

С.П. Новосядлий, Т.Г. Бенько, І.Т. Когут

Особливості електрофізичного діагностування польових транзисторів Шотткі на епітаксійних шарах GaAs на кремнієвих підкладках для мікросистемних використань

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, 76018, Україна, igorkohut2202@gmail.com

В даній статті проаналізовано структуру арсенід галієвого ПТШ на кремнієвій підкладці, придатного для локальної інтеграції в КНІ-технології та метод його електрофізичного діагностування на основі змін теплового опору R_T . Відомо, що теплопровідність GaAs в 3 - 4 рази є гіршою порівняно кремнієм. Щоб усунути цей недолік було розроблено технологію формування приладних швидкісних GaAs-структур на поверхні кремнієвої підкладки.

Ключові слова: арсенід галію, польовий транзистор, тепловий опір, електрофізичне діагностування.

Стаття поступила до редакції 12.08.2019; прийнята до друку 15.09.2019.

Вступ

Перспективними елементами для створення елементної бази мікросистем-на-кристали (МнК) є структури кремній-на-ізоляторі (КНІ), які завдяки діелектричній ізоляції приладного шару мають суттєві переваги порівняно зі стандартними КМОП-структурами на об'ємному кремнії щодо швидкодії, споживаної потужності, елементної інтеграції та ін. Окрім цього, КНІ - структури відкривають додаткові можливості конструювання нових приладних структур, зокрема сенсорного типу, що є важливим для створення сенсорних та аналітичних МнК [1,8]. За технологіями локальних КНІ- структур, на одному кремнієвому кристалі можна інтегрувати як приладні КНІ - структури, так і арсенід-галієві транзистори, зокрема, польові транзистори Шотткі (ПТШ). Така інтеграція відкриває широкі можливості створення елементної бази сенсорних МнК з покращеними і новими властивостями.

В даній статті проаналізовано структуру арсенід галієвого ПТШ на кремнієвій підкладці, придатного для локальної інтеграції в КНІ- технології та метод його електрофізичного діагностування на основі змін теплового опору R_T . Відомо [3,4], що теплопровідність GaAs в 3-4 рази є гіршою порівняно з кремнієм. Щоб усунути цей недолік було розроблено технологію формування приладних швидкісних GaAs - структур на поверхні кремнієвої

підкладки.

Можливість використання величини R_T як інформативного електрофізичного параметра для діагностування приладних структур інтегральних схем (ІС) ґрунтується на установленій різкій залежності їх надійності від температури, а саме, підвищення температури приладу на 15°C термін його експлуатації зменшується в 2-6 разів. Метою досліджень величини R_T інтегральних GaAs приладних структур на епітаксійних кремнієвих підкладках є підвищення терміну їх експлуатації до рівня кремнієвих.

I. Особливості формування арсенід галієвих ПТШ на гетеропереході

Перспективним елементом швидкодіючих ІС та створюваних МнК (в НВЧ-діапазоні) є гетероструктурний польовий транзистор з керуючим переходом метал-напівпровідник (ГМеН), в якому використовуються властивості гетеропереходу між тонкими монокристалічними шарами двох напівпровідникових матеріалів з близькою кристалічною структурою (параметрами кристалічних ґраток), але з відмінними ширинами заборонених зон. Найбільш поширеним є гетеро p-n-перехід між GaAs та арсенідом-галію-алюмінію ($Al_x Ga_{1-x}As$), як зображено на рис. 1, а. Величина x показує відносний вміст алюмінію. Ширина

