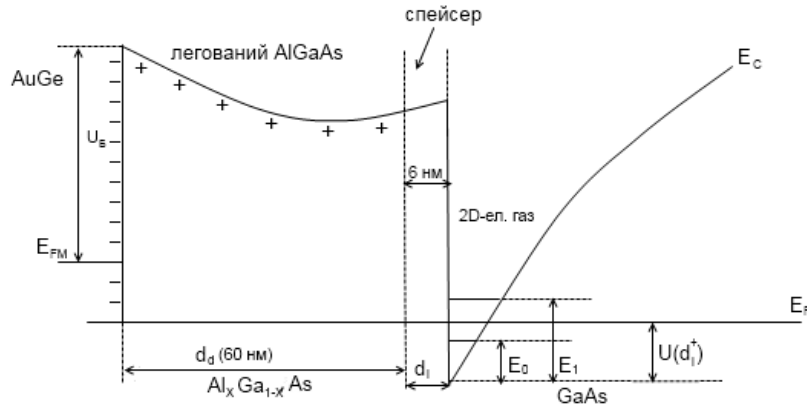


Рис. 2. Зонна діаграма структури із селективним легуванням при подачі на затвор від'ємної напруги і утворенням 2 – D - електронного шару між (AlGaAs-нелег.) та арсенідом галію.

для шару легованого AlGaAs: $U_{p2} = qN_D \frac{d_d^2}{2e}$, d_d – товщина легованої частини AlGaAs.

Вираз (1) представляє величину заряду, що індукується в плоскому конденсаторі, утвореному затвором і 2D-електронним газом, які розділені емітером (нелегованим AlGaAs), і представляє зарядову модель СЛПТ.

Вольтамперні характеристики СЛПТ можуть бути знайдені за допомогою розглянутої моделі управління зарядом для повного каналу. В цьому наближенні поверхнева густина електронів буде визначатися виразом:

$$n_s(x) = \frac{\epsilon}{d + \Delta d} [U_{3-B} - U_{aff} - U(x)] \quad (2),$$

де x - координата, $U(x)$ - потенціал вздовж клапана.

Рівняння (2) вирішується разом з рівнянням

$$I_{C-B} = qn_s x(E) \omega \quad (3)$$

Де ω - ширина затвора, $J = mE = m \frac{dU}{dt}$ -

швидкість електронів в 2 - D електронному газі. Розв'язок цих двох рівнянь дає вольтамперну характеристику СЛПТ для різних значень U_{C-B} .

$$I_{C-B} = bU'_{3-B}U_{C-B} - \frac{U_{C-B}^2}{2} \quad (4)$$

Де $U'_{3-B} = U_{3-B} - U_{aff}$, $U_{aff} = U_T$ - порогова

напруга; $b = \frac{emw}{d + \Delta d}$ - крутизна.

Розраховані і експериментальні залежності струму стік-витік від напруги на затворі при $T = 300$ К подані на рис. 3, а, б згідно тестового моделювання. В розрахунках використані такі параметри: $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\mu = 0,68 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\vartheta_s = 2 \cdot 10^5 \text{ м/с}$, $E_1 = 1 \text{ кВ/см}$, $E_2 = 3,5 \text{ кВ/см}$, $R_B = 7 \text{ Ом}$ для нормального відкритого і $R_B = 10 \text{ Ом}$ для нормально закритого транзистора $L = 1 \text{ мкм}$, $\omega = 11,5 \text{ мкм}$, $\Delta d = 8 \text{ нм}$.

