

С.П. Новосядлий, В.І. Мандзюк, Н.Т. Гуменюк, І.З. Гук

Особливості формування НВЧ арсенід-галієвих субмікронних структур великих інтегральних схем

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна, e-mail: nasarhumenjuk@gmail.com

У роботі розглянуто особливості технологічних процесів формування субмікронних польових транзисторів Шотткі з використанням арсенід-галієвої технології, а саме технологію формування польових транзисторів Шотткі із самосуміщеним затвором на основі нітриду або силіциду вольфраму. Розроблено високоефективну технологію формування капсулюючих шарів нітридних плівок AlN та BN високочастотним магнетронним розпиленням відповідної мішені в азотній плазмі для реалізації МДН-транзисторів на GaAs.

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

Стаття постуила до редакції 20.02.2018; прийнята до друку 15.06.2018.

Вступ

На сьогодні польові транзистори Шотткі (ПТШ) є основними активними елементами GaAs мікросхем НВЧ діапазону. Головна мета їх розробки полягає у підвищенні швидкодії. Цифрові GaAs IC/VIC відносяться до класу надшвидкісних, а аналогові, як правило, призначені для роботи в НВЧ-діапазоні. При розробці ПТШ та мікросхем на їх основі використовуються наступні переваги GaAs порівняно з монокремнієм: більш високі значення рухливості електронів в слабких електричних полях та швидкості насичення в сильних полях, більша ширина забороненої зони, і як наслідок, значно більш високий питомий опір нелегованого арсеніду галію, що дозволяє формувати напівізольюючі (локальні і міжшарові) шари в структурах VIC. Проте, GaAs уступає монокремнію за рядом параметрів, які є важливими для формування мікросхем. Зокрема, висока густина поверхневих станів в МДН-структурах арсенід галію сьогодні не дозволяє на його основі формувати високоякісні МДН-транзистори та мікросхеми, низька рухливість дірок і малий час заряду носіїв утруднює розробку біполярних комплементарних транзисторів. У зв'язку з цим оптимальним активним елементом, який дозволяє реалізувати в структурах VIC/IC переваги GaAs, порівняно з монокремнієм, є саме польовий

транзистор із бар'єром метал-напівпровідник.

I. Особливості технології формування структури ПТШ

Одна із перших технологій формування структур арсенід-галієвих ПТШ подана на рис. 1.

Сам транзистор формується на підкладці 1 із негативного арсеніду галію, який має слабо вироджену провідність р-типу. Для її зниження при вирощуванні монокристалів GaAs методом Чохральського вводять в невеликих кількостях атоми хрому, який компенсує дію акцепторів. GaAs підкладки, виготовлені із такого монокристалічного злитку, мають підвищений статичний опір і їх називають напівізольюючими.

Тут біля поверхні підкладки 1 методом іонного легування формують сильнолеговані області 2 витоку і стоку n^+ -типу, і більш тонкий шар каналу 3 n -типу. Типова товщина шару 3 $d_0 = 0,1-0,2$ мкм, а концентрація донорів в каналі $N_{dk} = (1-2) \cdot 10^{17}$ см⁻³. У ролі легуючих домішок донорів зазвичай використовують іони кремнію (Si⁺), селену (Se⁺), сірки (S⁺). На поверхні підкладки над шаром 3 наносять металеві електроди 4 затвору, наприклад, у вигляді сплаву Ti-W. Металеві електроди 5, для яких використовують композицію золото-германій (AuGe-12), забезпечують контакти до витоку і стоку. На