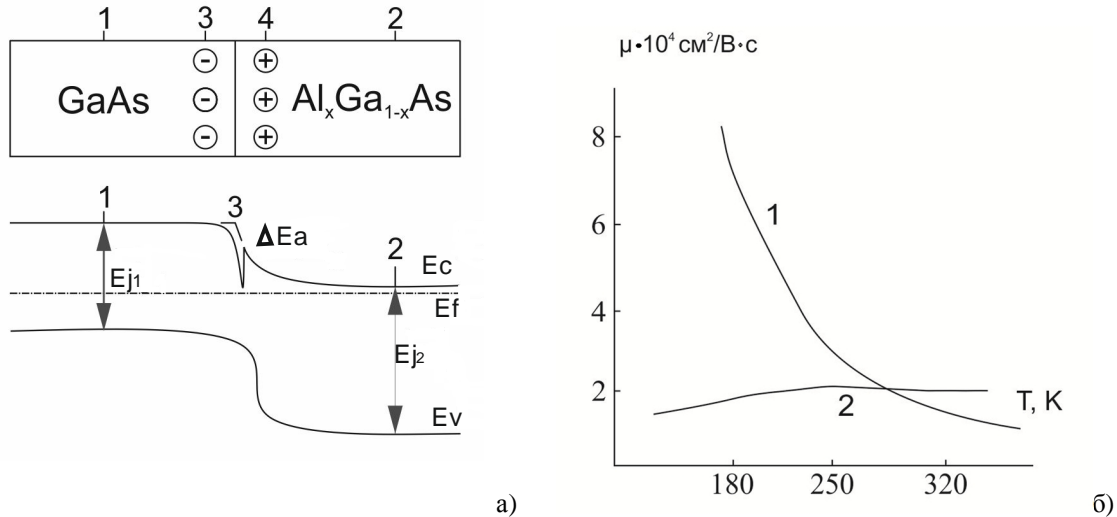


Рис. 1. Структура і рівноважна енергетична зонна діаграма гетеро р-п - переходу між слабологованим GaAs і легованим донорами (Si, Se, S) $Al_x Ga_{1-x} As$ (а), температурна залежність рухливості електронів для двовимірного електронного газу (2ДЕГ) в гетероструктурі $Al_x Ga_{1-x} As$ (крива 1) та в GaAs (крива 2) (б).

забороненої зони $Al_x Ga_{1-x} As$ лінійно збільшується з ростом x . Типове значення $x = 0,3$ якому відповідає ширина забороненої зони $E_{p2} = 1,82$ eV.

Рівноважна енергетична діаграма такого гетеропереходу між слабологованим GaAs і легованим донорами (Si, Se, S) $Al_x Ga_{1-x} As$ подана на рис. 1, б. Штрихова горизонтальна лінія на діаграмі відповідає рівню Фермі E_F . У рівноважному стані ця енергія є однаковою для обох типів напівпровідників. В нелегованому чи слабологованому напівпровіднику GaAs (область 3 рівень Фермі розміщується майже посередині забороненої зони), як у власному напівпровіднику і-типу.

А в легованому донорами напівпровіднику (область 2) $Al_x Ga_{1-x} As$ з концентрацією $N_D = (1-20) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ рівень Фермі розміщується біля дна зони провідності E_c . А в GaAs біля межі 5 обох напівпровідників в зоні провідності E_c утворюється область 3 з мінімальною енергією електронів. В цій області проходить накопичення електронів, що переходять з області 4, розміщеній в $Al_x Ga_{1-x} As$ (області 2). через утворений бар'єр. Область 4 є збіднена електронами і заряджена позитивно, оскільки містить некомпенсовані іони донорів. Тут розрив дна зони провідності E_c (утримує скачок ΔE_p) на межі 5 при $x = 0,3$ величиною 0,32 eV.

Електрони що накопичилась в області 3, знаходяться в потенційній ямі і в слабкому електричному полі можуть перемішуватися тільки вздовж межі 5 в перпендикулярній площині згідно з даним рисунком. Тому таку сукупність електронів, що накопичились в області 3, називають (2ДЕГ), підкреслюючи цим, що в слабкому електричному полі ці електрони не можуть переміщатися в третьому вимірі, тобто переходити із області 3 в область 4, бо тут є бар'єр, утворений розривом дна зони провідності і скачком ΔE_p . Таким чином, 2ДЕГ виникає внаслідок теплової іонізації донорних домішок в області GaAs-Al, де концентрація донорних домішок становить $N_D > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ і з

підвищенням рухливості вони переміщуються в область 3, розташованій в GaAs, де концентрація донорів менше $< 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Таким чином в такому р-п-переході досягається просторове розділення вільних електронів (в області 3) і розсіюючих центрів (іонів акцепторів), що зосередженні в $Al_x Ga_{1-x} As$. В цьому і полягає відмінність гетеропереходів від гомопереходів. Внаслідок невідповідності кристалічних ґраток двох матеріалів GaAs і $Al_x Ga_{1-x} As$ з однієї сторони та GaAs і кремнієвої підкладки через буферний шар германію з другої сторони, забезпечується низька густина поверхневих станів Q_{ss} і дефектів, оскільки кремнієва підкладка вже має сформований кисневий гетер [6].

По вказаних причинах для електродів, що накопичені в області 3, в слабкому електричному полі досягаються дуже висока рухливість електронів $\mu = (8 - 9) \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ при температурі 300К. Оскільки в нелегованому епітаксійному шарі і-GaAs переважає ґраткове розсіювання носіїв, то рухливість електронів різко збільшується при зниженні температури до криогенної (77К).

