

С.П. Новосядлий, А.І. Терлецький, О.Б. Фрик

Формування КМОН схем на GaAs із самосуміщеними нітридними та силіцидними затворами

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ,

Розглянуто особливості технологічних процесів формування n- та р-канальних польових транзисторів Шотткі на р-GaAs із самосуміщеним затвором на основі нітриду або силіциду вольфраму, які можуть бути використані для створення швидкодіючих комплементарних логічних схем. Описано низькотемпературну технологію реактивного осадження нітриду вольфраму методом ВЧ-магнетронного розпилення вольфрамової мішені в азотно-аргоновій плазмі.

Ключові слова: арсенід галію, польові транзистори Шотткі, нітрид вольфраму, силіцид вольфраму.

Стаття постуила до редакції 07.12.2014; прийнята до друку 15.03.2015.

Вступ

Схемотехніка сучасних інтегральних логічних схем на GaAs базується, здебільшого, на використанні n-канальних польових транзисторів із затвором Шотткі (ПТШ). У разі переходу до комплементарних інтегральних схем на ПТШ однією з основних проблем є доволі низька висота бар'єру Шотткі (< 0,5 eV) на арсеніді галію р-типу. Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання нітридних або силіцидних сполук вольфраму для формування затворів заданої товщини та складу [1-5].

В даній статті висвітлено особливості формування швидкодіючих комплементарних логічних схем на р-GaAs із самосуміщеним затвором на основі нітриду чи силіциду вольфраму, отриманих за допомогою горизонтального реактора пониженого тиску "Ізотрон-4" та устаткування ВЧ-магнетронного розпилення "Ораторія-5". Описана технологія може використовуватись також і для формування контакту Шотткі в n-канальному ПТШ [1].

Оскільки в процесі виготовлення самосуміщених ПТШ тугоплавкий матеріал затвору використовується також і в якості маски під час проведення багатозарядної іонної імплантації, то контакт Шотткі повинен витримувати наступну високотемпературну термообробку, необхідну для активації імплантованої домішки. В зв'язку з цим, також проведено дослідження технологічної дії високотемпературного фотонного та резистивного нагрівання на висоту бар'єру Шотткі, сформованого контактом нітриду (силіциду) вольфраму (WN_x , WSi_x) до р-GaAs.

I. Технологія формування арсенідгалієвих комплементарних структур на основі ПТШ із нітридним WN_x -затвором.

Самосуміщені структури р-канальних арсенідгалієвих ПТШ формувались згідно маршруту, поданого на рис. 1.

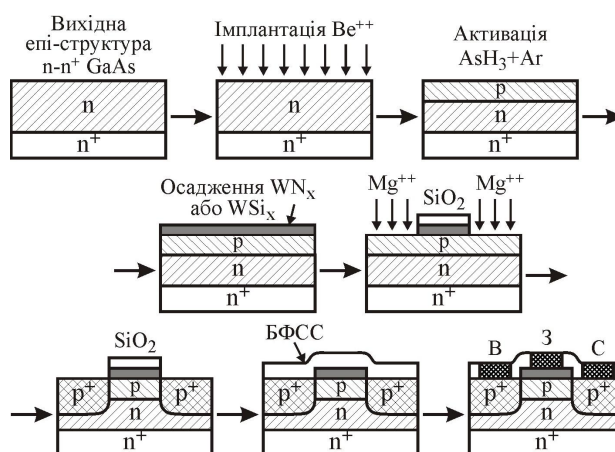


Рис. 1. Технологічний маршрут формування самосуміщених транзисторних структур ПТШ з каналом р-типу і затвором на основі WN_x або WSi_x .