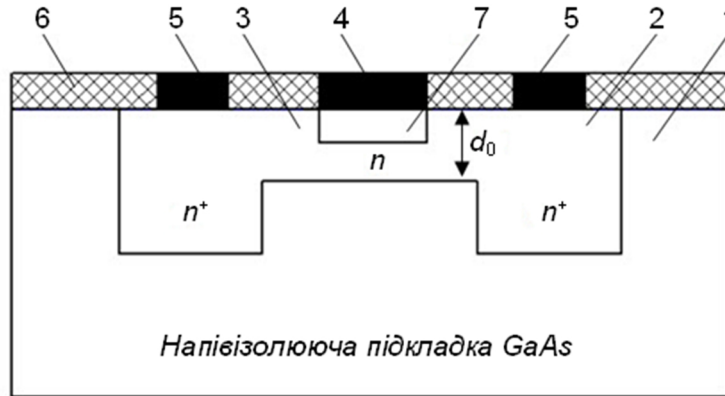


Рис. 1. Структура польового транзистора Шотткі.

поверхню підкладки, що не використовується, наносять шар діелектрика 6 (SiO_2). Металевий електрод затвору утворює із шаром 3 випрямляючий контакт (бар'єр Шотткі), типова рівноважна висота якого складає $\phi_{\delta} = 0,7-0,8$ В. Провідний канал між витоком і стоком розміщується в шарі 3 і обмежується зверху збідненою областю 7 бар'єру Шотткі, а знизу – підкладкою 1. Товщина провідного каналу є рівною товщині збідненої області 7. Типова відстань витік-стік $L = 1,3$ мкм, а довжина затвору – $0,5-1$ мкм. Принцип дії ПТШ полягає в наступному.

Між затвором і витоком подається керуюча напруга $U_{зв}$, а на стік – позитивна напруга $U_{се}$. При зміні керуючої напруги змінюється товщина збідненого шару 7 $L_{зб}(U_{зв})$, товщина провідного каналу $d_k(U_{зв}) = L_{зб}(U_{зв})$, його провідність та струм стоку. Якщо напруга на затворі рівна $U_{пор}$, то межа збідненого шару 7 вже досягає ізолюючої підкладки 1 (товщина каналу і струм стоку стають рівними нулю). Порогова напруга визначається з умови $L_{зб}(U_{пор}) = d_0$, тобто:

$$U_T = U_{пор} = j_{\delta} - \frac{q N_{dk} d_0^2}{2 e_0 e},$$

де ϕ_{δ} – рівноважна висота бар'єру Шотткі – контакту метал-напівпровідник, ϵ_0 – відносна діелектрична проникливість GaAs ($\epsilon_0 = 13,1$). Необхідна порогова напруга досягається вибором концентрації донорів в каналі та товщини шару 3. Наприклад, при $\phi_{\delta} = 0,8$ В, $N_{dk} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ і $d_0 = 0,2$ мкм, отримуємо $U_T = -2$ В. При малій товщині каналу d_0 початкова напруга може бути позитивною. Зокрема, при $d_0 = 0,1$ мкм з тією ж концентрацією донорів в шарі 3 $U_T = 0,08$ В. В арсенід-галієвих мікросхемах застосовують ПТШ, для яких порогова напруга $U_T = -2,5 \div +0,2$ В. Якщо $U_T < 0$, то при $U_{зв} = 0$ канал є провідним. Такий ПТШ називають нормально відкритим – він є аналогічний МДН-транзистору із вбудованим каналом. При $U_T > 0$ і $U_{зв} = 0$ канал перекривається шаром 7 і транзистор називають нормально закритим – він є аналогом МДН-транзистора з індукованим каналом. Як бачимо, змінюючи іонною імплантацією концентрацію донорної домішки в каналі ПТШ, можна формувати комплементарні ПТШ і будувати

на цій основі швидкісні цифрові ВІС, на порядок більш швидкодіючі, ніж на Si. Таким чином, змінюючи ретроградну багатозарядну імплантацію донорної домішки (Si^{++} , Se^{++} , S^{++}) каналу можна з великою точністю змінювати порогову напругу в межах від $-2,0$ до $+2,0$ В. У цьому й оригінальність арсенід-галієвої технології [1].