Для кращого просторового розділення 2ДЕГ та розсіюючих центрів між нелегованим і-GaAs і легованому донорами $n-Al_x Ga_{1-x} As$ введено тонкий (товщиною декілька нанометрів 4 - 6 нм) буферний розділяючий шар нелегованого (і- $Al_x Ga_{1-x} As$), що збільшує рухливість електронів 2ДЕГ. Температурна залежність рухливості електронів для 2ДЕГ в гетероструктурі із буферним шаром подана на рис. 1, б) (крива 1). При температурі рідкого азоту (77К) та рідкого гелію (4К) рухливість електронів зростає від $1,4 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, відповідно. На цьому ж рисунку подана температура залежність рухливості електронів в шарі і-GaAs (крива 2), що містить донори з концентрацією 10^{17} cm^{-3} . Це вказує на те, що швидкодію ПТШ на гетеропереході як мінімум на порядок є вищою, ніж на гомопереході.

Рухливість електронів 2ДЕГ особливо при криогенних температурах сильно залежить від

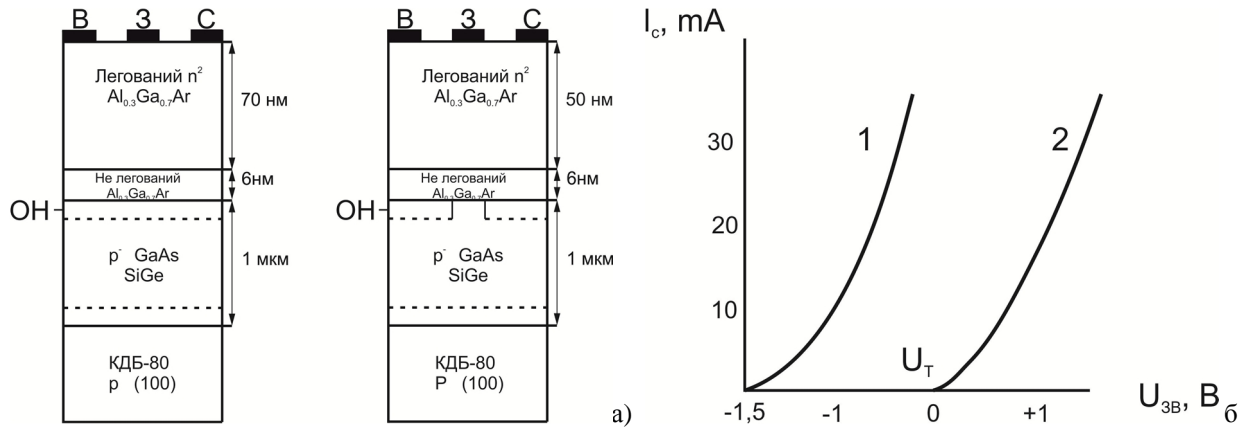


Рис. 2. Структура нормально відкритого (1) і нормально закритого (2) ПТШ-транзисторів на гетеропереході а); їх стік-затворні характеристики б).

технології формування гетероструктури. Для її формування використовують різні способи епітаксійного нарощування тонких епітаксійних шарів GaAs на кремнієвій підкладці: газофазну епітаксію із металоорганічних сполук (МОС), молекулярно-променеву епітаксію та атомно-шарову епітаксію із МОС.

Найкращу якість епітаксійних шарів в поданій гетероструктурі, найменшу густину дефектів на їх межах і найбільшу рухливість забезпечує розроблена атомно-шарова епітаксія з використанням фотолізу розкладу МОС за допомогою ексимерного KrF-лазера. Мала теплопровідність GaAs і зумовила розробку арсенід-галієвої технології на епітаксійних шарах, осаджених на кремнієвих підкладках з високою теплопровідністю, що відповідно значно покращить термостабільність параметрів субмікронних структур ВІС та МнК, яка діагностується величиною теплового опору R_T .

Описаний вище гетероперехід може бути використаний для швидкісних ВІС та МнК на основі ПТШ (переході метал-напівпровідник). Приклади структур ПТШ з нормально відкритим і закритим ГМен (ПТШ) – транзисторів зображено на рис. 2, а, їх передавальні характеристики на рис. 2, б.

При формуванні структур нормально відкритого ПТШ на кремнієву підкладку методом атомно-шарової епітаксії з використанням МОС і активації ексимерним KrF-лазером при $T \approx 520^\circ\text{C}$ наносять буферний шар германію для вирівнювання постійних ґраток кремнію та арсенід галію та шари слабологовані p^- -GaAs області і нелегованої і n^+ -шарів $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Останній легуються селеном до величини $N_d = (5 - 7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для формування затвора з використовують плівку алюмінієвого сплаву АКГо-11 (алюміній-кремній-гольмій), а для контактів стік витокових областей-сплав AuGe_{12} (AuGeNi). В нормально закритому ПТШ верхній шар арсеніда-галія-алюмінія частково травляють до товщини 50 нм. Таким способом на одній кремнієвій підкладці формують як нормально відкритий, так і нормально закритий ПТШ, що й утворюють комплементарну К-ПТШ.

