ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 13, № 2 (2012) С. 482-487

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 13, № 2 (2012) P. 482-487

УДК 621.794'4: 546.48'24

ISSN 1729-4428

С.П. Новосядлий, С.М. Марчук, Ю.В. Возняк, Т.Р. Сорохтей

Дослідження ефективності гетерних технологій в структурах арсеніду галію

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

В кремнієвій технології формування структур ВІС для зміни ефективної дії гетера кількісною характеристикою-параметром визначений ріст часу життя неосновних носіїв заряду [1]. Це відповідно дозволяє прирівнювати по дії також кількісний характер, за допомогою якого можна оцінювати ефективність дії гетерних технологій по відношенню до арсеніду галію. Таким параметром вибрана холлівська рухливість носіїв заряду. Дані дослідження є особливо актуальними сьогодні при визначенні технології формування самосумісних К-МОН-структур на епітаксійному арсеніді галію.

Ключові слова: Арсенід галію, НВІС, технологічний процес, холлівська рухливість, холлотрон.

Стаття поступила до редакції 10.09.2011; прийнята до друку 15.03.2012.

Вступ

Арсенід галію – один з важливих матеріалів сучасної напівпровідникової мікроелектроніки, зокрема, для таких кристалів, як світловипромінюючі і лазерні діоди, фотоприймачі, фільтри і модулятори лазерного випромінювання, сонячні елементи і батареї, субмікронні цифрові і НВЧ-інтегральні мікросхеми. В даній статті подаються дослідження для визначення ефективної дії гетерних технологій на арсеніді галію при формуванні субмікронних самосумісних К-МОН-ВІС. Таким параметром вибрана холлівська рухливість носіїв заряду.

GaAs має ряд фізичних і технологічних переваг в порівнянні з Si і Ge, а у вигляді епітаксійних шарів має більш високі електричні параметри, ніж монокристалічний арсенід галію. Велика ширина забороненої зони $\left(\Delta E_g = 1{,}42eB\right)$ і висока рухливість електронів (>6000см^2/Вс), а також висока однорідність епітаксійних плівок GaAs вказують на визначальну їх роль у виробництві класичних і квантових напівпровідникових приладів та субмікронних інтегральних схем, в тому числі НВЧ-діапазону. Проте одним із значних завад на шляху широкого використання напівізолюючого арсеніду галію є низька якість підкладок на їх основі: висока щільність дислокацій, недостатня гладкість полірованої поверхні і дифузія залишкових і легуючих домішок із підкладки в епітаксійну плівку, низька теплопровідність та міцність.[2, 3]

Проблема використання тонких плівок (одиниці та десяті долі мікрона) епітаксійного арсеніду галію для приладних структур зводиться до рішення задачі по усуненню впливу перехідного шару між підкладкою та епітаксійною плівкою, що має місце навіть у випадку повного співпадіння параметрів кристалічних граток підкладки і епі-плівки, зокрема в структурах типу n-GaAs-i-GaAs. Така постановка задачі вимагає розробки високоефективних гетерних технологій для арсеніду галію та визначення параметру, за допомогою якого можна кількісно визначити, а значить, і порівнювати ефективну дію різних гетерів, як це має місце в кремнії на основі тестового контролю. [6, 7]

В залежності від способу формування епітаксійних плівок та доепітаксійної обробки товщина перехідного шару досягає величини 0,5-1,2 мкм, що суттєво обмежує використання найбільш перспективних плівок з малою товщиною d. А тестовою структурою, за допомогою якої легко визначити холлівську рухливість, що визначає швидкодію інтегральних схем, є структура Холла. Її ще називають холлотроном. В певному наближенні для холлотронів з високою чутливістю можна вважати, що напруга Холла $V_x : \frac{1}{d}$. Саме за рахунок перехідного шару біля самої підкладки рухливість електронів різко зменшується і появляється нелінійність в залежності напруги Холла від магнітної індукції. Такі холлотрони виготовлюють в безкорпусному варіанті на паучковому носії.