Для експериментальних досліджень було вибрано епітаксійні GaAs структури n-n⁺-типу, леговані Si з концентрацією електронів $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ та товщиною епішару $2,5 \div 3 \text{ мкм}$. Після хімічної

обробки в суміші Каро ($H_2SO_4 : H_2O_2 = 1 : 4$) проводилась багатозарядна імплантація Ve^{++} з енергією $30 \div 50$ кеВ та дозою $(5 \div 8) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, що дозволяла сформувати на поверхні таких епіструктур р-шар основного каналу товщиною $0,1 \div 0,15$ мкм. Активація домішки берилію проводилась в потоці Ar/AsH_3 без захисної маски впродовж $10 \div 20$ хв за $T = 800 \div 830$ °С. Дослідження, проведені із використанням тестових структур показали, що вказаний режим активації забезпечує степінь активації на рівні $75 \div 85\%$. Після чергової хімічної обробки в суміші Каро з наступним промиванням в деіонізованій воді і сушінням в азоті проводилось формування плівки нітриду вольфраму (WN_x) двома методами: газозфазним осадженням WN_x в реакторі пониженого тиску "Ізотрон-4" за $T = 620$ °С згідно з реакцією



та високочастотним (13,75 МГц) магнетронним реактивним розпиленням в аргонно-азотній (12% N_2) плазмі вольфрамової мішені на установці типу "Ораторія-5" чи "Ораторія-11". Другий метод є більш технологічним, оскільки забезпечує необхідну напівпровідникову чистоту та дозволяє корегувати швидкість осадження шляхом зміни концентрації аргону.

Товщина плівок нітриду чи силіциду вольфраму була вибрана в межах $10 \div 15$ нм, що визначається необхідною величиною порогової напруги бар'єру Шотткі. Діоди Шотткі були сформовані за допомогою висококонтрастної фотолітографії, яка супроводжувалась сухим травленням в CF_4/O_2 плівок WN_x та WSi_x . Для формування стік-витоківих областей структур ПТШ проводилась багатозарядна імплантація магнію (Mg^{++}) з енергією $80 \div 120$ кеВ та дозою $(1 \div 5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (на глибину $0,25$ мкм) з використанням маски із SiO_2 , нанесеної методом піролізу моносилану SiH_4 в атмосфері O_2 на установці "Ізотрон-3". Для захисту структур на поверхню GaAs-пластин наносилось борофосфоросилікатне скло товщиною $0,5 \div 0,6$ мкм шляхом динамічного пірогенного осадження в реакторі пониженого тиску за температури $250 \div 350$ °С упродовж $15 \div 25$ хв. Відпал з метою активації домішки магнію здійснювався за допомогою імпульсного фотонного устаткування "Імпульс-3" упродовж $4 \div 6$ с за температури, що перевищує 90% свого пікового значення (820 °С). Напилені контакти $Au-Zn-Au$ вплавились $10 \div 12$ хв за температури ≤ 400 °С.

Висоти бар'єрів Шотткі ϕ_B і діодного коефіцієнта η визначались на основі ВАХ та рівнянь термоелектронної емісії. Отримана залежність висоти бар'єра ϕ_B діодів Шотткі і коефіцієнта η від температури відпалу, проведеного після формування структур, подана на рис. 2.

Як можна побачити із рис. 2, висота бар'єру Шотткі суттєвим чином залежить від температури відпалу. Існує діапазон температур $620 \div 700$ °С, для яких бар'єр Шотткі як для р-GaAs, так і для n-GaAs лежить в межах $\phi_B = 0,68 \pm 0,02$ еВ при величині $\eta = 1,4 \pm 0,1$, що дозволяє формувати комплементарні

пари ПТШ на GaAs. Отримані результати підтверджують правильність вибраної технології, оскільки сума бар'єрів Шотткі для n- і р-канальних транзисторів є приблизно рівною ширині забороненої зони GaAs (1,42 еВ), що особливо важливо для побудови швидкодіючих комплементарних логічних схем.

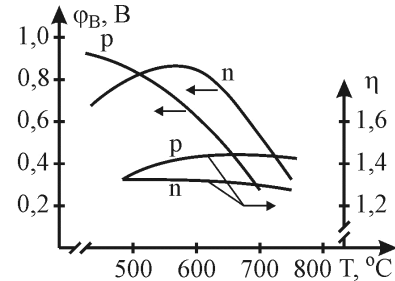


Рис. 2. Залежність висоти бар'єру ϕ_B і діодного коефіцієнта η від температури діодного відпалу.

