

ВПЛИВ АРСЕНІДГЕЛІЄВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУР ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

С. П. Новосядлий

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

Л. В. Мельник

Аспірант*

E-mail: lj-3d@rambler.ru

*Кафедра комп'ютерної
інженерії та електроніки

Прикарпатський національний
університет ім. В. Стефаника

вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ,
Україна, 76025

Дана стаття направлена на визначення взаємозв'язку межі розділу на вибір технології формування швидкодіючих структур ВІС на основі арсеніду галію та високоефективних приладних структур. Технологія формування структур таких приладів повинна забезпечувати необхідну стабільність структури міжфазної межі і можливість отримання високоякісних шарів на великій площі підкладок (діаметром >100 мм)

Ключові слова: легування, домішки, тунелювання, межа, рекомбінації, гетероперехід, імплантація, активація, покриття

Данная статья направлена на определение взаимосвязи границе раздела на выбор технологии формирования быстродействующих структур БИС на основе арсенида галлия и высокоэффективных приборных структур. Технология формирования структур таких приборов должна обеспечивать необходимую стабильность структуры межфазной границы и возможность получения высококачественных слоев на большой площади подложек (диаметром >100 мм)

Ключевые слова: легирование, примеси, тунелирование, граница, рекомбинация, гетеропереход, имплантация, активация, покрытия

1. Вступ

Фізичні і хімічні властивості межі розділу є факторами для використання напівпровідникових матеріалів в різних приладних структурах ВІС. Ці властивості визначають електричні характеристики і параметри приладів, технологічність формування їх структур та межі інтеграції ВІС.

В системах напівпровідник-напівпровідник величина електричного бар'єра визначається величиною розриву зон між краями валентної зони і зони провідності обох напівпровідників, а дефектні рівні на такій межі гетеропереходу можуть діяти як центри безвипромінювальної рекомбінації, які вже обмежують використання даної міжфазної межі в оптоелектронних приладах типу світло- чи лазерних діодів.

2. Аналіз дослідів і публікацій. Властивості межі розділу шаруватої структури і її дипольна модель

Фізичні і хімічні властивості межі розділу є факторами для використання напівпровідникових матеріалів в різних приладних структурах ВІС. Ці властивості визначають електричні характеристики і параметри приладів, технологічність формування їх структур та межі інтеграції ВІС. Електричні властивості – це один із найбільш важливих аспектів межі розділу. Електричні характеристики межі розділу визначаються відносним розміщенням електронних рівнів по обом сторонам від межі розділу, електрон-

ними станами на самій межі розділу і характером поведінки межі розділу при дії прикладених напруг, струмів і температур. Наприклад, в системах контакту метал-напівпровідник (КМН) положення рівня Фермі в металі по відношенню до краю зони провідності або валентної зони напівпровідника є важливим параметром, що визначає висоту бар'єра Шоттки і його ВАХ [1]. В той же час для омичних контактів спад напруги на межі метал-напівпровідник при високому рівні інжекції струму повинен бути дуже малим. В системах напівпровідник-напівпровідник величина електричного бар'єра визначається величиною розриву зон між краями валентної зони і зони провідності обох напівпровідників, а дефектні рівні на такій межі гетеропереходу можуть діяти як центри безвипромінювальної рекомбінації, які вже обмежують використання даної міжфазної межі в оптоелектронних приладах типу світло- чи лазерних діодів.

До таких нових електронних приладів сьогодні відносяться: біполярні транзистори на гетеропереходах і варізонних напівпровідниках, селективно леговані транзистори з високою рухливістю електронів, транзистори на основі надграток, джерела випромінювання на надвисоких частотах (лазерах), світловипромінюючі структури на основі квантової щілини. Кожна із використаних при цьому технологій в першу чергу залежить від властивостей межі розділу і тих змін, які можуть проходити на межі розділу в процесі обробки в технологічному маршруті їх формування.

До основних характеристик межі розділу шаруватих структур необхідно віднести їх відтворюваність,

стабільність в часі і температурі та надійність, які повинні гарантувати нормальне функціонування сформованого приладу чи ВІС протягом тривалого часу. Наприклад, межа розподілу в стандартних тестових структурах приладів повинні витримувати багаточисельні електричні і температурні цикли, а також відносно великі всплески рівня струму, що передбачається циклом тестових вимірювань. В приладних структурах існує два механізми пробою. Структурні зміни можуть бути результатом росту дефектів або сильної взаємної дифузії через межу розділу матеріалів – це перший механізм. Другий механізм є електричний і визначається зміною числа різних дефектних рівнів в процесі роботи приладів чи ВІС, що приводить до зміни електричного стану межі розділу. Чітке розуміння процесів розмиття межі розділу, а також ефектів, які проходять при термічному чи електричному навантаженні на атомарному рівні, дозволяє оцінити за тестовим контролем придатність кожної конкретної пари матеріалів для формування приладних структур з високою в часі працездатністю. Тут, звичайно, особливу роль відіграють методи гетерування і оцінка зарядового стану межі розділу за допомогою електрофізичних параметрів тестового контролю, як для Si, так і для GaAs з використанням хілотронів.

В даному розділі статті ми розглянемо основні явища, які виникають на межі розділу, які були досліджені при розробці субмікронних структур ВІС (схем пам'яті, мікропроцесорів і мікроконтролерів) на ВІТ «Родон», які включають в себе сучасні методи зондування матеріалів приладних структур на атомарному рівні. Почнемо це з електричних властивостей і дипольної моделі межі розділу.

Основним елементом, який є необхідним для формування твердотільного приладу, є, звичайно, бар'єр, сформований між різними областями матеріалу шляхом зміни його основної сполуки або його домішкового рівня. Для того, щоб зв'язати такі зміни в хімічній чи фізичній структурі з поведінкою бар'єру, ми повинні, в першу чергу, вивчити, які особливості приладної структури. Почнемо цей опис межі розділу з концепції диполя. Потім розглянемо скачок потенціалу, що проходить на межі розділу і дослідимо характерні особливості окремих типів міжфазних меж, які визначають параметри бар'єра. Визначимо також вплив на межу розділу і локальних енергетичних станів в забороненій зоні напівпровідника, які відповідають за її електричну стабільність [2].