Порогова напруга таких ПТШ-транзисторів гетеропереході визначається виразом:

$$U_T = \varphi_{03} + \frac{\Delta E_{\text{п}}}{q} - qN\Delta \cdot d^2 / 2\epsilon_0\epsilon_{n2}, \quad (1)$$

де φ_{03} -рівноважна висота потенціального бар'єру переходу метал-напівпровідник (GaAsAl); де d -сумарна товщина легованого донорами і нелегованого шару GaAsAl; ϵ_{n2} - його відносна діелектрична стала.

Принцип дії ГМен транзистора є аналогічний принципу дії МЕН транзистора на гомопереході, як ПТШ. Між металевим затвором і розміщеним під ним шаром GaAsAl утворюється так званий керуючий гетероперехід (метал-напівпровідник). Збіднена область такого переходу в основному розміщується в шарі GaAsAl. Канал нормально відкритого транзистора формується при $U_{\text{зв}} < 0$ в шарі нелегованого GaAs на межі з гетеропереходом ОН 2ДЕГ, що обмежена штриховою лінією на рис. 2, а. Під впливом керуючої напруги затвор-витік змінюється товщина збідненої області $p-n$ -переходу (бар'єру) метал-напівпровідник, концентрація електронів в ОН і струм стоку. Електрони поступають в ОН із витоку. При досить великій (за модулем $U_{\text{зв}} < 0$), яка є рівною пороговій напрузі U_T , то збіднена область переходу розширюється настільки, що повністю перекриває ОН електронів і струм стоку стає нульовим.

В нормально закритому ПТШ внаслідок меншої товщини верхнього шару GaAsAl при $U_{\text{зв}} = 0$ провідний канал відсутній, оскільки область накопичення 2ДЕГ повністю перекрита збідненою областю керуючого $p-n$ -перехода. А канал відкривається вже при деякій позитивній напрузі $U_{\text{зв}} > 0$, якщо збіднена область управляючого переходу звужується настільки, що її нижня межа попадає в область накопичення електронів. Виходячи із рис. 2, б, отримуємо комплементарну пару ПТШ транзисторів на гетеропереході.

На рис. 2, б подані стік-затворні характеристики такої комплементарної пари ПТШ, тобто нормально відкритого 1 і нормально закритого 2 транзисторів при довжині затвору $L = 0,5 \text{ мкм}$ на відстані стік-витік $2,5 \text{ мкм}$ з товщинами шарів, що подані на рис.

2, а. Завдяки високій рухливості ОН (2ДЕГ) на малій довжині затвора практично у всьому діапазоні напруг на затворі $U_{ЗВ}$ (за виключенням U_T) досягається насичення дрейфової швидкості електронів понад 10^7 В/С і спостерігається лінійна залежність струму стоку I_c :

$$I_c = s'(U_{ЗВ} - U_T - E_{КР} \cdot L_K), \quad (2)$$

де $E_{КР}$ – критична напруженість поля; $S' = S/(1 + R_B \times S)$; $S = \epsilon_0 \epsilon_{оп} V_{n_{кр}} \times b/d$.

Для кривих 1 і 2 S'/b є рівне 117 і 175 мСм/мм відповідно. Високе значення крутизни нормально закритого ПТШ (крива 2) зумовлена меншою товщиною легованого донорами n^+ - $Al_xGa_{1-x}As$. А високе значення крутизни відповідно суттєво підвищує швидкодію.

Дуже важливою перевагою структури ГМеН-транзисторів (ПТШ) на гетеропереході в порівнянні з транзисторами МеН на гомопереході є менша густина поверхневих зарядів Q_{ss} на межі GaAsAl з діелектриком (SiO_2 , Si_3N_4) і більша висота бар'єру Шотткі $\phi_{03} = 1$ В. Тому внаслідок меншої густини поверхневого заряду Q_{ss} зменшується від'ємний поверхневий заряд і товщина збіднених областей в проміжках витік-затвор, затвор-стік, що дозволяє забезпечити менший паразитний опір цих областей, не використовуючи додаткові технологічні операції селективного іонного легування типу (LDD), які необхідні для транзисторів із самосуміщеними затворами. Унаслідок збільшеної висоти бар'єру Шотткі для ГМеН (ПТШ транзисторів) допустимою є висока (до 0,7 В) пряма напруга затвор – витік, що є особливо важливими для нормально закритих ПТШ, якщо робочі напруги на затворах можуть змінюватися у досить вузькому діапазоні, обмеженим зверху напругою відпирання керуючого переходу метал-напівпровідник.