На рис. 2 представлені стік-затворні характеристики нормально відкритого (збагаченого) 1 і нормально закритого (збідненого) 2 ПТШ.

Для нормально відкритого ПТШ керуюча напруга затвору, при якій протікає струм стоку, може змінюватись від негативних напруг ($-2,5$ В) до позитивних ($+0,6$ В). Багатозарядною комбінованою імплантацією легких і важких іонів можна збільшувати цю напругу до $+2,0$ В. При великих позитивних напругах на затворі (більше $2,5$ В) в його колі з'являється струм, оскільки відкривається бар'єр метал-напівпровідник. Тому цей бар'єр теж доцільно збільшувати до величини $1-1,2$ В. Як наслідок, струм стоку є обмежений величиною $I_{с макс1}$, що відповідає напрузі на затворі $U_{зв макс}$. Для нормально закритих транзисторів напруга затвору, при якій протікає

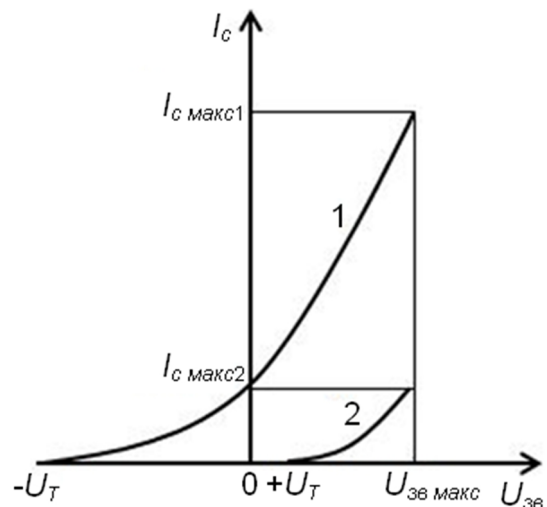


Рис. 2. Стік-затворні характеристики нормально відкритого (1) і нормально закритого (2) ПТШ.

Таблиця 1

Порівняльні електрофізичні параметри GaAs і Si

| № | Назва параметра | GaAs | Моно-Si |
|---|--|--------------------------|--------------------------|
| 1 | Рухливість, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при концентрації донорів 10^{17} см^{-3} | | |
| | - електронів | $4\cdot 5 \cdot 10^3$ | $0,8\cdot 1 \cdot 10^3$ |
| | - дірок | 250-300 | 350-400 |
| 2 | Швидкість насичення в сильному електричному полі, $\text{см}/\text{с}$ | $2 \cdot 10^7$ | $0,8 \cdot 10^7$ |
| 3 | Максимальний питомий опір нелегованого матеріалу, $\text{Ом}\cdot\text{см}$ | $10^7\text{-}10^9$ | 10^5 |
| 4 | Час життя неосновних носіїв заряду, с | 10^{-5} | 10^{-3} |
| 5 | Густина поверхневих станів МДН структур, см^{-2} | $10^{12}\text{-}10^{13}$ | $10^{10}\text{-}10^{11}$ |

струм стоку, є позитивною і може мінятися в межах 0-1,6 В. Тут максимальний струм стоку слід обмежувати значенням $I_{c \text{ макс}2}$. Тому для ПТШ з однаковими розмірами каналу (0,8-1,2 мкм) $I_{c \text{ макс}1} \gg I_{c \text{ макс}2}$.

Для GaAs найбільш перспективними є нормально закриті ПТШ. При формуванні таких транзисторів необхідно забезпечити як можна менший розкид напруг U_T . Зниження такого розкиду порогової напруги представляє сьогодні серйозну технологічну задачу для багатозарядної ретроградної іонної імплантації, оскільки ця напруга лінійно або квазілінійно залежить від концентрації донорів в каналі і квадратично від товщини шару.