В наближенні Шоклі заряд під затвором СЛПТ Q_i буде визначатись виразом:

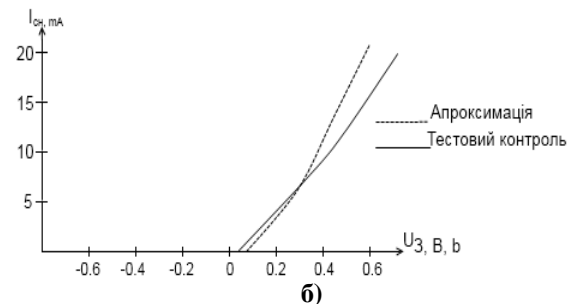
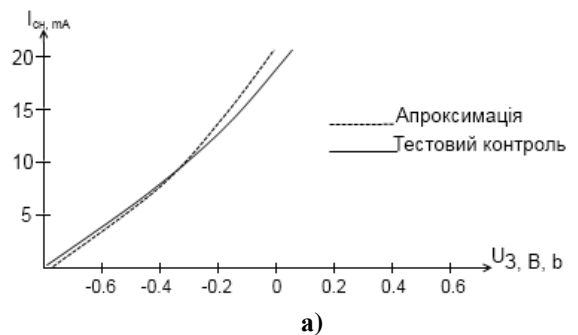


Рис. 3. Вольтамперні характеристики СЛПТ: а) нормально відкритого транзистора; б) нормально закритого транзистора.

$$Q_i = w \int_0^L qn_s dx = w \int_{U_B}^{U_C} qn_s \left(\frac{dU}{dx} \right)^{-1} dU \quad (5)$$

$$= \frac{2}{3} C'_0 \frac{U_{3-B}^3 - U_{3-C}^3}{U_{3-B}^2 - U_{3-C}^2}$$

$$\text{де } C'_0 = \frac{ewL}{d + \Delta d}$$

Тоді вольфарадні характеристики СЛПТ для заданих умов виражається:

$$C_{3-B} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_{3-B}} = \frac{2}{3} C'_0 \frac{U_{3-B}(U_{3-B} + 2U_{3-C})}{(U_{3-B} + U_{3-C})^2} \quad (6)$$

$$C_{3-C} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_{3-C}} = \frac{2}{3} C'_0 \frac{U_{3-C}(U_{3-C} + 2U_{3-B})}{(U_{3-B} + U_{3-C})^2}$$

На рис. 4 подані вже розраховані вольфарадні

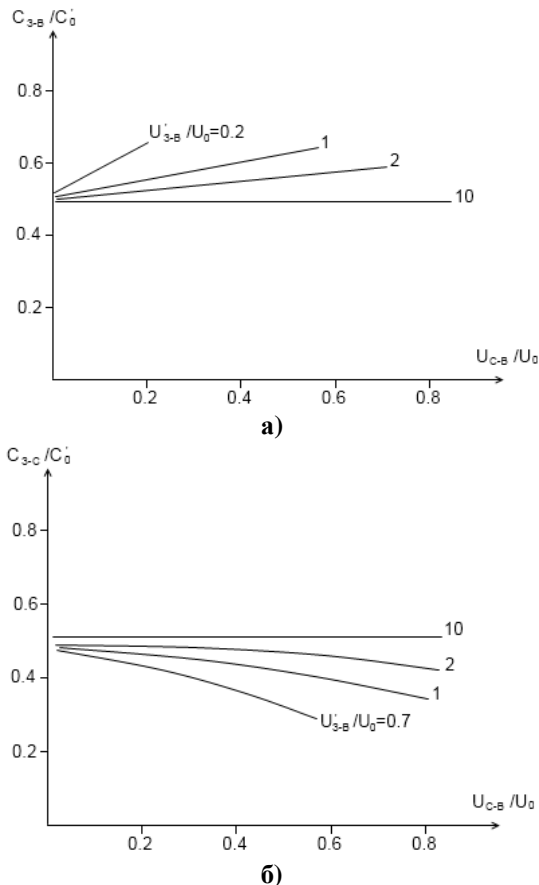


Рис. 4. Вольтфарадні нормовані характеристики СЛПТ: а) для C_{3-B} і б) для $C_{3-с}$.

характеристики СЛПТ

Це основний тип польових транзисторів на гетеро структурах, які дозволяють формувати швидкісні К-МОН-інвертори.