Імпульсні і частотні властивості ГМеН-транзисторів в основному визначаються часом прольоту електронів через канал, де вони рухаються із швидкістю насичення: $t_{прк} = L_z/V_{нас}$. При $T = 300$ К, і $V_{нас} = 2 \cdot 10^7$ см/с при зниженні температури швидкість насичення збільшується по закону $V_{нас} \sim 1/T$.

Саме ГПТШ-транзистори є дуже перспективними для їх використання в НВЧ ВІС та МнК. Найкращі параметри такі транзистори мають при криогенних температурах (77 К). Проте і при кімнатній температурі їх основні параметри (коефіцієнт шуму і підсилення) кращі, ніж в ПТШ – транзисторах на гомопереході, що досягається і при більшій довжині затвору ГМеН - транзисторів. Наприклад, в діапазоні частот 18 – 30 ГГц, МЕН-транзистори при довжині затвора $L = 0,25$ мкм мають коефіцієнт шуму 1,8 дБ і коефіцієнт підсилення 9дБ. Аналогічні значення цих параметрів для ГМеН-транзисторів отримані при довжині затвору $L_{ЗВ} = 0,4$ мкм. Зараз розробляються ГМеН транзистори на GaAs на кремнієвих підкладках вже з довжиною затвора 0,18 – 0,2 мкм, які можуть працювати на частотах НВЧ до 125 ГГц.

Отже, як видно із наведених результатів досліджень - для прогнозування надійності таких швидкісних ВІС, що сформовані на основі епітаксійних GaAs ГМеН-транзисторів, необхідно

вибрати метод електрофізичного діагностування, починаючи зі стадії формування структур. Таким параметром було обрано так званий тепловий опір R_T , бо він визначає якість формування буферного германієвого шару Si-Ge між кремнієвою підкладкою та епітаксійним шаром GaAs для вирівнювання постійних кристалічних ґраток, що виникають як за допомогою епітаксії, так і багатозарядної імплантації германію (Ge^{++}). Тому розглянемо особливості даного методу.

II. Електрофізичне діагностування ГТШ – транзисторів швидкісних ВІС на епітаксійних шарах GaAs, сформованих на Si-підкладках.

Фізична сутність теплового опору R_T полягає в тому, що при розсіюванні в процесі роботи напівпровідникового приладу, як елемента ВІС, частина підведеної до нього електричної потужності, перетворюється у тепло, що попадає по відповідному тепловому тракту на тепловий стік, яким у напівпровідниковому приладі чи інтегральному елементі є навколишнє середовище, а при значній потужності - створений спеціальний тепловідвід-радіатор.

При нестационарному перехідному тепловому процесі у ВІС необхідно врахувати значення теплоємностей і тоді тепловий тракт буде представляти собою $R_T C_T$ ланку [2, 4]. Перехідні і паралельні теплові опори мають власну діагностичну інформативність, яку оцінювати досить складно в перехідному просторі. Теплопровідність структури ВІС на Si- підкладку, корпус, радіатор чи стрічковий носій (рамку вивідну), бо сама структура ВІС є неоднорідною.

Із всіх відомих методів вимірювання температури кристалу ВІС і оцінка на цій основі величини R_T , переважаючим є електрофізичний метод (або метод термочутливого параметра), що обумовлено його перевагами, а саме: простотою схемної реалізації, можливістю вимірювати температури тестового елемента ВІС без безпосереднього доступу до неї, можливістю вимірювати найбільш перегрітих областей структури. Саме для польових транзисторів на GaAs із затвором у вигляді бар'єру Шотткі (ПТШ) такими термочутливими елементами можуть бути: опір витоку, питомий опір затворної системи з металізацією, прямий спад напруги в колі затвор-витік $\Delta U_{ЗВ}$, які й були обрані для електрофізичного діагностування ПТШ на Si-підкладці в даній роботі.

В загальному вигляді тепловий опір визначимо із такого співвідношень:

$$U_{ЗВ} = \varphi_0 - K_T(T_C + R_T \times P_{розс}), \quad (3)$$

де φ_0 – величина потенціального бар'єра Шотткі (В); K_T - коефіцієнт термочутливості; $P_{розс}$ – потужність розсіювання.