Тут основна задача визначення відносного положення електронних рівнів на межі розділу в твердому тілі полягає у визначенні вкладу в загальний заряд дипольних шарів, які і приводять до скачка електростатичного потенціалу. Тому вклад міжфазної межі розділу як у висоту бар'єра Шоттки, так і в зсув зон в гетеропереходах може бути розглянута з позиції дипольної моделі межі розділу. Характерною особливістю любого дипольного шару є те, що він містить заряд обох знаків. І тому простий шлях для визначення впливу складнозарядженого дипольного шару – подати область міжфазної межі у вигляді зарядженого плоского конденсатора (рис. 1, б). Якщо заряд на одиницю площі кожної із пластин конденсатора позначити через σ , а діелектричну проникливість як скачок потенціалу на межі розділу буде визначатись формулою:

$$\Delta\Phi = \sigma d / \epsilon_0, \tag{1}$$

де d – товщина міжфазного шару; ϵ_0 – діелектрична проникливість вакууму.

Ця модель може бути застосованою до любой задачі, що зв'язана з межею розділу. При цьому міжфазна область представляється у вигляді заряджених дипольних шарів, що дозволяє досить легко визначити відносне положення електронних рівнів та сумарний заряд (рис. 1, а). В дипольному вигляді можна розглядати тільки частину міжфазної межі, бо диполі повинні бути настільки тонкими, щоб їх неможливо було розрізнити відповідними експериментальними вимірюваннями.

Розглянемо дану модель більш детально на прикладі гетеропереходу. Допустимо, що ми можемо визначити положення внутрішніх рівнів в напівпровідниках по відношенню до рівня вакуума, виключивши поверхневі дипольні шари, які завжди існують на реальній поверхні. Тоді ми можемо визначити різницю в положенні країв валентної зони, що є в даному випадку зсувом зон.

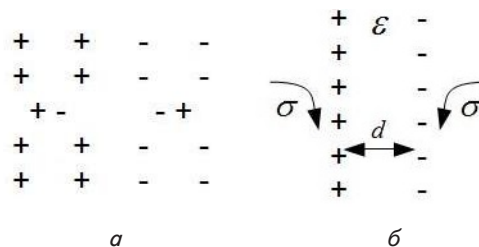


Рис. 1. Дипольна модель міжфазної межі: а – Дипольний шар; б – аналогія плоского конденсатора

При розрахунку сумарного скачка зон до власного зсуву необхідно ще додати величину зсуву, обумовлену зарядом дипольних шарів, які існують між двома напівпровідниками. Отримана таким чином сума дає реальну картину зсуву валентної зони. Тоді скачок зон можна подати у вигляді суми двох компонент (суперпозиції), один із яких є зв'язаний із межею розділу, а другий – з об'ємними властивостями матеріала напівпровідника. Для прикладу, припустимо, що $\epsilon = 10$ і $d = 1$ нм. Тоді із виразу (1) випливає, що скачок потенціалу $\Delta\Phi = 1,8 / \sigma$, еВ·нм²; де σ – заряд на одиницю площі в одиницях заряду електрона q . Відповідно, щоб отримати $\Delta\Phi = 0,1$ еВ поверхнева густина заряду повинна бути на рівні $5 \cdot 10^{12}$ см⁻². Це і є реальна величина заряду, який повинен бути присутнім у вигляді обох заряджених станів всередині шару шириною в 1 нм на міжфазній межі.

Аналогічні міркування можуть бути використані і для системи метал-напівпровідник при формуванні бар'єра Шоттки. В цьому випадку висота бар'єра буде рівна різниці між енергетичними положеннями цих двох рівнів (країв зон провідності метала і напівпровідника) плюс вклад від міжфазного дипольного шару. Відповідно і для системи напівпровідника-напівпровідника бар'єр Шоттки також визначається вкладом двох доданків: міжфазними диполями і власне об'ємом цих двох напівпровідників. Постає питання – як же буде визначатись висота бар'єра на межі розділу в реальних приладних структурах? Підкресливши цен-

тральну роль міжфазних диполів, розглянемо тепер джерела всіх вкладів в сумарну зміну потенціала на межі розділу (тобто зсув енергетичних рівнів всередині структури вже приладу в умовах рівноваги). Охарактеризуємо їх через значення висоти бар'єра Шоттки, розрив зон і електронні стани на межі розділу фаз. І на цій основі розглянемо швидкодію комплементарної пари польових транзисторів Шоттки. Це дозволить в свою чергу визначити придатність даної моделі в гетерофазній структурі як елемента інтегральної арсенідгалієвої схеми, бо висота бар'єра Шоттки визначає ефективність використання польового транзистора із затвором Шоттки в швидкісних інтегральних схемах. Якщо в ролі напівпровідникових приладів є вибраний арсенід галію, то різниця між рівнем Фермі метала і краєм зони провідності напівпровідника складає декілька десятків електронвольт. Так високе значення висоти бар'єра Шоттки означає, що на напівпровіднику n-типу провідності дуже легко формувати бар'єри з дуже низькими значеннями струмів втрат. В той же час як інший напівпровідник (InP) фосфід індію теж має відносно невелике значення висоти бар'єра Шоттки і в даному випадку, відповідно, його вже не можна використовувати в ПТ із затвором Шоттки. Таким чином, електричні властивості міжфазної межі впливають і на вибір архітектури схемотехнічних швидкодісних ВІС.