Вирішальну роль у зменшенні перехідного шару d відіграє підготовка арсенідгалієвих підкладок до

епітаксійного росту. Ми використали набір технологічних процесів із кремнієвої технології, а саме:

- обробку в розчині Каро (H_2SO_4:H_2O_2:H_2O = 4:1:1), яка забезпечує якісну очистку підкладки від органічних забруднень;
- обробку у водневій плазмі, яка відновлює всі окисли з поверхні підкладки;
- доепітаксійну обробку в хлористому водні для очистки поверхні від металевих домішок (з точкою роси газів не більше -72 ^{o}C).

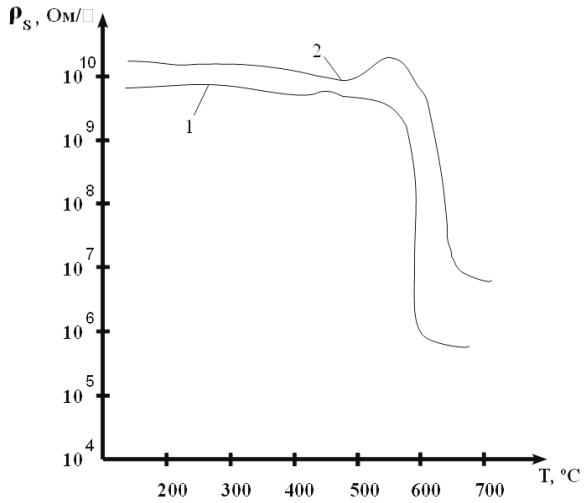


Рис. 1. Залежність ρ_s ізолюючого шару від температури відпалу для енергії E=100 еВ і дози Д=25 мкм/см^2 (шарів B^{++} (крива 1) і BF_2^{++} (крива 2)).

Проблематичним був вибір технології, яка б забезпечувала отримання якісної напівізолюючої арсенідгалієвої підкладки. До відомих способів, які дозволяють усунути вплив перехідного шару, відносяться безпосередньо легування GaAs в процесі вирощування зливків хромом, чи навпаки. До таких елементів відносять крім хрому, індій, кисень, бор. Ми в своїх експериментах використали технологію багатозарядної імплантації, як двозарядних іонів B^{++}, так і молекулярних іонів BF_2^{++} із кремнієвої технології. Таким чином, для експерименту ми використали підкладки арсеніду галію, легованого хромом (GaAs<Cr>) та такі ж підкладки додатково леговані BF_2^{++}, при енергії E=100 мВ і дозі Д = 5 мкм/см^2. [1,7]

Параметри тестових структур Холла (холлотронів), виготовлених на підкладках GaAs<Cr> порівнювались із параметрами додатково легованих бором, що покращує компенсацію домішок в напівізолюючому арсеніді галію, а це приводить до зростання поверхневого опору (рис. 1) і зменшення температури відпалу. Останнє дозволяє використовувати вже швидкий фотонний відпал. При дозах до $1{,}25\cdot10^{13}$ см$^{-2}$ ρ_s приймає значення більше 10^9 Ом/W, а при зростанні дози до $1{,}85\cdot10^{14}$ см$^{-2}$ поверхневий опір зменшується вже до величини 10^6 Ом/W. Тому в цьому плані необхідно використовувати двозарядні іони, які дозволяють зменшити як енергію, так і дозу імплантації в 2 рази. Такий режим імплантації зменшує товщину перехідного шару майже на порядок.

