

А. В. Івашук, В. І. Тимофєєв

**ВПЛИВ МОРФОЛОГІЇ
ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ НА НАДВИСОКОЧАСТОТНІ
ПАРАМЕТРИ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ**

Представлено результати теоретичних і експериментальних досліджень впливу морфології омичних контактів (ОК) на надвисокочастотні (НВЧ) параметри GaAs польових транзисторів з бар'єром Шоттки (ПТШ). Доведено, що основні НВЧ параметри польових транзисторів з бар'єром Шоттки залежать від морфології ОК. Показано, що запропонована секційна модель ПТШ для врахування неоднорідностей дає можливість із високим ступенем достовірності в широкому температурному діапазоні врахувати коефіцієнт підсилення за потужністю і шумовою температурою ПТШ, що підтверджується експериментальними результатами.

Розвиток НВЧ мікроелектроніки на GaAs і інших напівпровідникових сполуках A_3B_5 висуває нові вимоги до технології виготовлення приладів. Провідні фірми світу сьогодні вже серійно випускають прилади з елементами топології 0,15–0,20 мкм [1]. А деякі провідні лабораторії повідомляють про розробки НВЧ транзисторів з бар'єром Шоттки на гетероструктурах з довжиною затвора 0,05 мкм [2].

З підвищенням ступеня інтеграції монолітних інтегральних схем, а також з розширенням робочого частотного діапазону ПТШ в міліметрову область, що зменшує елементи їх топології до субмікронних розмірів, до ОК виставляються жорсткіші вимоги до питомого контактного опору ρ_k , теплової стабільності, радіаційної стійкості. Також ростуть вимоги до морфології поверхні контактів, однорідності розподілу електричних параметрів контактів по його площині. Цим зумовлена необхідність удосконалення технології ОК до GaAs, а також моделювання розмірних ефектів і фізико-топологічних неоднорідностей в ПТШ, зумовлених структурою самих контактів.

У наведеній роботі досліджувався вплив морфології ОК на НВЧ параметри ПТШ як безпосередньо вимірюванням основних параметрів, так і моделюванням фізико-топологічних неоднорідностей.

Експериментальні зразки

Транзистори виготовляли на епітаксійних структурах GaAs типу $n^+ - n - n_0^- - i$, вирощених газофазною епітаксією із металоорганічних сполук на напівізолюваній підкладці із буферним шаром. Товщини шарів і концентрації донорів у них наведено на рис. 1. Топологія стоку і витоку у вигляді ОК і затвора у вигляді бар'єрного контакту формувалася зривною літографією.

Конструкцію транзистора оптимізували на робочу частоту 12 ГГц. При цьому середнє значення довжини затвора було в межах 0,3 мкм, а ширина становила 200 мкм. Такі розміри реалізовували електронно-променевою літографією.

Прилади виготовляли двох типів. У транзисторів першого типу ОК витоку і стоку формували за серійною типовою технологією. Морфологія таких контактів після рекристалізації мала розмір зерен $\sim 1,0 \div 1,5$ мкм. По краю контакта спостерігалася мікрокоалесценція, стягування розплаву сягало $\sim 0,3 \div 0,5$ мкм. Слід зауважити, що при неоптимізованих технологічних процесах розмір зерен може сягати і ~ 3 мкм, а

© А. В. Івашук, В. І. Тимофєєв, 2000

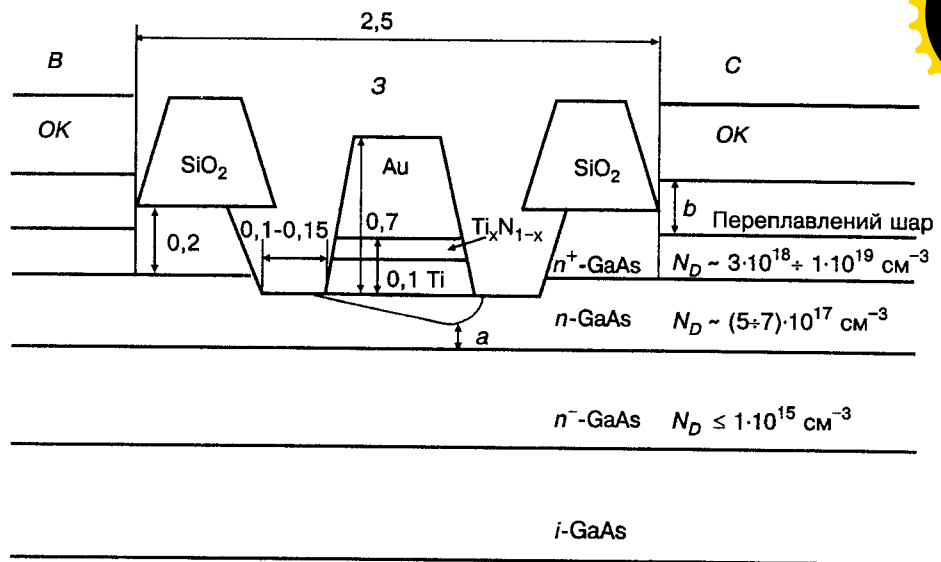


Рис. 1. Схематичне зображення розтину транзистора поперек затвору (розміри у мікрометрах)