Висновки

1. Сьогодні переваги арсенід-галієвої технології полягає у підвищенні високої радіаційної стійкості,

широкому температурному діапазону роботи від 77 К до 600 К і високій системній швидкодії за рахунок використання високої рухливості 2D електронного газу в шаруватих структурах.

2. Формування селективно легованих польових транзисторів та біполярних гетеротранзисторів з варізонним емітером дозволяє знизити час затримки в кільцевих генераторах до 10 пс і формувати комплементарні пари як польових, так і біполярних арсенідгалієвих швидкодіючих логічних схем.

3. Якщо довести собівартість арсенідгалієвих підкладок та шаруватих епітаксійних структур до рівня кремнієвих, то Ga-As-BIC займуть домінуюче положення у надшвидкісних засобах обчислювальної техніки.

4. Швидкодію як кремнієвих, так і арсенідгалієвих цифрових швидкісних ВІС визначає прогрес у технології формування структур, топологічному ущільненні і в меншій мірі їх схемотехніка основою якої є резонансно-тунельні прилади.

5. Вирішення вищевикладених проблем дозволить арсенідгалієвій технології в недалекому майбутньому зайняти домінуючу роль у формуванні високошвидкісних цифрових пристроїв засобів обчислювальної техніки, вийти на їх сьоме покоління.

6. Арсенідгалієва технологія займе провідне місце для формування швидкісних цифрових ВІС при умові розробки технології, де формування арсенідгалієвих структур проходить на кремнієвих підкладках, що дасть змогу різко зменшити собівартість підкладки і структур та перейти на великі діаметри > 200 мм.

Новосядлий С.П. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедри радіофізики і електроніки;
Кіндрат Т.П. – аспірант;
Сорохтей Т.Р. – аспірант;
Возняк Ю.В. – аспірант.

- [1] С.П. Новосядлий. *Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС*. - Івано-Франківськ: Сімік, 351 с. (2003).
- [2] С.П. Новосядлий. *Суб- і наномікронна технологія структур ВІС*. – Івано-Франківськ: Місто НВ, 456 с. (2010).
- [3] С.П. Новосядлий, В.М. Бережанський. Багатозарядна іонно-імплантаційна обробка при формуванні кишень і метанізації субмікронних структур ВІС // *Металофізика і новітні технології*. **29**(7), сс. 857-866 (2007).
- [4] С.П. Новосядлий, В.М. Вівчарук. Технологічні особливості формування шаруватих нано-структур. // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. **17**(97), сс. 26-39 (2009).
- [5] С.П. Новосядлий, Ю.В. Возняк, Т.Р. Сорохтей. Фізико-технологічні особливості формування комплементарних арсенід-галієвих субмікронних структур ВІС// *Збірник наукових праць XXI міжнародної конференції «Електроніка компонентна база. Состояние и перспективы развития»*: Харків, сс. 111-113 (2009).
- [6] М. Шур. *Современные приборы на арсениде галлия*. Пер. С англ. Под. ред. В.Е.Чеснокова. М.: Мир, 860 с. (1991).
- [7] *Технология СВИС*. Под ред. С.Зи у 2-х тома.. Пер. С англ.. под. ред.. Ю.Д.Чистякова. М.: Мир, 960 с. (1986).

S.P. Novosyadlyy, T.P. Kindrat, T.R. Sorokhtey, Yu.V. Voznyak

Comparative Analysis of Current Silicon Technology and Gallium Arsenide Submicron Structures of High-Speed Digital Large Integrated Circuits

Precarpathian National university after Vasyl Stefanyk

57 Shevchenko str, Iano-Frankivsk, Ukraine, e-mail: kindrat@i.ua, majesty@nashemisto.if.ua

In this article shown tendencies and prospects of developments of transistor structures for the industrial making of competition silicic and gallium arsenide speed digital LSI - element-technological and designer base of facilities of the computing engineering (FCE) supercomputer of higher generation. In this article unique properties are illuminated both silicium and gallium arsenide submicrometer technologies.