I. Фізико-технологічні дослідження холлівської рухливості в тестових структурах арсеніду галію

Величина перехідного шару між арсенідгалієвою підкладкою та епі-шаром арсеніду галію визначається не тільки якісною хімічною обробкою, але і самим процесом епітаксійного росту. Для епітаксійного росту GaAs існує багато методів, серед яких можна виділити метод атомно шарової епітаксії, що дозволяє формувати бездефектні епітаксійні шари при низькій температурі росту з використанням ексімерного (KrF) лазера. Метод рідкофазної епітаксії в цьому плані є менш привабливий. [2,3]

Моношари GaAs можна вирощувати також методом газофазної епітаксії із шарів металоорганічних сполук. Проте цей метод вимагає строгого контролю параметрів процесу. Метод атомної шарової епітаксії, який є стимульований випроміненням ексімерного KrF лазера, в значній мірі спрощує технологічний процес осадження, який стає технологічно контрольованим. Рахується, що в цьому процесі існує два механізми дії на атомну шарову епітаксію при фотонному опроміненні: перший – підсилює розклад галій містких адсорбатів із-за переходу фотонних носіїв на поверхню GaAs, а другий – посилення розкладу внаслідок поглинання фотонів самим адсорбатом.

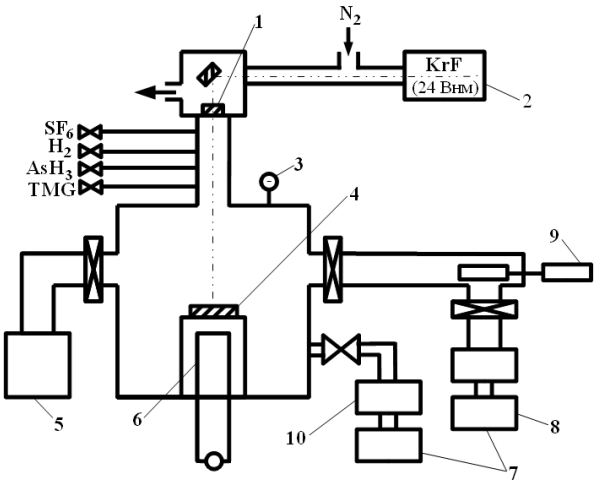


Рис. 2. Схема установки для атомношарової епітаксії GaAs.

На рис. 2 показана схема експериментальної установки для АШЕ, де 1 – вікно; 2 – ексімерний KrF лазер; 3 – вакуумметр; 4 – GaAs підкладка; 5 – кріогенний насос; 6 – нагрівач; 7 – форвакуумний насос; 8 – дифузійний насос; 9 – шибер; 10 –

турбомолекулярний насос.

В ролі газоподібних джерел використані триметилгалій (TMG) $Ga(CH_3)_3$, арсен (A_SH_3 – 10% в H_2) та елегаз (SF_6). Водень використовують як газ-носій і відновлювач оксидів. Реактор представляє собою вертикальний циліндр із нержавіючої сталі. Він спростований так, щоб мінімізувати конвекцію газового потоку. Нагрівник призначений для підігріву GaAs-підкладок. Підкладки GaAs орієнтації (100), леговані хромом, частково маскувались SiO_2, осадженим в реакторі пониженого такту типу "Ізотрон" для контролю товщини плівок. Попередньо пластини перед багатозарядною імплантацією проходили обробку в суміші Каро та відпалі H_2+HCI.

TMG і A_SH_3 поперемінно подавались в зону осадження GaAs. Ці газові потоки підігрівались воднем, щоб зменшити перемішування газів. Один цикл епітаксійного осадження складається із послідовності 5-х газових імпульсів: A_SH_3, H_2, TMG(i)H_2, SF_6 і H_2. Тривалість кожного імпульсу була 2 секунди, а швидкість потоку хрому у водні – 25 см^3/хв.

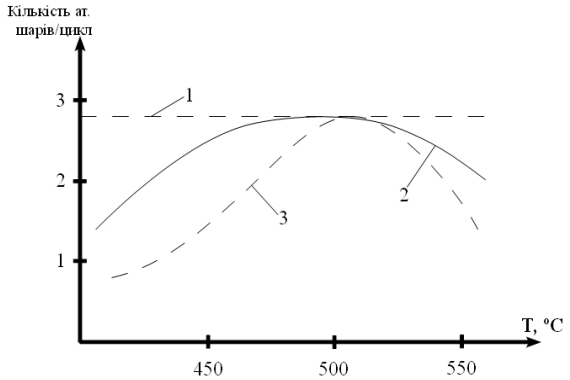


Рис. 3. Температурна залежність росту атомних шарів на 1 цикл процесу епітаксійного росту.