Диференціюючи вираз (3) почергово за $P_{розс}$ та температурі середовища T_C та взявши відношення цих похідних в кінцевих різницях, отримаємо величину теплового опору:

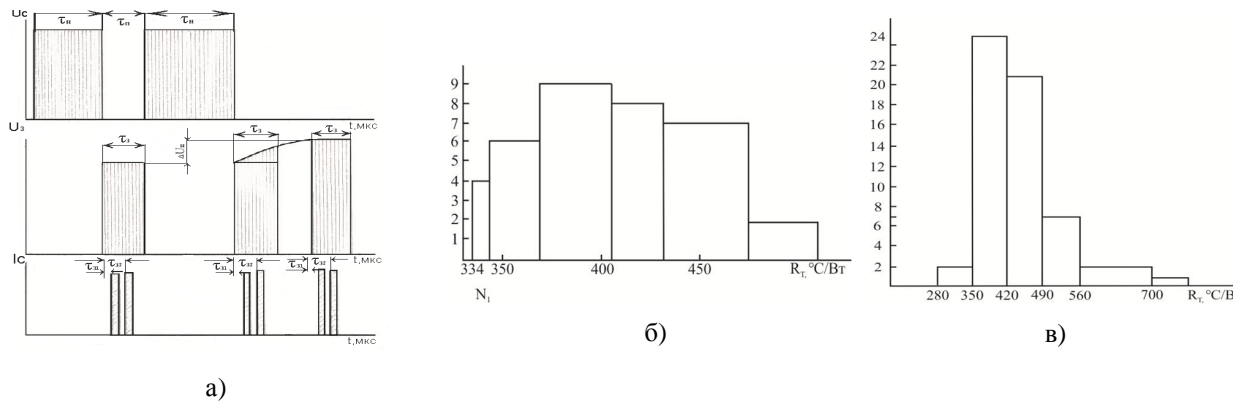


Рис. 3. Вимірювач теплового опору R_T польових та біполярних транзисторів і її структур для електрофізичного діагностування їх надійності а), та діаграма роботи вимірювача теплового опору для ПТМ б, в).

$$R_T = \frac{[\Delta U_{ЗВ}(P)/\Delta P_{розс}] \tau_c}{[\Delta U_{ЗВ}(T)/T]_{розс}} \quad (4)$$

Тут величини $\Delta U_{ЗВ}(P)$ і $\Delta U_{ЗВ}(T)$ представляють собою зміну термочутливого параметра, викликаного зміною тільки зовнішньої потужності розсіювання або тільки зовнішньої температури відповідно.

Із отриманого співвідношення (4) видно, що для визначення теплового опору R_T необхідно вимірювати питовий (на) одиницю розсіювальної потужності пристрій теплочутливого параметра в умовах термостаювання ($T_S = \text{const}$) і розділити його на пристрій цього параметра, вже отриманого при зміні зовнішньої температури, коли $P_{розс} = \text{const} = 0$, тобто на температурний коефіцієнт термочутливого параметра K_T . Даний метод було розроблено й опробовано в лабораторії тестового електрофізичного діагностування структур біполярних і польових транзисторів в СКТБ «Орізон» (ВАТ «Родон») вимірювач теплового опору R_T для типових біполярних і польових транзисторів (рис. 3) в рамках автоматизованого тестового електрофізичного діагностування надійності ВІС. В його склад входять: вимірювач термочутливого параметра, термостат і блок управління з контактуючим пристроєм для загерметизованих транзисторів і інтегрованих тестових структур. Діаграма роботи вимірювача R_T для ПТМ подана на рис. 3, б, в.

У вимірювачі передбачений режим градування-калібрування (на спеціальних тестових структурах транзисторів), при якому від блока управління поступають сигнали, що забезпечують регулювання та термостаювання контактуючого приладу на заданому температурному діапазоні ($-60 - +150^\circ\text{C}$) ± 1 . Величина температурного термочутливого параметра K_T ($\text{В}/^\circ\text{C}$) визначається як середнє значення від загального числа вимірювань (5-10) [5, 7].

В режимі вимірювання R_T задаючий генератор формує імпульс напруги $U_{ЗВ}$ з певною тривалістю τ_1 і паузою τ_p , що визначає час розігріву та тривалість паузи розігрівальної потужності, а також величину вимірювальної напруги та стробуючого імпульсу. Імпульси розігрівальної потужності через підсилювач

поступають в електричне коло стоку досліджуваного ПТШ, а імпульси вимірювальної напруги через підсилювач та струмозадаючий елемент – в електричне коло вимірюваного тестового ГПТШ-транзистора в момент паузи розігрівальної потужності, як показано на діаграмі рис. 3, б.