мікрокоалесценція може поглиблюватися до $\sim 1,5$ мкм. У приладах другого типу ОК витоків і стоків формувалися за удосконаленою технологією, наприклад за технологією, описаною в праці [3], в результаті чого вдалося досягти морфології контактів, близької до ідеальної, при цьому розмір зерен не перевищував $\sim 0,1$ мкм.

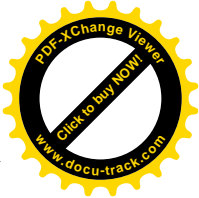
Секційна модель ПТШ для врахування неоднорідностей

Запропонована модель дозволяє досліджувати вплив неоднорідностей структури транзистора, що виникають як закономірні наслідки особливостей технологічних процесів і в результаті технологічних похибок при його виготовленні, на шумові та підсилювальні характеристики.

В основі секційної моделі є дискретизація структури ПТШ вздовж ширини затвору W . Кожен із n елементарних транзисторів завширшки ΔW має індивідуальний набір геометричних параметрів. Такими параметрами будуть: товщина епітаксійного шару, довжина затвору, міжелектродні відстані витік—затвор і затвор—стік, товщина шару металізації затвору. Вплив цих неоднорідностей на НВЧ параметри ПТШ детально досліджувався у працях [4–6].

У даній роботі досліджується вплив на параметри приладу неоднорідностей опору витоків і стоків, зумовлених різним питомим контактним опором і глибиною проплавлення ОК, що визначається морфологією, в елементарних транзисторах. Принциповою відмінністю при моделюванні неоднорідностей субмікронних структур у даній роботі від попередніх є моделювання саме пасивних областей ПТШ при фіксованих параметрах в активній області.

Транзистор завширшки ΔW має вигляд еквівалентного чотириполюсника, який описується малосигнальною моделлю із зосередженими параметрами [7]. Для розрахунку схемних параметрів може використовуватися фізико-топологічна модель, або модель, яка дозволяє враховувати нестационарні ефекти [8].



Параметри чотириполюсника у вигляді матриці провідності і матриці розсіювання розраховуються відомими методами аналізу електронних схем [9]. Очевидно, що повна структура транзистора являє собою ланцюжок паралельно з'єднаних чотириполюсників. Шумові параметри окремих секцій і транзистора у цілому моделювалися на основі матриці спектральних щільностей потужності шумів (τ -матриці) за умови адитивності шумів структури та припущення відсутності кореляції між шумами окремих секцій. Параметри, що характеризують неоднорідності кожної секції, задаються детермінованою функцією, якщо відомий закон їх зміни вздовж ширини затвору, або як випадкові величини методом Монте-Карло.

Продовженість вибірки випадкових чисел за заданим законом розподілу визначається кількістю розбиття структури транзистора, тобто кількістю секцій. Результуюча матриця провідності ланцюжка являє собою суму матриць провідності елементарних секцій. Сумарна Y -матриця за відомим співвідношенням перераховується в матрицю розсіювання [10]. Такий підхід реалізовано в програмі моделювання ПТШ із врахуванням топологічних неоднорідностей за алгоритмом, наведеним у праці [4].

Як приклад для розрахунків досліджувалися структури серійних ПТШ з такими параметрами: $L_{\text{вз}} = 0,8 \div 3,8$ мкм — відстань витік—затвор; $L_z = 0,3$ мкм — середнє значення довжини затвору; $L_{\text{зс}} = 0,8 \div 3,8$ мкм — відстань затвор—стік; $h = 0,6$ мкм — висота металізації затвора; $a = 0,11$ мкм — середнє значення товщини каналу; $\rho_k = (1,10^{-4} \div 1,10^{-7})$ Ом · см² — питомий контактний опір ОК; $b = 0,1 \div 0,3$ мкм — глибина проплавлення контактів. Решту необхідних для розрахунків фізико-топологічних параметрів наведено на рис. 1.

Вибраний значний розкид величин $L_{\text{вз}}$ і $L_{\text{зс}}$ пояснюється тим, що за умов неоптимізованої технології формування ОК розмір окремих зерен, рекристалізованих із розплаву, може сягати 3 мкм, як зазначалося вище. В результаті опір з боку як витоку R_s , так і стоку R_d може зростати більше ніж на порядок.