Розрив на краях забороненої зони відіграє також аналогічну роль в структурах з гетеропереходом. Так, менша величина розриву валентних зон по відношенню до розриву країв зони провідності в гетероструктурі GaAs-AlAs забезпечує можливість формування таких гетероперехідних структур, як лазери, в яких дірки можуть легко переноситись із одного шару в інший, формуючи вже шаруваті наноструктури.

Можливість використання межі розділу напівпровідник-ізолятор для формування польових транзисторів із ізольованим затвором (МДН-транзисторів) визначається густиною поверхневих станів на межі розділу. Це особливо видно на кремнієвій технології, яка дозволяє формувати комплементарні структури. У випадку GaAs всі ізолятори приводять до утворення високої густини поверхневих станів, які фіксують рівень Фермі поблизу середини забороненої зони. В результаті цього виникає складність при створенні інверсного шару на межі розділу GaAs - ізолятор. Але існують такі технології, які дозволяють формувати капсулюючі покриття, що забезпечують низький рівень густини поверхневих станів ($<10^{12}$ еВ⁻¹см⁻²) на межі розділу, наприклад (фосфід індію) InP-ізолятор, а це вже дозволяє закріпити рівень Фермі поблизу краю зони провідності. В таких системах можна достатньо легко змістити рівень Фермі в зону провідності і добитись інверсії поверхні. Саме таке явище забезпечило успіх у формуванні МДН- транзисторів на InP. Нами розроблені низькотемпературні технології формування капсулюючих покриттів Si₃N₄, AlN, BN, які дозволяють формувати низький рівень енергетичних станів на межі розділу GaAs - ізолятор, а значить можна, як і на кремнії, розробити технологію виготовлення комплементарних арсенідгалієвих структур.

Таким чином, згідно аналізу електричних рівнів на межі розділу, для формування приладів на основі GaAs доцільно застосовувати технологію польових транзисторів із затвором Шоттки, а для при-

ладів на основі InP оптимальною вже буде технологія МДН-транзисторів. Як бачимо, технологія формування діелектриків визначає енергетичний рівень міжфазної межі напівпровідник-ізолятор.

Положення атомів в області міжфазної межі визначають властивості отриманих в приладах бар'єрів. Саме визначення структури міжфазної межі - це одна із найбільш складних задач як з теоретичної, так і експериментальної точки зору. В широкому змісті межі розділу можна розділити на два великих класи: з різко вираженою шаровою структурою та з дифузійно розмитою межею. Різка межа характеризується невеликим (порядку декількох атомних шарів) відхиленням від об'єму структури в контактуючих матеріалах. На відміну від цього дифузійна межа має розміри в декілька десятків атомних шарів і значно відрізняється за атомним складом в порівнянні з об'ємом вихідних матеріалів. Тут можуть накладатись і дефекти, що виникають при осадженні шарів [3].

Структура межі розділу залежить від технології - способу її формування. Тому при проектуванні структур ВІС на першому плані стоїть технологія (маршрут), а потім уже схемотехніка та її можливості в реалізації швидкодії. За допомогою технології можна керувати межею розділу: термічним оксидуванням, фотонним чи лазерним відпалом, епітаксійним осадженням шарів (осадження із моноорганічних сполук плазмовою НВЧ-епітаксією). Сьогодні на перший план виходять експериментальні дослідження технології формування шаруватих структур арсеніду галію на кремнієвих підкладках, де буферним шаром виступає германій для зближення постійних ґраток Si і GaAs. При оптимальних умовах епітаксійного росту, коли усувається взаємна дифузія, перехідна область між об'ємом GaAs і об'ємом Ge займає всього 4 атомні площини. Такий буферний германієвий шар можна створити і багатозарядною імплантацією германію в Si. На рис. 2 схематично подана структура надґраток та електрична межа розділу гетеропереходу (Al_{0,1}Ge_{0,5}As)₁-(Ge₂)₁ та (Al_{0,5}Ge_{0,5}As)₁₂₀-(Ge₂)₁₀₀, що отримана методом молекулярно - променевої епітаксії германію на GaAs - підкладці при T ≤ 350°С де перехідна область має розмір одного атомного шару.

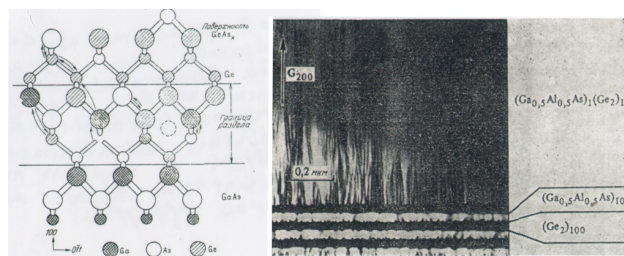


Рис. 2. Схематичне представлення електричної межі розділу GaAs-Ge (на підкладках GaAs (100)) вирощений шар Ge і структура надґраток (Al_{0,1}Ge_{0,5}As)₁-(Ge₂)₁ із стовбчастою полікристалічною структурою та структура надґратки (Al_{0,1}Ge_{0,5}As)₁₂₀-(Ge₂)₁₀₀ з монокристалічною структурою (Ge вирівнює сталу ґратки)

Для порівняння на рис. 3 поданий мікрофотознімок сцення кремнієвої структури Si-SiO₂-Si, що сформована на Si - підкладках термічним оксидуванням

Si товщиною (~7 нм) і осадженням в РПД полікремнієм при $T \leq 620^\circ\text{C}$.

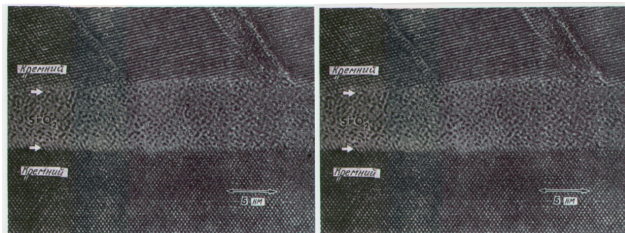


Рис. 3. Структура $\text{Si}_{\text{моно}}-\text{SiO}_2-\text{Si}_{\text{полі}}$ з різною межею $\text{Si}-\text{SiO}_2$ в межах моно шару (0,27 нм) при товщині SiO_2 7 нм

Межа $\text{Si}-\text{SiO}_2$ є різкою і плоскою в межах моношару (0,27 нм). Як бачимо структура межі розділу визначається низькотемпературною технологією формування шарів. А тепер розглянемо структури сформованих приладів на GaAs з використанням дипольної моделі межі розділу.