Напівізолююча і GaAs-підкладка опромінювалась за допомогою ексімерного лазера KrF. Лазерне випромінювалось синхронно з введенням всіх газових потоків. Потужність випромінювання складала (15-20)·10^{-3} Дж/см^2, а швидкість повторення імпульсів – (80-100) в секунду. Тривалість імпульсу складала 15 нс. Процес епі-росту відбувався при тиску 1,3·10^3 Па. Такий пульсуючий режим нами вибраний із кремнієвої технології при осадженні легованого полікремнію на установці "Ізотрон".

На рис. 3 показано зміну швидкості росту легованого n-GaAs за цикл як функції температури осадження при одночасній дії ексімерного лазера. Така довжина хвилі ексімерного лазера вибрана для забезпечення ефективного розкладу металогранічних сполук триметилгалію (ТМГ).

На рис. 3. введені позначення: 1 – моношар; 2 – епі-ріст при лазерному опроміненні; 3 – ріст без опромінення лазером. Швидкість потоку ТМГ складала 1,83 см^3/хв, а A_SH_3 у водні – 25 см^3/хв, SF_6 – 0,3 см^3/хв.

При опроміненні моношаровий ріст досягався в більш широкому температурному інтервалі від 470°C до 525°C в порівнянні з термічним (крива 3). Дія лазерного опромінення на розширення температурного інтервалу може зумовлюватися такими процесами:

- дією температури підкладки;
- співударами реактивних частинок як атомами галію при фотолізі ТМГ в газовій фазі;
- розкладом Ga-містких адсорбатів при фотолізі;
- прискоренням легуючої домішки.

Визначення дії конкретного процесу потребує певного уточнення даної експериментальної методики.

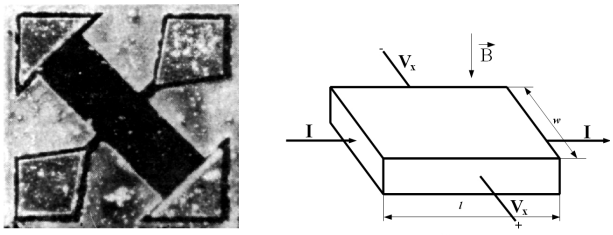
Такий епітаксійний ріст легованих арсенідгалієвих шарів n-типу відбувається при низькій температурі, що забезпечує високу однорідність структури плівки з малим перехідним шаром під епі-плівкою та підкладкою.

Таблиця 1

Вид	Орієнтація	Поверхневий питомий опір, ρ_s,Ом/W	Густина дислокацій, $N_Д$,см$^{-2}$
I	(100)	8,5·10^8	1,5·10^4
II	(100)	4,2·10^9	2,3·10^3

Друга частина наших досліджень присвячена виясненню впливу легування підкладки та величини перехідного шару на холлівську рухливість носіїв заряду. Для цього були використані два види тестових структур Холла (I і II) на основі епітаксійної структури nGaAs-iGaAs, які відрізняються матеріалом напівізолюючих підкладок із монокристалічного GaAs. Для варіанту I використовувалась підкладка із монокристалічного GaAs, легованого хромом, а для варіанту II – ці ж підкладки із GaAs тільки додатково леговані багатозарядною імплантацією бора (B^{++}, BF_2^{++}). Параметри напівізолюючих підкладок GaAs, які вибрані для експериментальних досліджень є такими (табл. 1).

Епітаксійні шари були отримані методом газофазної лазерної епітаксії (атомно-шарової епітаксії) описаної вище. Товщина таких епітаксійних шарів складала 1,85 мкм з концентрацією електронів на рівні (1,5-5)·10^{16} см$^{-3}$ і рухливістю носіїв μ_n =5200-6300 см^2/В·с.