Вимірювання ВАХ затворів ПТШ за допомогою структур тестового контролю з розміром 4×24 мкм показали, що висота бар'єра Шотткі для р-канальних ПТШ становить $0,685 \pm 0,025$ еВ, а діодний коефіцієнт η знаходиться на рівні $1,4 \pm 0,1$. Крім того також вимірювались основні параметри ПТШ, які описуються виразом $I_{DS} = k \cdot (U_G - U_T)^2$, де I_{DS} - струм насичення кола стік-витік; U_G - напруга, прикладена до затвору, U_T - порогова напруга. У разі довжини каналу затвору $1,4$ мкм порогова напруга становила -200 мВ, а для довжини $0,8$ мкм - сягала значення -75 мВ, що вказує на вплив ефекту короткого субмікронного каналу. Якщо розміри затвору $L \times W = 2 \times 24$ мкм, то коефіцієнт k становить $0,0088 \pm 0,012 \text{ mA/V}^2$, що в $20 \div 25$ раз менше величин k , отриманих для n-канальних ПТШ. Така різниця зумовлена різною рухливістю електронів і дірок, які визначалась на основі тестових структур-хіллотронів.

На рис. 3 показані ВАХ р-канальних ПТШ з нітридним вольфрамовим затвором WN_x розміром $L \times W = 2 \times 24$ мкм. Крутизна характеристики становила $4,2 \div 4,5 \text{ мСм/мм}$, порогова напруга $-U_T = -(200 \pm 50) \text{ мВ}$.

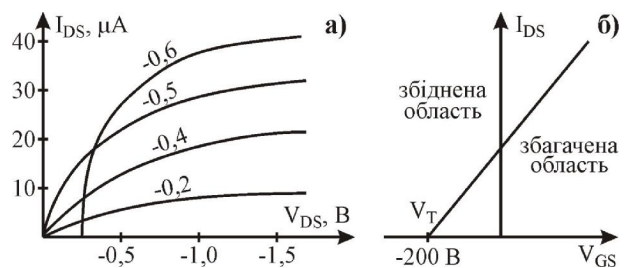


Рис. 3. Вольтамперні характеристики ПТШ: а) вихідні, б) передатна.

За допомогою тестових структур здійснювалось також моделювання роботи логічних елементів з використанням програми Spice, які демонструє рис. 4. Діоди на вході логічного елемента (в, г)

зміщують рівень вхідного сигналу, що дозволяє підвищити напругу живлення від величини -0,75 В до -1,5 В. Вентилі, подані на рис. 4, б, г є квазікомплементарними, оскільки в них р-ПТШ працюють в режимі збіднення. Результати моделювання подані на рис. 4, д, де продемонстрована залежність часу затримки від розсіюваної потужності логічного елементу. Найкращі характеристики за швидкодією займають вентиля варіанту б.

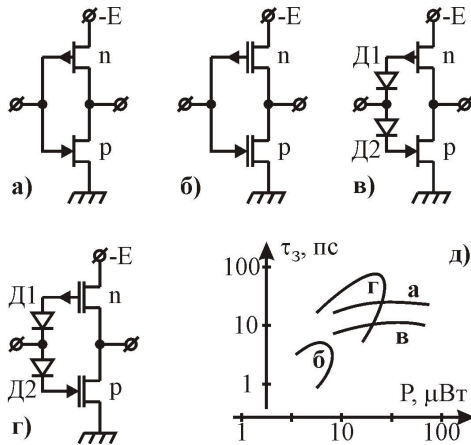


Рис. 4. Логічні схеми, сформовані на комплементарних ПТШ з діодами зміщення Д₁ та Д₂: а, в) збагаченого типу; б, г) збідненого типу; д) моделювання їхніх характеристик.

Таким чином, формування комплементарних або квазікомплементарних логічних елементів вимагає узгодження технологічних процесів формування n- та р-канальних ПТШ, що забезпечується технологією багатозарядного легування каналу, стік-витоків областей та активації імплантованих іонів з використанням фотонного відпалу.

II. Технологія осадження силіцидів вольфраму із газової фази в реакторі пониженого тиску.

Альтернативою нітридного затвору в арсенідгалієвій технології може бути силіцидний затвор [2, 6, 7, 8], що дозволяє зменшити не тільки порогову напругу польових транзисторів, але також майже на порядок опір багаторівневої розводки та вивідних контактів. Публікації стосовно дослідження силіцидів в арсенідгалієвій технології майже відсутні, тому розглянемо ряд власних результатів щодо закономірностей осадження шарів силіциду вольфраму WSi_x, кінетики їх утворення та впливу високотемпературного відпалу на склад і структуру осаджених шарів.