3. Формування цілей і задач

Ціллю даної роботи було сформулювати математичну модель дипольного шару міжфазної межі у вигляді зарядженого плоского конденсатора і на цій основі пояснити ефекти в приладних структурах, які формуються на основі субмікронної арсенідгалієвої технології, а саме :

- комплементарну арсенідгалієву структуру із само суміщеним WN_x -затвором;
- структуру арсенідгалієвого діода із резонансним тунелюванням;
- структуру сонячного елемента на основі $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CuInSe}_2$.

4. Особливості технології формування структур

4.1. Комплементарна арсенідгалієва структура із самосуміщеним WN_x -затвором

Розвиток технології GaAs ВІС майже повністю сконцентрований сьогодні навколо логічних схем, виконаних тільки на n- каналних польових транзисторах із затвором Шотткі (ПТШ). При переході до комплементарних структур на ПТШ однією з основних проблем стає мала висота бар'єра Шотткі на GaAs p-типу.

В даному розділі розглядається технологія формування затвора на основі реактивно напиленого (ВЧ-магнетроном) методом нітриду вольфраму WN_x , який може використовуватись для формування бар'єру Шотткі і в n-каналних ПТШ.

Так як при формуванні самосуміщених структур ПТШ тугоплавкий матеріал затвора використовується як маска в процесі іонної імплантації, то контакт Шотткі повинен витримувати певну термообробку, призначену для активації імплантованої домішки. Саме і в цьому напрямі проведені дослідження термонагріву на висоту бар'єра, що створювався контактом Шотткі WN_x -типу до p-GaAs. Для експериментів використовувались підкладки GaAs p-типу (леговані

Zn) діаметром 76 мм. За допомогою хімічного осадження із газової фази металоорганічної сполуки диетилцинку вирощувався епітаксійний шар, легований Zn з концентрацією дірок $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Нітрид вольфраму був осаджений за допомогою ВЧ- магнетронного розпилення вольфрамової мішені в аргоно-азотній плазмі при співвідношенні Ar/N_2 72 % N_2 . Безпосередньо перед розміщенням в установку магнетронного розпилення (Ораторія-5) вольфрамова мішень оброблялась в HCl (2 хв) з метою зняття власного оксиду. Потім за допомогою фотолітографії з використанням сухого травлення в CF_4/O_2 із плівки WN_x товщиною 0,3 мкм були сформовані діоди Шотткі. Для проведення активації імплантованої домішки в стік-витоківій області використовувалось фосфоросилікатним склом, товщини 0,3 мкм, яке наносилось на установці «Ізотрон-3». Самосуміщені p- каналні ПТШ формувались за допомогою технологічного процесу, поданого на рис. 4, де 1-імплантація Be^+ на товщину 0,1 мкм; 2-формування каналу активацією; 3-відпал p-шару; 4-осадження підзатворного нітриду вольфраму WN_x ; 5 – p^+ -імплантація (Mg^{++}) на товщину 0,25 мкм; 6-відпал стік-витоківих p^+ – областей; 7-формування контактів до стік-витоківих областей сплавом $\text{AuZn}-\text{Au}$.

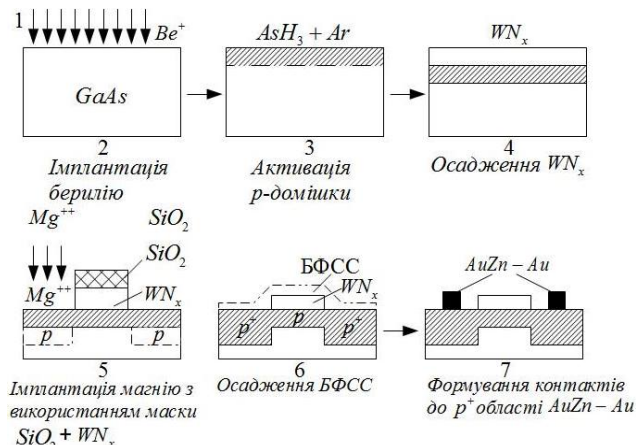


Рис. 4. Технологічний процес формування ПТШ на p-GaAs

Із рис. 4 видно, що активний канал формувався за допомогою селективної імплантації в нелеговану GaAs-підкладку іонів Be^+ з енергією 30 мВ і дозою $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Активація імплантованої домішки (Be^+) проводилась без захисної атмосфери в потоці Ar/AsH_3 протягом 15 хв при фотонному ламповому відпалі на установці «Імпульс-3» протягом 10–15 с ($T = 820^\circ\text{C}$). дослідження показали, що при цьому забезпечилась степінь активації берилію до 82 %. Як затвор до p-GaAs використовувався нітрид вольфраму, що був осаджений ВЧ-магнетронним розпиленням вольфрамової мішені в аргоно-азотній плазмі [4]. Стік-витоківі p^+ -області ПТШ формувались двозарядною імплантацією Mg^{++} з енергією 120 кеВ і дозою $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ на товщину 0,25 мкм. Самосуміщення затвора проводилось з використанням фотолітографії і маски $\text{SiO}_2 + \text{WN}_x$. Для активації домішки в стік-витоківих областях теж використовувався ламповий фотонний відпал протягом 5–8 с при $T = 780-800^\circ\text{C}$. Металізація стік-витоківих контактів проводилась

осадженням золота із водневого розчину золотохлористоводневої кислоти і напилення сплаву AuAz.