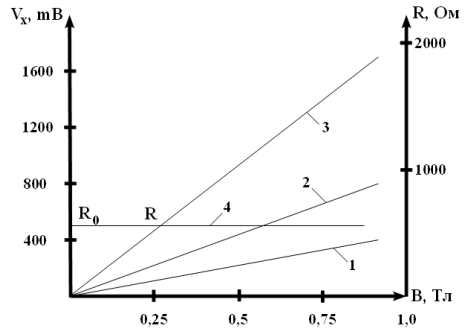
а) б)

Рис. 4. Тестова структура холлотрона: а) для вимірювання напруги Холла V_x; б) для вимірювання магнітоопору R.

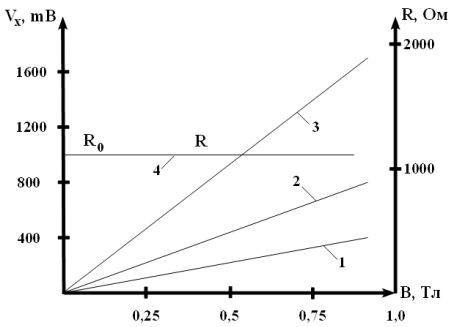
На цих пластинах була виготовлена тестова структура у вигляді симетричного хреста з розмірами активної області 0,95x0,3 мм^2 (рис. 4,а). Технологія

формування тестових структур була взята нами із кремнієвої субмікронної технології [7]. Для отримання омічних контактів використовувався сплав срібло-індій-германій Ag-In-Ge, нанесений вакуумним розпиленням із диборанового тигля. Випалювання контактів здійснювалось при T=450 ºC в атмосфері аргону протягом 5 хв. Після скрайбування і ломки кристалів з готовими приладними тестовими структурами останні монтувались на поліімідний паучок. Виводи до контактних площадок приєднувались методом ультразвукової зварки. Вимірювання холлівської напруги здійснювалось згідно схеми (рис. 4,б).

Вплив напівізолюючих підкладок I і II на електричні параметри сформованих тестових структур визначався в режимі струму I = 5 мА та магнітної індукції B = 0,5 Тл. Такий режим забезпечував холлівську чутливість на рівні γ = 150 В/А·Тл.



а)

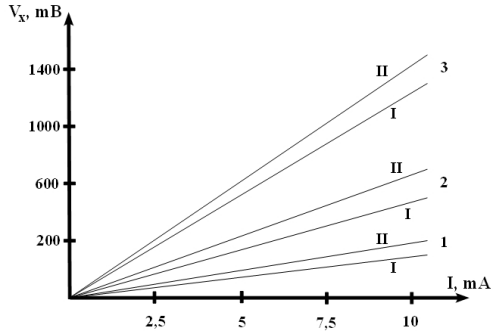


б)

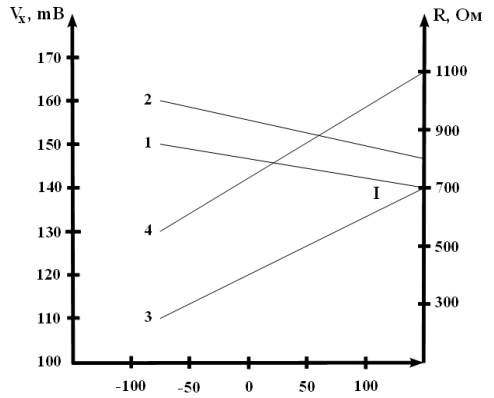
Рис. 5. Залежність напруги Холла V_x і магнітоопору R від зміни магнітної індукції B для тестових структур: а) I; б) II.

На рис 5 для тестових структур I і II відповідно подані залежності напруги V_x для 3-х значень управляючого струму I, а також магнітоопору від величини магнітної індукції в діапазоні індукції 0÷1 Тл, яке вимірювалось за допомогою цифрового тераометра фірми “Systron Donner” (модель 3102A). Дані характеристики зняті при кімнатній температурі.