Для експериментів було вибрано низькотемпературний процес осадження силіциду вольфраму в реакторі пониженого тиску типу "Ізотрон-4". В такому реакторі дисиліцид вольфраму зазвичай

виросшують з швидкістю 100 ÷ 500 Å/хв за температури 350 ÷ 400 °С, тиску 0,2 мм.рт.ст., співвідношенні моносилану SiH₄ до WF₆, як 70:1. За температури від 300 до 350 °С швидкість росту не залежить від температури і становить 120 Å/хв. Крім того, швидкість росту прямо пропорційна швидкості потоку WF₆ (рис. 5, а).

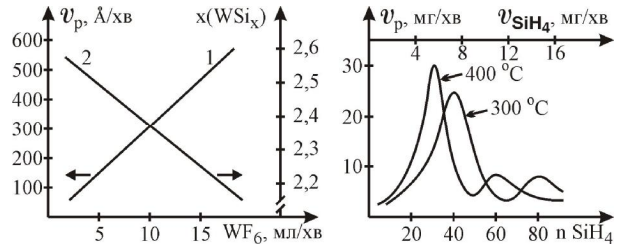


Рис. 5. Залежності: а) швидкості росту силіциду вольфраму WSi_x (1) і його складу (2) від швидкості потоку WF₆; 2) швидкості осадження шарів, як функції концентрації моносилану SiH₄.

Швидкість осадження силіциду вольфраму не залежить від температури за умови, що $n_{SiH_4} = \frac{V_{SiH_4}}{V_{SiH_4} + V_{WF_6}} < 10$. Крім того, склад плівок також не залежить від температури, якщо відносна концентрація $n_{SiH_4} < 40$. Тому було вибрано значення n_{SiH_4} рівне 25 ± 5 .

Слід відзначити, що механізм взаємодії WF₆ з SiH₄ є ще не достатньо вивченим. А розуміння механізму цієї взаємодії необхідне для керування процесом осадження під час формування силіциду вольфраму заданого складу. Проведені дослідження показують, що осадження, наприклад плівок дисиліциду вольфраму, може відбуватися за реакцією:



яка передбачає такий механізм розкладу і взаємодії моносилану: $2SiH_4 = 2Si + 8H$, $WF_6 + 6H = W + 6HF$, $W + 2Si = WSi_2$.

Елементний і фазовий склад отриманих плівок WSi_x досліджувались за допомогою зворотного резерфордівського розсіювання і дифракції рентгенівського випромінювання на плівки товщиною 0,25 ÷ 0,5 мкм. Дослідженням встановлено, що вміст кремнію в плівці WSi_x (x = 2,2 ÷ 2,7) залежить від швидкості потоку моносилану та його концентрації, при чому оптимальною є концентрація 20 ÷ 25%.

Питомий опір у осаджених таким чином плівках WSi_x з підшаром полі-Si становив 40 ÷ 48 мкОм·см, а з нітридом кремнію – 60 ÷ 65 мкОм·см. Дослідження плівок методом електронної мікроскопії показало, що осаджені за температури 400 °С плівки мають мікрокристалічну структуру з розміром зерна 20 ÷ 30 Å (2 ÷ 3 нм), однак дифракційних піків рентгенівського випромінювання CuKα не було виявлено.

Після фотонного відпалу (5 с) вказаних плівок вже за температури 500 °С вони стають полікристалічними із гексагональною структурою. Підвищення температури відпалу призводить до крупнозернистої структури плівки, а за температури 620 °С (10 с) відбувається фазовий перехід від

гексагональної модифікації в тетрагональну. Слід відзначити, що така технологія забезпечує високу рівномірність осадження ($\Delta\%$) та конформність заповнення канавок ($> 95\%$), що дозволяє ефективно використовувати її для формування планарних структур ІС на GaAs.