Отримана для виготовлення діодів Шоттки залежність висоти бар'єра ϕ_B діодного коефіцієнта A від температури фотонного відпалу T подані на рис. 5.

З допомогою вимірювання ВАХ затворів з розміром 4×24 межі було визначено, що висота бар'єра лежить в межах $\phi_B = 0,68 \pm 0,027$, а величина діодного коефіцієнта $n = 1,15 \pm 0,02$, останній визначає генераційно-рекомбінаційні процеси в таких діодах [5]. Близькі значення висоти бар'єра Шоттки для n- і p- діодів із контактів WN_x до GaAs вказують, що технологічно можна формувати комплементарні пари ПТШ та будувати на них цифрову швидкодіюну схемотехніку.

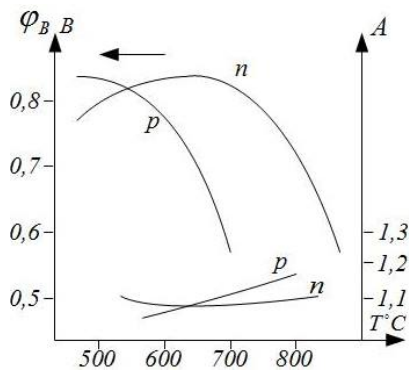


Рис. 5. Залежність висоти бар'єра ϕ_B і діодного коефіцієнта A для n і p-GaAs

Були також виміряні параметри ПТШ на основі рівняння: $I_{CB} = K(U_3 U_T)^2$, де I_{CB} – струм насичення ланки стік-витік, U_3 , U_T – напруга прикладена до затвору і порогова напруга. При довжині затвора (каналу) $L=4$ мкм порогова напруга $U_T=-200$ мВ, а при довжині затвора $L=1$ мкм, порогова напруга зменшує валась до величини $U_T=-75$ мВ. При розмірах затвора 2×24 мкм коефіцієнт $K = 0,088 \pm 0,01$ мА / В².

На рис. 6 подані вихідні характеристики p-ПТШ із затвором WN_x на основі нітриду вольфраму. Як бачимо межа розділу GaAs-нітрид вольфраму є досить стабільною для формування комплементарної пари. Крутизна ВАХ не перевищувала $\leq 4,5$ мСм / мм.

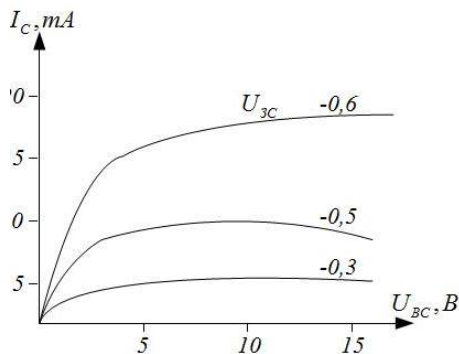


Рис. 6. Вихідні характеристики p-ПТШ із затвором WN_x

Проведені результати моделювання за допомогою програми SPICE логічних вентилів на рис. 7, а, б. Вентилі (с) і (а) мають зсуваючі рівень діоди. Саме введення діодів Шоттки дозволяє підвищити напру-

гу живлення із 0,75 В до 1,2 В. А вентилі в) і д) є вже квазікомплементарними, бо в них p- каналні ПТШ працюють в режимі збіднення рис. 7, в.

Рис. 7, г демонструє моделювання затримки від потужності вентиля. Кращим в цих варіантах є варіант с).

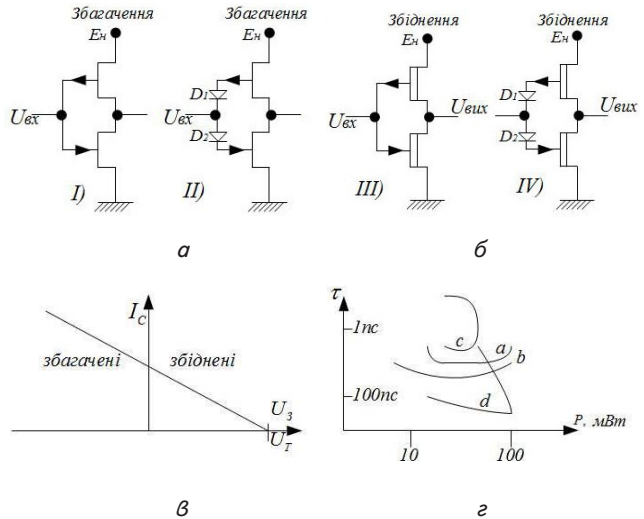


Рис. 7. Схематичне зображення : а – логічні вентиля (збагачення); б – логічні вентиля (збіднення); в – передавальна характеристика; г – затримка вентилів

Таким чином, на GaAs можна формувати комплементарні пари ПТШ для швидкодіючих логічних (цифрових) схем з малим живленням ($< 1,2$ В). Аналогічно, використовуючи півзатворний діелектрик у вигляді плівки нітриду бору, можна вже формувати комплементарні пари арсенідгалієвих МДН- транзисторів з високою швидкодією. Як бачимо, тут провідну роль відіграє стабільна міжфазна межа.

4. 2. Новий арсенідгалієвий діод з резонансним тунелюванням

Розроблена технологія формування нового резонансно-тунельного діода (РТД), який має покращені параметри в порівнянні з двобар'єрними гетеро структурами, як аналога тиристорної структури. Такий прилад сформований на основі гетероструктури AlGaAs/GaAs з трьома квантовими ямами (КЯ), де важливу роль відіграє різна міжфазна межа із стабільним зарядовим станом. Досліджувалась робота такого РТД в ролі тривірневого логічного елемента для цифрових ВІС. Розрахунок тунельного струму I_T такого діода проводився на основі виразу

$$I_T = \frac{qkT}{2\pi^2 \hbar^3} \left[\int_{E_C^L}^{\infty} dE_Z m_R^* T(E_Z) \cdot \ln \left\{ 1 + \exp \left\{ - (E_Z - E_F^L) / k_B T \right\} \right\} \right] - \left[\int_{E_C^R}^{\infty} dE_Z m_L^* T(E_Z) \cdot \ln \left\{ 1 + \exp \left\{ - (E_Z - E_F^R) / k_B T \right\} \right\} \right], \quad (2)$$

де E_C^L і E_C^R – енергії краю зони провідності, а E_F^L і E_F^R – рівні Фермі електронів на обох сторонах резонансно-тунельного бар'єру.