Кількість секцій вибиралась таким чином, щоб ширина кожної дорівнювала 2 мкм, тобто ланцюжок складався із 100 елементарних транзисторів.

Результати досліджень

На рис. 2 наведено результати розрахунків коефіцієнта підсилення за потужністю $K_{y,p}$ і температури шуму $T_{\text{ш}}$ ПТШ на частоті 12 ГГц без врахування неоднорідностей і з врахуванням їх із зазначеною вище дисперсією, а також результати вимірювань середньостатистичних значень цих параметрів на транзисторах, у яких стік і витік у вигляді ОК сформовані за типовою серійною технологією і за поліпшеною технологією, де розміри рекристалізованих зерен не перевищують 0,1 мкм.

Із рис. 2 видно, що $K_{y,p}$ зменшується на 0,8 дБ, а $T_{\text{ш}}$ зростає на 23 К, якщо використати запропоновану модель і врахувати флуктуації в пасивних областях ПТШ з наведеною вище дисперсією параметрів.

Ці розрахунки значною мірою збігаються з результатами НВЧ вимірювань транзисторів на робочій частоті 12 ГГц. Так, для транзисторів з поліпшеною морфологією спостерігається збільшення $K_{y,p}$ на 0,6 дБ і зменшення $T_{\text{ш}}$ на 13 К при $T_{\text{ф}} = 100$ К і на 10 К при $T_{\text{ф}} = 340$ К відповідно, де $T_{\text{ф}}$ — температура, при якій проводилися вимірювання НВЧ параметрів.

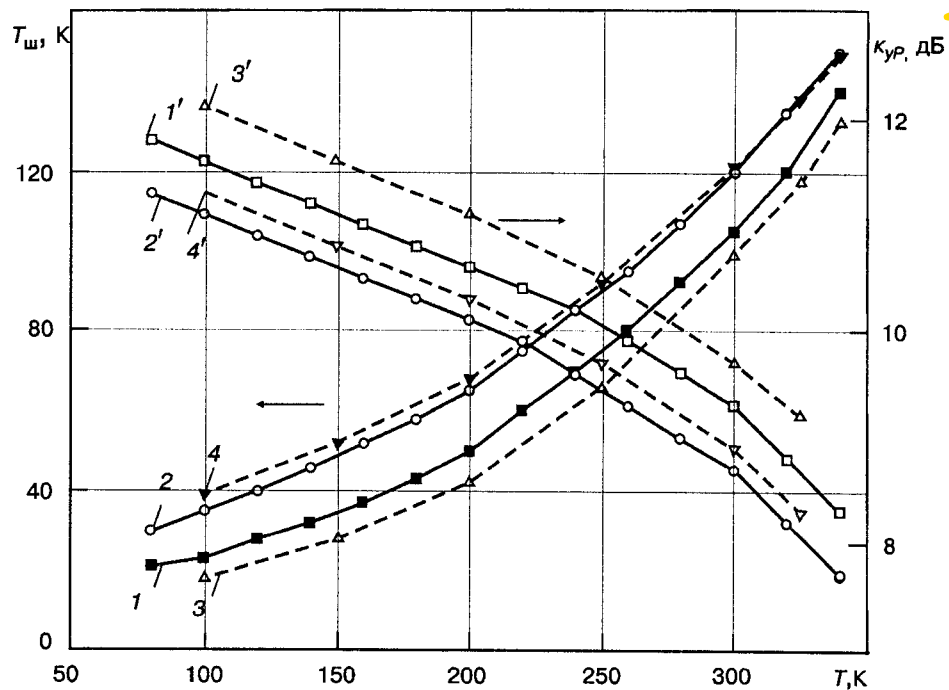
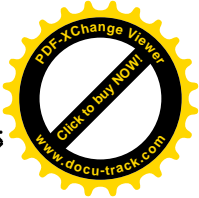


Рис. 2. Температурні залежності K_{yP} і $T_{ш}$ ПТШ на частоті 12 ГГц:

1, 1' – ПТШ із поліпшеною морфологією ОК; 2, 2' – серійний ПТШ, виготовлений за серійною технологією; 3, 3' – розраховані параметри моделі ПТШ без врахування неоднорідностей; 4, 4' – із врахуванням неоднорідностей

Слід зауважити, що розраховані параметри ПТШ згідно з запропонованою моделлю без врахування впливу неоднорідностей кращі, ніж у реального транзистора. Це легко пояснюється тим, що навіть при максимально удосконаленій технології в реальних приладах вплив неоднорідностей буде мати місце. Крім цього, при удосконаленій технології ОК на передній план знову виходить вплив фізико-топологічних неоднорідностей в активній області ПТШ.