Більш висока лінійність φ залежності $V_X = y\left(\vec{B}\right)$ для тестових структур типу I вже спостерігається для струму I = 10 мА, що вже демонструє рис. 6. В той же час для тестової структури II має місце виключно висока лінійність в заданому діапазоні магнітної індукції $\vec{B}$ і є майже однаковою для імплантаційних іонів B^{++} та BF_2^{++}. Це значить, що величина перехідного шару для структур II є меншою і практично не впливає на зміну струмопотоку.



а)



б)

Рис. 6. Залежність для тестових структур I і II: а) напруги Холла V_x від управляючого струму I (B = 0,2Тл (1), 0,5Тл (2), 1,0Тл (3)); б) температурна залежність напруги Холла V_x (1,2) та магнітоопору R (3,4).

Нелінійність залежності $V_X = y\left(\vec{B}\right)$ кількісно може бути визначена на основі виразу:

$$j = \frac{V_x(B)/B}{V_x(0{,}1)/0{,}1} \cdot 100\% \qquad (1)$$

Нелінійність холлівської напруги φ для тестових структур I і II обчислена за формулою (1) для двох значень магнітної індукції $\vec{B}_1$ = 0,5 Тл і $\vec{B}_2$ = 1 Тл відповідно складає: для I – φ_1 = 4%, φ_2 = 13,3%; для II – φ_1 = 0,8%, φ_2 = 1,2%.

Магнітоопір тестових структур I і II змінюється із зміною магнітної індукції згідно виразу:

$$R = R_0\left(1 + MB^2\right), \qquad (2)$$

що виражає магніторезистивний ефект. Для тестових структур I і II магніторезистивний коефіцієнт відповідно рівний M_I=0,28 Тл^2, M_{II}=0,58 Тл$^{-2}$.

Знаючи напругу Холла, на основі виразу:

$$V_x = R_H \frac{IB}{d}, \qquad (3)$$

де d – товщина епітаксійного n-шару, можна

визначити сталу Холла R_H і через рухливість носіїв струму m_n.

Як і у всіх напівпровідникових приладів, однією із найбільш важливих характеристик тестових структур Холла є їх температурна стабільність. Напруга Холла V_x і магнітоопір R обох видів досліджувались з використанням кріостата в магнітному полі $\vec{B}$ = 0,5 Тл при I = 2 мА для недопущення їх перегріву. При цьому термостабільність тестових структур виду II при температурах >100ºС є кращою, бо температурний коефіцієнт при T = 150ºС майже на порядок є меншим. Нижче подаються температурні коефіцієнти холлівської напруги, які розраховані для трьох температур і мають наступні значення:

Температурні коефіцієнти, V_x, K^{-1}			
T	-50ºС	20ºС	150ºС
I	$6{,}8\cdot10^{-4}$	$5{,}4\cdot10^{-4}$	$5{,}8\cdot10^{-4}$
II	$3{,}2\cdot10^{-4}$	$1{,}1\cdot10^{-4}$	$6{,}7\cdot10^{-5}$

Температурні коефіцієнти магнітоопорів тестових структур I і II є близькими і складають $2{,}4\cdot10^{-3}$ та $2{,}1\cdot10^{-3}$ K^{-1} відповідно. Залишкова напруга Холла $V_x(0)$, яка має місце при відсутності індукції магнітного поля і яка оцінюється як $V_x(0)/V_x(0{,}5)$ у % складала для тестових структур I і II відповідно 4,7% та 1,1% відповідно. Рухливість носіїв заряду у тестовій структурі II збільшується до 8200 $см^2$/В·с проти 6100 $см^2$/В·с у тестовій структурі I.

Таким чином, ТС у вигляді холлотрона забезпечує якісний та кількісний контроль гетеруючих властивостей в арсенідгалієвій технології формування структур ВІС.

Висновки

Холлотрони на основі епітаксійних атомно шаруватих структур арсеніду галію із підкладкою на напівізолюючому GaAs імплантованого іонами бору мають більш високо стабільні параметри в порівнянні з холлотронами на підкладках із GaAs, легованих хромом. Це надзвичайно висока лінійність, що дає можливість їх використовувати як сенсори в магнітометрії, електронному запалюванні, яке працює на високих температурах, та й при оцінці ефективності гетерної арсенідгалієвої технології через напругу Холла або рухливість носіїв.