Ефективна маса електрона в AlGaAs $m^* = (0,067 + 0,083x)m_0$, де x -молярна доля Al. Для

електронної ефективної маси в GaAs з врахуванням пентаромбічної Г-зони $m^* = 0,067m_0(1 - 6\alpha(E - E_q))$, де E - енергія електрона, $\alpha = -0,82x$, $E_q = 1,42\text{eV}$. Така система містить три КЯ (W_1, W_2, W_3) із нелеговано GaAs з товщиною 11,0; 5,7; 6,9 нм відповідно; 4 потенціальних бар'єра: два нелегованих AlAs - шара по краях системи і два нелегованих бар'єра $Al_{0,36}Ga_{0,74}As$ між КЯ: сильно леговані n^+ -GaAs-шари з $N_D = 1 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}$ катода і анода на обох сторонах діодної системи (рис. 8, а).

Зсув країв зони провідності між GaAs і AlAs складає 0,956 eВ, а між GaAs і $Al_{0,36}Ga_{0,74}As$ в 0,2 eВ. Пікові значення концентрацій електронів в КЯ W_1 рівне $1 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$, W_2 рівне $1 \cdot 10^{16}\text{cm}^{-3}$, W_3 - $3 \cdot 10^{16}\text{cm}^{-3}$. На рис. 8, б показана ВАХ структури РТД. Лінія навантаження фіксує три стабільних точки Q_1, Q_2, Q_3 при 10,90 і 160 мВ. Нагрузовий опір складає 0,15 Ом [6].

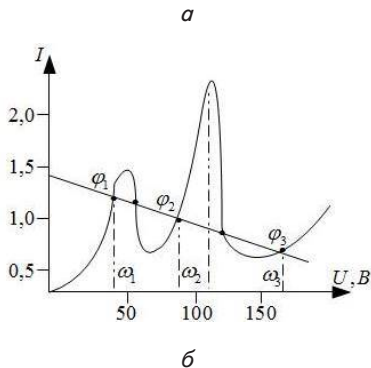
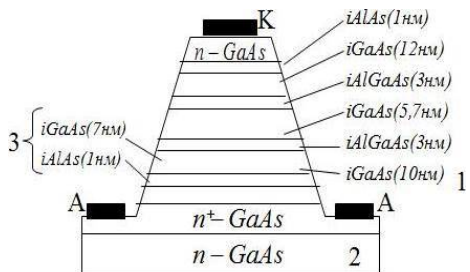


Рис. 8. Діодна система : а – Структура РТД; б – ВАХ РТД

Нелегований шар GaAs товщиною 10 нм (1) після n^+ -GaAs-анода. ВАХ структури РТД демонструє дві області від'ємного опору, що ідеально підходить для тривірневої логіки. Напруги піків склали 42 і 116 мВ. Даний РТД може бути з успіхом використаний для генерації НВЧ-коливань (>100 ГГц).

Для формування такої наноструктури РТД необхідно:

- 1) забезпечити різку межу розділу GaAs – AlAs – $Al_{0,36}Ga_{0,74}As$ низькотемпературною НВЧ-епітаксією;
- 2) забезпечити стабільний зарядовий стан межі n -GaAs – n^+ -GaAs - і GaAs [7].

4. 3. Новий арсенідгалієвий діод з резонансним тунелюванням

Структури таких приладів формувались на базі звичайної арсенідгалієвої технології іонно-легованих ПТШ. Структура такого приладу подана на рис. 9. На GaAs - підкладках з орієнтацією (10) нелегованого GaAs (1) імплантацією Si^+ формується канал n- типу

(2) з концентрацією донорної домішки $5 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$ і глибиною 150 нм. Область стоку і витоку (3) і (4) також формувались імплантацією іонів Si^+ але вже з концентрацією $5 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$ теж на глибину 150 нм. Домішки активувались фотонним відпалом 5–8 с при $T = 780^\circ\text{C}$ [8]. Після відпалу методом ПФХО з плазмовою активацією наносився шар оксиднітриду кремнію $Si_xO_yN_2$ товщиною 100 нм, на основі нього формувалось охоронне кільце (5) по краю резистивного затвору (7). Потім напилювався сплав Au-Ge-Ni для формування контактів (6). Методом ВЧ-магнетронного розпилення та оберненої (взривної) фотолітографії формувался затвор із нітриду вольфраму (WN_x) з поверхневим опором $R_s = 30\text{кОм}/\square$ товщиною 150 нм. Процес формування структури ПТШ завершувався металізацією TiPtAu (8) та пасивуючого нітридного покриття Si_3N_4 (рис. 9, а).

Вольтаперна характеристика такого ПТШ подана на рис. 9, б. Такий ПТШ із схемою регулювання був використаний для генератора НВЧ-потужності (>50 Гц).