У комплементарних мікросхемах використовують як нормально відкриті, так і нормально закриті ПТШ. Такі схеми мають мінімальну споживану потужність тільки в моменти переключення. Для їх формування на одному кристалі необхідно виконувати додаткові технологічні операції. Один із варіантів технології полягає в локальному травлюванні частини шару 3 n-типу. Тоді на більш товстому шарі n-типу отримують нормально відкриті, а на більш тонкому – нормально закриті ПТШ. Останні транзистори ще називають транзисторами із заглибленим затвором. У другому варіанті використовують 2 операції іонного легування (селективного) багатозарядними (легкими і важкими) іонами, за допомогою яких послідовно формують області n-типів для різних ПТШ.

Для транзисторів з довгим каналом ($L > 1 \text{ мкм}$) крутизна ПТШ описується виразом:

$$S = \frac{b m_n e_0 e_n (U_{зв} - U_T)}{L_0 d_0},$$

де b – ширина каналу, L_0 – ефективна довжина каналу. Завдяки більш високій рухливості електронів ($4\cdot 5 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) забезпечується значно більше, ніж в кремнієвих МДН-транзисторах, значення крутизни при тих же розмірах. На відміну від монокремнію, для арсеніду галію характерна менша критична напруженість електричного поля ($3 \cdot 10^3 \text{ В}/\text{см}$), при якій дрейфова швидкість досягає свого насичення. Тому в GaAs ПТШ ефект сильного поля проявляється при більшій довжині каналу і меншій нарузі на стоці, ніж в кремнієвих ПТШ. У табл. 1 наведені для порівняння основні електрофізичні параметри для GaAs і Si при $T = 300 \text{ К}$.

У транзисторах з коротким каналом ($L < 0,8 \text{ мкм}$) дрейфова швидкість досягає насичення, стік-затворна характеристика є близькою до лінійної, а крутизна слабо залежить від напруги на затворі і визначається виразом:

$$S = e_0 e_n d_{нас} / d_0.$$

Таким чином, більше значення крутизни GaAs ПТШ у порівнянні з кремнієвими МДН-транзисторами тих же розмірів обумовлене більшою швидкістю насичення $2 \cdot 10^7 \text{ см}/\text{с}$.

На відміну від кремнієвих МДН-транзисторів з індукованим каналом, в GaAs ПТШ дуже малі паразитні ємності затвор-витік та затвор-стік, оскільки затвор не перекриває область 2. Крім цього, існують також бар'єрні ємності стік-підкладка та витік-підкладка, оскільки підкладка є напівізольюючою – концентрація домішок мала, а товщина збідненої n^+ -області і переходів є великою. Велике значення має тільки ємність затвор-канал $C_{зв} = e_0 e_n b L_3 / L_{зб}$, що представляє собою бар'єрну ємність переходу контакту метал-напівпровідник. При нарузі $U_{зв} > U_T$ вона розраховується за вище приведеною формулою. Для зменшення цієї ємності необхідно зменшувати довжину каналу ($L < 0,6 \text{ мкм}$), що і збільшує швидкодію ПТШ [2].

Гранична частота крутизни визначається часом прольоту електронів через канал t_{np} при малій довжині каналу затвора $t_{np} = L_3 / u_{ef}$, відповідно $f_s = u_{ef} / 2p L_3$ і при $L_3 = 0,5 \text{ мкм}$ $f_s > 60 \text{ ГГц}$.

При роботі ПТШ в імпульсному режимі час його переключення визначається часом прольоту електронів через канал і часом перезарядження навантажувальної ємності. Чим більша крутизна, тим більший струм стоку при заданій нарузі на затворі і тим швидше перезаряджається ємність навантаження. Підвищення швидкодії GaAs цифрових мікросхем порівняно з кремнієвими обумовлено передусім збільшенням крутизни ПТШ, а також зменшенням часу прольоту електронів і паразитних ємностей транзисторів. Тому для збільшення крутизни ПТШ була розроблена технологія самосуміщення із затвором.