Виникнення перехідного шару між підкладкою і епітаксією обумовлено в переході домішок і дефектів із підкладки в ростучу епі-плівку. Додаткове імплантаційне легування напівізолюючих підкладок бором створює гетерний і бар'єрний ефект, в результаті чого товщина перехідного шару зменшується до 0,1-0,15мкм, а дефектність епітаксійного шару зменшується майже на порядок.

Дослідженнями встановлено, що використання ексімерного лазера при епітаксійному рості і легуванні n-GaAs шарів дозволяє понизити температуру епітаксії до 470-520°С, що в кінцевому рахунку теж зменшує дефектність епітаксійних n-GaAs шарів.

Імплантовані в GaAs-підкладку багатозарядні іони бору (B^{++}, BF_2^{++}) виступають як сила, що за допомогою поля напружень, спричиняє гетерування дефектів, домішок і дислокацій до перехідного шару, або в останньому в одночасі проходить зміцнення кристалу арсеніду галію за рахунок ізовалентної домішки бору.

Гетерна дія ізовалентних домішок (бору, індію) у вигляді багатозарядних легких ізовалентних іонів спричиняється деформацією арсенідгалієвої гратки підкладки (iGaAs), що викликає стік дефектів, домішок і дислокацій з епітаксійних шарів. Чим більший заряд і чим більша маса іона, тим більша деформація гратки і більша її гетерна ефективність. В цьому плані заслуговують увагу рідкісноземельні елементи (Ho, La, Y, Yb).

[1] P. Van Daele, R. Raets et all. *Characterization of isolation in GaAs MESFET circuits by boron implantation.* // J.Electrochem. Soc., V.134, №3; – p. 711-714 (1987).

[2] С. И. Круковский. Комплексное легирование слоев GaAs, InGaAs при жидкофазной епитаксии. // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. №6; – с. 30-32 (2002).

[3] Г. М. Семенова, Т. Г. Криштат, В. П. Кладько. *Властивості епітаксійних шарів арсеніду галію при легуванні галієвого розплаву ітербієм або скандієм*. // УФЖ; Т40, №10; – с. 1101-1106 (1995).

[4] *Арсенид галлия в микроэлектронике*. Под ред. А. Айнспруна. – М: Мир, 420с (1998).

[5] Новосядлий С. П., Возняк Ю. В., Сорохтей Т. Р. Фізико-технологічні особливості формування комплементарних арсенід-галієвих субмікронних структур ВІС. // *Збірник наукових праць 2-ї міжнародної конференції "Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития"*. – Харьков; – с. 111-113 (2009).

[6] Новосядлий С. П., Вівчарук В. М., Вертепний С. М. Моделювання субмікронної та нанотехнології на основі тестових структур. // *Східноєвропейський журнал передових технологій*. №1(7В7); – ст. 26-39 (2009).

[7] Новосядлий С. П. *Суб- і наномікронна технологія структур ВІС*. // Івано-Франківськ, Місто НВ; 450с (2010).

S.P. Nonosyadlyy, S.M. Marchuk, Yu.V. Voznyak, T.R. Sorokhtey

The Efficacy Hetero Technologies in the Structures of Gallium Arsenide

Precarpathian National university after Vasyl Stefanyk
57 Shevchenka str, Iano-Frankivsk, Ukraine, e-mail: majesty@nashemisto.if.ua

In silicon VLSI technology forming structures to change the effective action of hetero-quantitative characteristic parameter defined growth lifetime of minority carriers [1]. This allows to equate respectively to action as quantitative in nature, with which you can evaluate the effectiveness of heter technologies in relation to gallium arsenide. This option is selected Hall mobility of charge carriers. These data are particularly relevant today in determining the formation of technology semi-combining K-MOS structures on epitaxial gallium arsenide.