Термомеханічні напруження (σ) в осаджених плівках WSi_x зменшується від $7 \cdot 10^9$ до $3 \cdot 10^9$ дин/см у разі збільшення витрат моносилану від 20 до 120 мл/хв. Співвідношення Si та W при цьому є практично незмінним. Ефект зменшення напружень в осаджених плівках зі збільшенням вмісту в них Si чітко прослідковується у випадку підвищення температури вирощування силіциду, а саме: підвищення температури від 275 до 925 °C призводить до збагачення півки WSi_x кремнієм (x зростає від 2 до 4) в той час, як напруження зменшується від $9 \cdot 10^9$ до $1 \cdot 10^9$ дин/см (майже на порядок).

На рис. 6 показана залежність механічних напружень в півці WSi_x від стехіометричного складу x та температури відпалу. Власне ці залежності визначають адгезію та величину контактного опору.

Структури ПТШ із силіцидним затвором формувались за аналогічним технологічним маршрутом, що й ПТШ з нітридним затвором. Силіцид вольфраму травився в плазмі елегазу SF_6 . Величина бар'єру Шоттки для ПТШ та діодний коефіцієнт становили $\phi_B = 0,71 \pm 0,01$ eВ і $n = 1,25 \pm 0,1$ для n- і р-канальних ПТШ, відповідно. Перевага силіцидного затвору перед нітридним полягає в одночасному зниженні контактного опору до величини $(5 \div 6) \cdot 10^{-6}$ Ом·см та порогової напруги р-канальних ПТШ до величини $(150 \div 160)$ мВ (при довжині затвора $L = 1,2$ мкм).

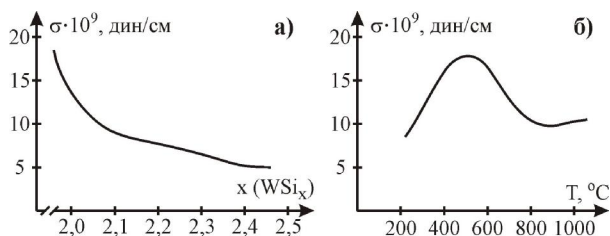


Рис. 6. Залежність механічних напружень півки WSi_x від: стехіометричного складу (а) та температури (б).

В цій роботі також досліджувались профілі розподілу арсену, імплантованого в WSi_x з метою його підлегування з енергіями 40, 80, 100 keВ та дозою $1 \cdot 10^{15} \div 1 \cdot 10^{16}$ см⁻². Силіцид вольфраму товщиною 80 нм осаджували із моносилану SiH_4 (20%) та гексафториду вольфраму WF_6 за температури 370 °C і тиску в реакторі РПТ 0,2 мм.рт.ст. При цьому швидкості потоків для моносилану і гексафториду вольфраму становили 1500 і 15 мл/хв, відповідно. Після багатозарядної імплантації здійснювався фотонний відпал за температури 850 °C (8 с). Профілі розподілу арсену в силіциді вольфраму, отримані зі спектрів зворотного

резерфордівського розсіювання, подані на рис. 7. Це вказує на те, що у випадку формування стіквитокових областей необхідно додатково формувати маску із фоторезисту чи SiO_2 , а у разі енергії іонів 20 keВ і дозі $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² він може слугувати маскою.

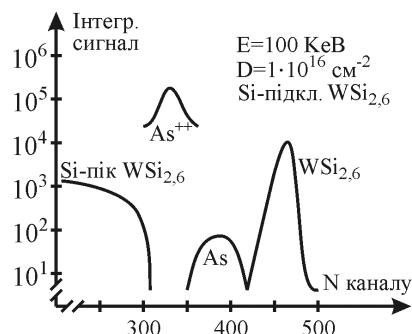


Рис. 7. Спектр зворотного резерфордівського (1,5 MeВ He^+) розсіювання плівок $WSi_{2,6}$ після імплантації As^{++} .

В плівках WSi_x також присутні H_2 та F_2 . Методом спектроскопії вторинних іонів досліджено залежність розподілу H_2 і F_2 за глибиною від температури фотонного відпалу. Було встановлено, що їхні концентрації змінюються від величини $1,5 \cdot 10^{20}$ до $8 \cdot 10^{18}$ см⁻³, а оптимальною температурою відпалу слід вважати $830 \div 860$ °C ($5 \div 12$ с).

Висновки.