У табл. 2 подані типові електрофізичні параметри тестової структури ПТШ зі структурою, зображеною на рис. 1.

Таблиця 2

Електрофізичні параметри тестових структур ПТШ на GaAs

| № | Назва електрофізичного параметра структури ПТШ | Значення параметра |
|----|---|-----------------------|
| 1 | Концентрація донорів у каналі, см^{-3} | $(1-3) \cdot 10^{17}$ |
| 2 | Рухливість електронів в каналі, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ | $(4-5) \cdot 10^3$ |
| 3 | Товщина каналу, нм | 50-200 |
| 4 | Висота бар'єра Шотткі, В | 0,7-0,85 |
| 5 | Довжина затвору, мкм | 0,5-1 |
| 6 | Ширина затвору, мкм | 3-15 |
| 7 | Відстань витік-стік, мкм | 1-3 |
| 8 | Довжина каналу транзистора, мкм | 10-12 |
| 9 | Порогова напруга, В | |
| | - нормально відкритого транзистора | -(2,5-0,5) |
| | - нормально закритого транзистора | 0-1,2 |
| 10 | Крутизна на одиницю ширини каналу, мСм/мм | 100-150 |
| 11 | Питома ємність, пФ/мм | |
| | - затвор-витік | 0,5-1,5 |
| | - затвор-стік | 0,1-0,2 |
| | - стік-витік | 0,05-0,1 |
| 12 | Гранична частота, ГГц | 60-90 |

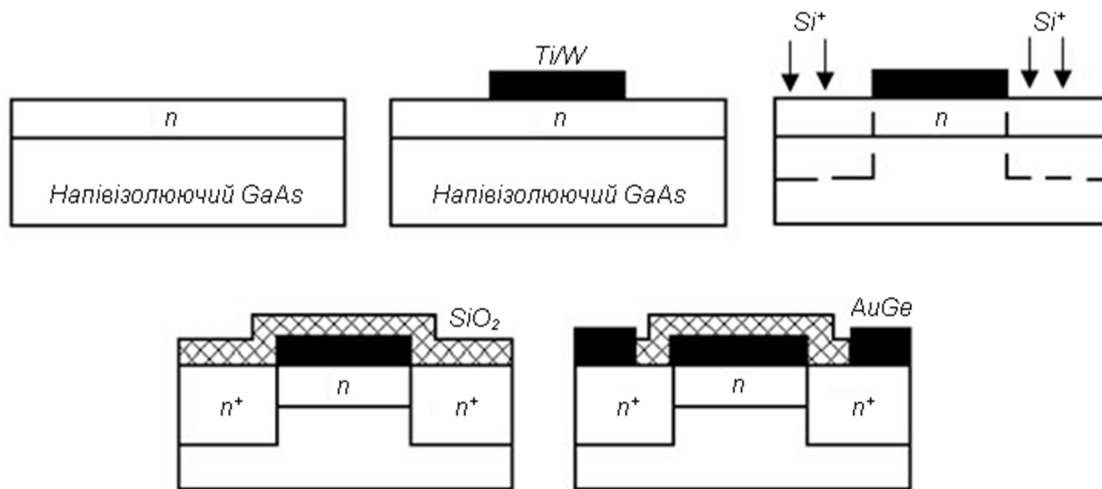


Рис. 3. Технологічний процес формування самосуміщених ПТШ на підкладках напівізолюючого GaAs.

Розглянемо структуру ПТШ із самосуміщенням затвором, основні технологічні процеси виготовлення якого показано на рис. 3.

Структуру ПТШ формують на напівізолюючій підкладці GaAs, де селективним іонним легуванням підкладки кремнієм (Si^{++}) через маску SiO_2 формують n -шар товщиною 0,08-0,1 мкм. У цьому шарі розміщують канал ПТШ, на поверхні якого формують затвор. Затвор транзистора представляє смугу силіциду вольфраму довжиною 0,8 мкм. Силіцид вольфраму вибраний як затвор, для того щоб витримати фотонну обробку при 700°C для зменшення опору.