Напруга на затворі $U_{ЗВ}$ та її приріст ΔU_n вимірюється імпульсним амплітудним вольтметром. І струм та напруга на затворі (як подача стробуючого імпульсу, включаючи імпульсний вольтметр) тут вимірюється через два встановлених часових інтервали $\tau_{зв1} = 0,5$ мкс та $\tau_{зв2} = 1,5$ мкс. Оригінальне застосування подвійного стробуючого імпульсу у вивірковачі теплового опору R_T в GaAs-ГПТШ обумовлено наступним фактором. Саме транзистори типу GaAs-ГПТШ на Si- підкладці НВЧ- діапазону за рахунок участі 2ДЕГ, як правило, призначені для роботи в області високих частот (>5 ГГц) і в зв'язку з цим мають досить тонку нанометрову структуру активної зони. Окрім цього, оцінка розсіювання підведеної потужності навіть в ідеальній структурі ПТШ показує можливість нерівномірного розподілу струмів (а значить тепла), що розігрівають таку багатопшарову структуру по ширині каналу, так і його довжині, а наявність в структурі ГПТШ буферного шару (Ge-Si) і дефектів постійних коефіцієнтів ґраток в топології тільки підсилює цю нерівномірність розігріву. З врахуванням меншої теплопровідності GaAs в порівнянні з моно - Si все ж приводить до значно більш різкого вираження локалізованого розігріву буферного шару в структурі GaAs-ГПТШ. Таким чином структуру GaAs-ГПТШ слід розглядати як паралельно з'єднані теплоємність та тепловий опір R_T . Цикл роботи, який визначається діаграмою Δ , включаючи період імпульсу τ_1 , коли на структуру подається електрична потужність P ; та період τ_2 протягом якого структура охолоджується. Такий цикл розігріву та охолодження можна описати рівнянням:

$$P = C \frac{dT}{dt} + \frac{T}{R_T}, \quad T = \begin{cases} T_0 & \text{при } t = 0 \\ T_1 & \text{при } t = \tau \end{cases} \quad (5)$$

Розв'язок цього рівняння описується виразом:

$$T = PR_T(T_0 - PR_T) \exp(-t/\tau) \quad (5)$$

де $t = R_T C$ – теплова характеристика технологічного

епітаксійного шару;

А процес охолодження структури ГПТШ можна описати аналогічним виразом:

$$O = C \frac{dT}{dt} + \frac{T}{R_T}, T = \begin{cases} T_0 & \text{при } t = 0 \\ T & \text{при } t = \tau_2 \end{cases} \quad (5')$$

Проте, цьому охолоджуючому процесі зміна температури описується виразом:

$$T = T_1 \exp(-t/\tau), \quad (5'')$$

де, T_0 , T_1 , T_2 – початкові температури для кожного процесу.

Тоді у встановленому таким чином циклічному процесі через визначений час встановлюється максимальна та мінімальна температури, тобто певний їх перепад, які забезпечують рівність за період охолодження теплом та теплом, що підводиться до структури GaAs-ГПТШ за період нагрівання. Із рівняння балансу потужності отримаємо ці значення максимальної і мінімальної температури, які виражаються як:

$$T_{max} = PR_r \frac{1 - \exp(-\tau_2/\tau)}{1 - \exp(-\Delta/\tau)},$$

$$T_{min} = PR_r \frac{\exp(-\tau_1/\tau) - \exp(-\Delta/\tau)}{1 - \exp(-\Delta/\tau)}, \quad (6)$$

де PR_r – максимально можлива температура в даній гетерогенній системі при $\tau_1 \rightarrow \infty$. Такий розрахунок виконаний для неперервної послідовності розігрівних імпульсів. Найбільший перепад температури створює буферний Ge-Si-шар. Для мінімізації такого переходу були досліджені формуванні цього шару як процесом епітаксії, так і багатозарядної іонної імплантації германію (Ge^{++}). Цей перепад температури може бути різним для нормально відкритого і нормально закритого GaAs-ГПТШ.

Таким чином, ми бачимо, що вивід тепла від тестової транзисторної структури після закінчення розігрівної послідовності імпульсів по тепловому тракту найбільш повно описується набором експонент перехідного теплового процесу із відповідними тепловими постійними t_i .

Для аналізу режиму вимірювання R_T в GaAs-ГПТШ в першому наближенні може бути прийнята одинична експонента з $\tau_i = \tau_{min}$. Аналітична оцінка такого процесу, яка проведена вище в процесі розігрів-охолодження дає величину $\tau_i \approx 5$ мкс, тобто при величині першого налаштованого строб-імпульсу від заднього фронту розігрівного імпульсу $t_{31} = 0,5$ мкс зміна температури в буферному шарі може складати 25 – 30 % для ідеальної структури (бездефектної), а в реальній 35 – 40 %.

Оригінальність даного методу є введення другого стробуючого імпульсу, який дає можливість ввести поправку на зменшення температури активної зони GaAs-ГПТШ і таким чином оцінити істинну температуру буферного шару для комплементарної пари ГПТШ в момент включення нагрівного імпульсу:

$$T_0 = T_1 \exp\left(\frac{\tau_{31}}{\tau_{32} - \tau_{31}} \ln \frac{T_1}{T_2}\right) = T_1 K_T, \quad (7)$$

де T_1 і T_2 - температура транзисторної GaAs-ГПТШ структури, які виміряні із затримано τ_{31} і τ_{32} рис. 3, б, відповідно.