1. Досліджено технології формування р-контактних ПТШ, які дозволяють реалізувати високо-швидкісні комплементарні структури ІС на арсеніді галію.
2. Для збільшення швидкодії логічних схем на комплементарних ПТШ розроблена низькотемпературна технологія самосуміщення затвору на основі нітриду та силіциду вольфраму.
3. Ретроградні низькоомні контакти до стіквитокових областей арсенідгалієвих комплементарних структур формуються багатозарядною іонною імплантацією кремнію для p^+ -областей та магнію до p^+ -області.
4. Вперше реалізована низькотемпературна технологія реактивного осадження нітриду вольфраму методом ВЧ-магнетронного розпилення вольфрамової мішені в азотно-аргоновій плазмі.
5. Силіцидна технологія формування затворів ПТШ на арсеніді галію дозволяє формувати високоякісні комплементарні структури для ВІС з малою величиною порогових напруг $U_T = \pm(150 \div 200)$ мВ.

Новосядлий С.П. – професор, доктор технічних наук;
Терлецький А.І. – доцент, кандидат фізико-математичних наук;
Фрик О.Б. – інженер кафедри.

- [1] Новосядлий С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. - Івано-Франківськ : Сімик. - 2003. – 370 с.
- [2] Новосядлий С. П. Суб- і наномікронна технологія структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. - Івано-Франківськ : Місто НВ. - 2010. - 455 с.
- [3] Новосядлий С. П. Моделювання субмікронної та нанотехнологій на основі тестових структур [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук, С. М. Вертепний // Східно-Європейський журнал новітніх технологій. - 2009. - № 1(7). - С. 26-39.
- [4] Новосядлий С. П. Сучасні твердофазні технологічні процеси в субмікронній технології ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий, А. І. Терлецький, О. Б. Фрик // Східно-Європейський журнал новітніх технологій. - 2010. - 3/7(45). - С. 52-60.
- [5] Новосядлий С. П. Польові транзистори з бар'єром Шотткі (ПТЗШ) на основі напівізолюючих підкладок GaAs, імплантованих ретроградно багатозарядними іонами селену [Текст] / С. П. Новосядлий, Т. Р. Сорохтей // Металофізика і новітні технології. - 2011. - № 2(4). - С. 17-19.
- [6] Новосядлий С. П. 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. - № 2(13). - С. 416-428.
- [7] Новосядлий С. П. Фізико-технологічні аспекти багатозарядної імплантації арсенід галію в структурах приладів і схем [Текст] / С. П. Новосядлий, Л. В. Мельник, Т. П. Кіндрат // Східно-Європейський журнал новітніх технологій. - 2013. - №5/5(65). - С. 29-36.
- [8] Новосядлий С. П. Технологія епітаксійного формування силіцидів для підвищення швидкодії ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий, А. І. Терлецький, О. Б. Фрик // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки". - 24-26 жовтня 2013. - Чернівці. - Україна. - С. 167.

S.P. Novosjadly, A.I. Terletsky, O.B. Fryk

Formation CMOS Schemes on GaAs with Self-Aligned Nitride and Silicide Gates.

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine

Advanced integrated logic circuits on GaAs are mainly based on the using of n-channel field-effect transistors with gate Schottky (MESFET). To create the complementary MESFET integrated circuits the main problem is quite small Schottky barrier height ($< 0,5$ eV) on p-type gallium arsenide. One way to solve this problem is to use a nitride or silicide tungsten compounds to form gates given the thickness and composition.

This paper highlights the features of the formation of complementary high-speed logic circuits on the p-GaAs with self-aligned gate based on nitride or silicide of tungsten obtained by reduced pressure horizontal reactor "Izotron 4" and of RF magnetron sputtering equipment "Oratorio-5." This technology can also be used to form a Schottky contact to n-channel MESFET.

Since the manufacturing process of MESFET self-aligned gate provides using refractory gate material as a mask for the multiply ion implantation, the Schottky contact must withstand subsequent high-temperature heat treatment required to activate implanted impurities. In this connection, the action of high-temperature photonic and resistive heating on the barrier height of Schottky contact formed by nitride (silicide) tungsten (WNx, WSix) GaAs was also studied.