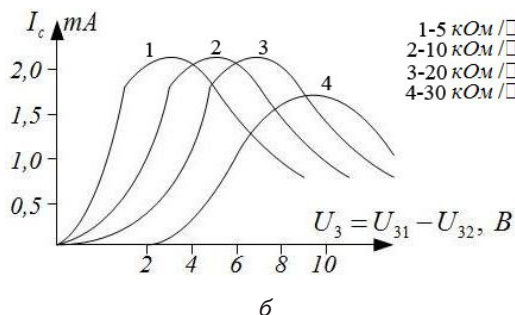
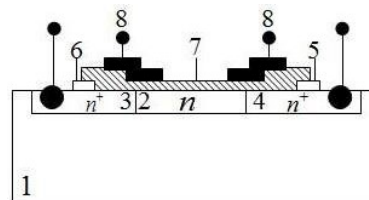


Рис. 9. Структура ПТШ: а – з резистивним затвором і від'ємною провідністю; б – ВАХ ПТШ

Як бачимо в даній технології знову використана зарядова стабільність міжфазної межі GaAs легованого і нелегованого та резистивної плівки нітриду вольфраму. Підлегування даної плівки кремнієм (до 1 %) покращує температурну стабільність ВАХ структури [9].

4. 4. Механізми переносу в СЕ з використанням структури ZnO/CdS/CuInSe2

Найбільш повно проявляється межа розділу в структурах тонкопліткових СЕ. Фотоперетворювачі із структурою CdS/CuInSe2 є сьогодні перспективні для широкого використання в наземних енергетичних пристроях. Проте втрати у фронтальному шарі CdS таких сонячних елементів є досить великими. Тому застосування широкозонних напівпровідників, таких як ZnO, In_2O_3 , ZnCdS, SnO_2 в ролі фронтального шару значно збільшують фотострум. Для цього ми вибрали таку структуру, в якій вивчалися механізми переносу носіїв заряду в тонкопліткової структурі СЕ

ZnO/CdS/CuInSe₂ (рис. 10, а), а саме темнові ВАХ в діапазоні температур 200–300 К та спектральні характеристики і залежність ємності від частоти і прикладеної напруги (рис. 10, б). Структура такого СЕ подана на рис. 10, а. Шар CuInSe₂ товщиною в 2 мкм наносився на саму підкладку, покриту шаром Мо, який служив тильним контактом до шару CuInSe₂. Тонкий (50 нм) проміжний шар CdS покращує поверхневі властивості шарів і служив хімічним буфером, що захищав основний шар CuInSe₂ протягом всього технологічного циклу. Фронтальний шар ZnO, що нанесений поверх шару CdS виконував роль противідбивного (просвітлюючого) шару, що зменшує коефіцієнт відбивання на 6–10 % [10].

Темнова ВАХ сонячного елемента знімалась як при прямій б), так і зворотній напрузі і освітленні (рис. 10, в). В основу розрахунку була взята модель діода з врахуванням шунтуючого R_p і послідовного R_s опору за формулою

$$I_f = (U - IR_s) / R_p + I_0 \exp\{q(U - IR_s) / AkT - 1\}, \quad (3)$$

де I₀ – обернений струм насичення, А – діодний коефіцієнт, що визначає генераційно-рекомбінаційні процеси.

Параметри СЕ при освітленні в умовах АМ 1,5 (100 мВт/см²) були наступними V_{ХХ}=0,38 В, I_{КЗ}=40 мА/см², FF=0,71 і К.К.Д 11,5 %. Вивчалися також спектральні характеристики квантової ефективності СЕ. Зменшення фотоструму в довгохвильовій частині спектра (при λ>0,9 нм) пояснюється поглинанням вільних неосновних носіїв заряду в шарі CuInSe₂, яке зумовлене певною дефектністю цього шару (рис. 7, з). Також вимірювалась залежність ємності СЕ від частоти і прикладеної напруги. З ростом частоти від 20 кГц до 10 МГц ємність зменшувалась від 2200 до 750 пф, що вказує на наявність глибоких рівнів, які зазвичай спостерігаються в СЕ на основі CuInSe₂. На рис. 10, з подана залежність від'ємного заряду в збідненому шарі CuInSe₂ від його ширини [11].

При нульовому зміщенні ця ширина складала 0,3–0,4 мкм. Враховуючи результати вимірювання залежності I₀ і А діодного коефіцієнта від температури, можна розглянути для такого СЕ декілька моделей переносу носіїв заряду. Якщо рекомбінація на межі розділу є переважаючим механізмом, то коефіцієнт А повинен наближатись до 1.

Виміряне значення діодного коефіцієнта приймало значення А=1,7–2,05, а значення енергії активації лежало в межах 0,47–0,43 еВ і є менше 1 еВ. Це значить, що на межі розділу рекомбінація не може бути домінуючим механізмом переносу в структурі СЕ ZnO/CdS/CuInSe₂. На межі розділу переважає механізм рекомбінації/ генерації в збідненому шарі, про що говорять значення енергії активації, але є рівне половині ширини забороненої зони CuInSe₂ (тобто

≤0,5 еВ). Другим механізмом переносу носіїв може бути термічно стимульоване тунелювання [12].

Як бачимо, для покращення параметрів тонкоплівкових структур СЕ необхідно забезпечити високу чистоту плівок, які, як правило, осаджуються при підвищених температурах, що сприяють росту дефектності.

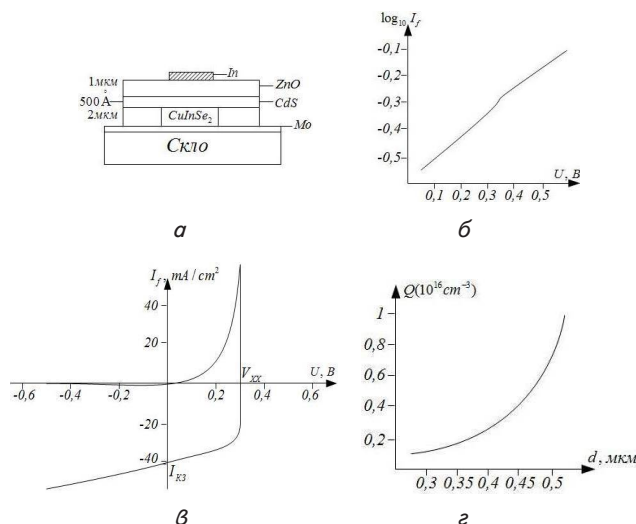


Рис. 10. Механізм переносу: а – структура тонкоплівкового СЕ ZnO/CdS/CuInSe₂, б – вольтамперні характеристики СЕ ZnO/CdS/CuInSe₂, в – при прямому зміщенні і при прямому і оберненому зміщенні, г – залежність заряду збідненого шару CuInSe₂ від його товщини