Параметри вимірювача теплового опору R_T , на якому виконується електрофізичне діагностування

GaAs-ГПТШ на Si- підкладці є наступні:

1). Діапазон напруг розігрівуючої потужності при струмі $0,5 A - (0-20) \pm 1 V$;

2). Діапазон напруги зміщення позитивної і негативної полярності для нормально відкритого та нормально закритого ГПТШ – $(0 - 10) V$;

3). Діапазон вимірювання приросту термочутливого параметра – $(0 - 1000) \pm 1 \% mV$;

4). Діапазон термостатування – $(-60 + 150) \pm 1^\circ C$.

На рис. 4 а, б подані результати електрофізичного діагностування на тепловому опорі комплементарних структур GaAs-ГПТШ на Si- підкладках, де формування буферного шару здійснювалось епітаксійним осадженням моношару германію. Як бачимо величина часової кореляції K_T знаходилась в досить добрій відмінності із попередньо обчисленим значенням $K_{T_{розрах}} = 1,26$; як і очікувалось в реальних структурах величина K_T приймає значення 1,34 і 1,37.

Висновки

Запропоновано технології формування комплементарних GaAs-ГПТШ на монокремнієвих підкладках з використанням буферного шару Ge-Si між GaAs і Si-підкладкою.

Наведено результати досліджень буферного шару Ge-Si для забезпечення вирівнювання постійних кристалічних ґраток між епітаксійним GaAs та монокремнієвою підкладкою з використанням як процесу епітаксійного осадження шару Ge-Si, так і багатозарядної імплантації іонів германію (Ge^{++}) у монокремній.

Розроблено спеціальний тестовий вимірювач теплового опору для польових ГПТШ та відповідна методологія, що дозволяє проводити електрофізичне діагностування якості формування буферного шару в комплементарних структурах GaAs-ГПТШ на Si- підкладках.

Експериментально показано, що діагностику буферного шару за параметрами теплового опору в комплементарних структурах GaAs-ГПТШ на Si- підкладках, може бути впроваджена в серійне виробництво інтегральних приладів.

Розроблена методологія тестового діагностування структури ПТШ за параметрами теплового опору R_T може бути також використана і для діагностування польових транзисторів у корпусному виконанні з монтажем кристалу ІС в корпусі через евтектику або на стрічковий носій через електротеплопровідний клей чи дисперсні нікелеві прокладки.

Новосядлий С.П. – професор, д.т.н., професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

Бенько Т.Г. - аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

Когут І.Т. – професор, д.т.н., завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки.

- [1] С.П. Новосядлий, Суб- і наномікронна технологія структур ВІС (: Місто НВ, Івано-Франківськ, 2010).
- [2] С.П. Новосядлий, А.І. Терлецький, Діагностика субмікронних структур ВІС: монографія (Сімик, Івано-Франківськ, 2016).
- [3] Д.И. Закс, Параметры теплового режима полупроводниковых микросхем (Радио и связь, Москва, 1983).
- [4] С. Canali, F. Chiussi, G. Donzelli, E. Zanoni, Microelectronics Reliability 29(2), 117 (1986).
- [5] А. Л. Захаров, Е. И. Асвадунова, Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов (Радио и связь, Москва, 1989).
- [6] С.П. Новосядлий, Б.С. Дзундза, В.М. Грига, М.В. Котик, С.В. Новосядлий, В.І. Мандзюк, Східно-європейський журнал передових технологій 5/5/89, 26 (2017).
- [7] Ю.М. Калниболотский, Ю.В. Королев, Г.И. Богдан, В.С. Рогоза, Расчет и конструирование микросхем (Вища школа, Київ, 1983).
- [8] I.T. Kogut, V.I. Holota, A.A. Druzhinin, V.V. Dovhiy, Journal of Nanoresearch 39, 228 (2016). DOI: 10.4028/www.scientific.net/JNano R. 39.228.

S.P. Novosiadly, T.H. Benko, I.T. Kogut

Features of Electrophysical Diagnostics of Schottky Field Transistors Based on GaAs Epitaxial Layers on Silicon Substrates for Microsystem Applications

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, e-mail: igorkohut2202@gmail.com

In this paper, the structure of GaAs FET on a silicon substrate, suitable for local integration in the local SOI-technology and the method of its electrophysical diagnostics based on changes in the thermal resistance (R_T), is analyzed. It is known [3,4] that the thermal conductivity of GaAs is 3-4 times worse than silicon. To eliminate this disadvantage, the technology of forming high-speed GaAs-structures on the surface of the silicon substrate was proposed.

Keywords: gallium arsenide, FET, thermal resistance, electrophysical diagnosis.