При формуванні стік-витоківих областей n^+ -типу використовують селективне епітаксійне вирощування

за допомогою газохімічних реакцій із металоорганічних сполук або молекулярно-променевою епітаксією. Далше наносять шар діелектрика (SiO_2) і проводять фотонний відпал для активації і зменшення радіаційної дефектності, що приводить до суттєвого збільшення рухливості носіїв заряду. Плазмохімічним травленням відкривають вікна під контакти в діелектрику і формують контакти до стік-витоківих областей нанесенням металевому шару з сплаву AlGe-12, використовуючи іонне фрезерування [3].

Для ПТШ із самосуміщенням затвором при $L_s = 1,5$ мкм і $b = 1$ мм були отримані наступні електрофізичні параметри: $U_T = 0,6$ В, $R_u = 0,75$ Ом, $S/b = 87$ мСм/мм. У порівнянні з ПТШ, сформованим

без самосуміщення тих же розмірів, опір витоку зменшився в 5-8 разів, а крутизна зросла в 3-5 разів. У структурі із самосуміщеним затвором пробивна напруга на затворі визначається концентрацією домішок в n^+ -областях, бо вони примикають до затвору. При енергії іонів в 150 еВ і дозі $(1,7-2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, максимальна концентрація донорів в n^+ -областях рівна $7 \cdot 10^{17} \div 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а пробивна напруга затвору – 6-10 В. Недоліком сформованої таким чином структури ПТШ із самосуміщеним затвором є дещо збільшені паразитні ємності затвор-витік і затвор-стік, які можна зменшити, використовуючи високороздільну літографію [4].

Висновки

1. Розроблено субмікронну самосуміщену технологію формування комплементарних ПТШ на GaAs для швидкісних структур ВІС.

2. Для реалізації МДН-технології на GaAs розроблено високоефективну технологію формування капсулюючих шарів нітридних плівок AlN та BN високочастотним магнетронним розпиленням відповідної мішені в азотній плазмі.

Для реалізації надійних гетеропереходів розроблена і досліджена технологія формування епітаксійних буферних шарів германію для вирівнювання постійних кристалічних ґраток напівпровідникових матеріалів GaAs і GaAsAl на моно-Si.

Новосядлий С.П. - доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

Мандзюк В.І. - кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

Гуменюк Н.Т. - магістр кафедри матеріалознавства і новітніх технологій;

Гук І.З. – магістр кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] С.П. Новосядлий, Т.Р. Сорохтей, Металофізика і новітні технології 2(4), 17 (2011).
- [2] С.П. Новосядлий, Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС (Сімик, Івано-Франківськ, 2003).
- [3] С.П. Новосядлий, А.І. Терлецький, О.Б. Фрик, Східно-Європейський журнал передових технологій 3/7(45), 52 (2010).
- [4] С.П. Новосядлий, Суб-і наномікронна технологія структур ВІС. Монографія (Місто НВ, Івано-Франківськ, 2010).

S.P. Novosiadly, V.I. Mandzyuk, N.T. Humeniuk, I.Z. Huk

Peculiarities of Forming of Microwave Arsenide-Gallium Submicron Structures of Large-scale Integrated Circuit

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine,
e-mail: nasarhumenjuk@gmail.com

The peculiarities of technological processes of formation of submicron Schottky field transistors using arsenide-gallium technology, i.e. the technology of Schottky field transistors formation with a self-aligned gate on the basis of nitride or silicide of tungsten, are considered in the paper. A highly effective technology for the formation of capsular layers of AlN and BN nitride films by high-frequency magnetron sputtering of the proper target in nitric plasma for the realization of GaAs-based MOS-transistors is developed.

Keywords: gallium arsenide, Schottky field transistors, tungsten nitride, tungsten silicide, monocrystalline silicon.