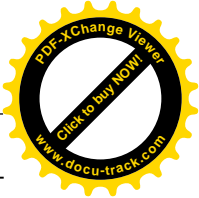
Проведені дослідження також показують, що із зниженням температури від 300 до 80 К $T_{ш}$ зменшується в ~ 4 рази для типових транзисторів і в ~ 5 раз для транзисторів із поліпшеною морфологією стоку і витоку і досягає менше 20 К. При цьому величина K_{yP} збільшується на $\sim 2,5$ дБ. Аналогічний характер температурних залежностей K_{yP} і $T_{ш}$ отримано моделюванням.

Значною мірою це можна пояснити тим, що в ПТШ із поліпшеною морфологією ОК при охолодженні за рахунок зменшення впливу термопольової емісії ρ_k буде мати менший вплив на параметри приладу.

Висновки

Результати досліджень дають можливість зробити такі висновки:

- Морфологія ОК суттєво впливає на основні НВЧ параметри польових транзисторів з бар'єром Шоттки.
- Запропонована секційна модель ПТШ для врахування неоднорідностей дає можливість із високим ступенем достовірності в широкому температурному діапазоні вирахувати коефіцієнт підсилення за потуж-



ністю і шумовою температурою ПТШ, що підтверджується експериментальними результатами.

• ПТШ із поліпшеною морфологією ОК мають кращу динаміку росту $K_{y,p}$ і зниження $T_{ш}$ в температурному діапазоні 300—80 К.

1. *Microwave Semiconductor Data Book*. — Tokyo: Published by Fujitsu, 1998. — P. 90—120.
2. *Enoki T.* InP-based HEMT ICs for ultrahigh-speed optical communication systems // 21 st Workshop on compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. — Schevevingen, The Nertherlands. — May 25—28, 1997. — P. 99—104.
3. *Івашук А. В.* Формування омичних контактів з одночасним очищенням поверхні арсеніду галію і її легуванням атомами германію // НТУ “КПІ”. Наук. Вісті. — 2000. — Вып. 2. — С. 5—8.
4. *Москалюк В. А., Тимофеев В. И.* Секционированная модель полевого СВЧ транзистора, учитывающая распределенные эффекты // Автоматизация проектирования в электронике: Респ. межвед. науч.-техн. сб. — Киев: Техніка. — 1986. — Вып. 33. — С. 93—97.
5. *Тимофеев В. И., Андрица В. В.* Шумы полевого СВЧ транзистора с топологическими неоднородностями // Вестник Киев. политехн. ин-та. Радиоэлектроника. — 1987. — Вып. 23. — С. 1671—1708.
6. *Москалюк В. А., Тимофеев В. И.* Моделирование малозумящего режима субмикронного ПТШ // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1993. — 36, № 3/4. — С. 57—63.
7. *Москалюк В. А., Тимофеев В. И.* Моделирование схемных параметров полевого СВЧ транзистора // Автоматизация проектирования в электронике: Респ. межвед. науч.-техн. сб. — Киев: Техніка. — 1987. — Вып. 36. — С. 3—11.
8. *Минаков В. В., Шарай И. В., Москалюк В. А., Тимофеев В. И.* Математическая модель полевого СВЧ-транзистора с барьером Шоттки // Вестник Киев. политехн. ин-та. Радиоэлектроника. — 1981. — Вып. 18. — С. 95—98.
9. *Сигорский В. П., Петренко А. И.* Алгоритм анализа электронных схем. — М.: Сов. радио. — 1976. — 608 с.
10. *Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р.* Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. — М.: Связь, 1971. — 388 с.

Науково-виробниче підприємство “Сатурн”, Київ
 Національний технічний університет України
 “Київський політехнічний інститут”, Київ

Одержано 25.05.2000

УДК 621.382:535.216

**Н. Н. Богуславская, Е. Ф. Венгер,
 Ю. А. Пасечник**

**ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
 ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ СЛОЕВ
 КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ
 СПЕКТРОСКОПИИ ИК ОТРАЖЕНИЯ**

Разработана методика измерения электрофизических параметров тонких монокристаллических слоев карбида кремния на монокристаллах карбида кремния методами ИК спектроскопии. Дисперсионный анализ спектров отражения позволил определить частоты и коэффициенты затухания фононов и плазмонов в слоях карбида кремния, которые изменяются в зависимости от технологии получения и обработки слоев карбида кремния.

Для оптоэлектроники и микроэлектронной техники весьма важной является задача разработки методов измерения концентрации и подвижности носителей зарядов в тонких слоях полупроводников. К числу неразрушающих методов относится спектрофотометрическое измерение концентрации и подвижности носителей заряда по зависимости коэффициента отражения от частоты падающего на образец излучения в области его “плазменной частоты” [1].

© Н. Н. Богуславская, Е. Ф. Венгер, Ю. А. Пасечник, 2000