5. Висновки

1. На основі експериментальних досліджень розроблена дипольна модель межі розділу шаруватих структур, що представляє собою зміну поверхневої густини плоского конденсатора.
2. Дипольна модель дозволяє ефективно моделювати як вольтамперні, так і вольтфарадні характеристики приладних структур, сформованих на нових технологічних ефектах.
3. З використанням моделі межі розділу технологічно вибрані капсулюючі покриття та підзатворний діелектрик для арсеніду галію, що дозволяє сформувати комплементарні пари на транзисторах Шоттки та МДН-транзисторах.
4. Визначено вплив межі розділу в тонкоплівкових структурах СЕ на їх електрофізичні параметри і характеристики. Зокрема встановлено, що технологія формування шарів CuInSe₂ визначає ефективність структури СЕ, а саме напруги холостого ходу та густини струму короткого замикання.

Література

1. Новосядлий, С. П. Суб-наномікрона технологія структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. – Івано-Франківськ Місто НВ, 2010. – 456 с.
2. Новосядлий, С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. – Івано-Франківськ: Сімка, 2003. – С. 52–54.

3. Буджак, Я. С. Лабораторно-розрахунковий практикум з фізики напівпровідників та теорії твердого тіла [Текст] / Я. С. Буджак, П. І. Мельник, С. П. Новосядлий. – Альт, 2008. – 240 с.
4. Пека, Г. П. Варизонные полупроводники [Текст] / Г. П. Пека, В. Ф. Коваленко, А. Н. Смоляр; под ред. Г. П. Пека. – К.: Выща шк., 1989. – 251 с.
5. Черилов, А. В. Исследование электрофизических характеристик ионно-легированных слоев GaAs [Текст] / А. В. Черилов. – Электронная техника, 1984. – С. 8–12.
6. TSANG, W. T. Extremely low threshold AlGaAs graded index wave guide separate confinement heterostructure lasers grown by molecular beam epitaxy [Text] / W. T. TSANG. – Appl. Phys. Lett. – 1982. – Vol. 40. – P. 217–219.
7. Горщев, Л. И. Влияние легирующей примеси на механические и рекомбинационные параметры варизонных твердых растворов AlGaAs [Текст] / Л. И. Горщев, В. Ф. Коваленко, Б. М. Масенко. // Укр-физ журнал. – 1982. – Т. 27. – С. 568–571.
8. Sassi, G. Theoretical analysis of solar cells based on graded band-gap structures [Text] / G. Sassi // Journal of Applied Physics – 1983. – Vol. 54. – P. 5421–5427.
9. Базбек, А. И. Быстродействующие светодиоды на основе варизонных твердых растворов AlGaAs(Si) [Текст] / А. И. Базбек, В. Ф. Коваленко, В. А. Краснов. // Журнал прикладной спектроскопии. – 1986. – Т. 45. – С. 274–279.
10. Новосядлий, С. В. Високоєфективні структури сонячних елементів на основі аморфного гідрогенізованого кремнію [Текст]: Матер. II Міжн.науково-прак. конф. / С. В. Новосядлий, Л. В. Мельник, Т. П. Кіндрат // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікації, нано-та мікроелектроніки. – 2012. – С. 172–173.
11. Новосядлий, С. В. Дослідження ефективності гетерних технологій в структурах GaAs [Текст] / С. П. Новосядлий, С. М. Марчук, Т. Р. Сорохтей, Ю. В. Возняк. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2012. – С. 416–428.
12. Патент на корисну модель № 68203 МПК H01L21/20 від 26.03.12. Спосіб формування епітаксійних арсенід-галієвих шарів на монокристалічних кремнієвих підкладках [Текст] / Новосядлий С. П., Вівчарук В. М., Кіндрат Т. П. – Прикарпатський національний університет. – 7 с.

В роботі приведено узагальнені зміни параметрів спектрів пропускання багатошарових інтерференційних структур відрізаючих оптичних фільтрів в залежності від поляризації та кута падіння паралельних потоків випромінювання відносно нормалі до їх поверхні. Розроблено модель та досліджено вплив перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики відрізаючих фільтрів в залежності від кута

Ключові слова: характеристична матриця, спектральні характеристики, спектр пропускання, неоднорідності показника заломлення

В работе приведены обобщенные изменения параметров спектров пропускания многослойных интерференционных структур отрезающих оптических фильтров в зависимости от поляризации и угла падения параллельных потоков излучения относительно нормали к их поверхности. Разработана модель и исследовано влияние переходной области с неоднородным распределением показателя преломления на спектральные характеристики отрезающих фильтров в зависимости от угла

Ключевые слова: характеристическая матрица, спектральные характеристики, спектр пропускания, неоднородности показателя преломления

УДК 519.85

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО– ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДРІЗАЮЧИХ ОПТИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

В. І. Пецко

Аспірант

Кафедра кібернетики та
прикладної математикиУжгородський національний університет
вул. Підгірна, 46, м. Ужгород, Україна, 88000

E-mail: petsko.vi@gmail.com

1. Вступ

За останні роки набув чималого розвитку синтез багатошарових оптичних систем, помітно зріс інтерес до технічного застосування тонких плівок, що викли-

кало швидкий розвиток тієї галузі фізичної оптики, що стосується відбивання, пропускання і поглинання світла в багатошарових тонкоплівкових системах. Практична цінність таких систем, зокрема і фільтрів, полягає в тому, що за їх допомогою можна в широкому