

УДК 621.382.002:621.315.592

А.В.Івашук, А.Матуленіс, доктор фізико-матем. наук, В.І.Тимофєєв, канд. техн. наук

Вплив морфології омичних контактів на шуми гарячих електронів в транзисторних структурах

Досліджено вплив морфології омичних контактів на шуми гарячих електронів в транзисторних арсенідгалієвих структурах типу n^+-n-n^+ при температурах 80 і 300 К. Показано, що омичні контакти з більшими розмірами зерен із-за неоднорідностей розподілу електричного поля і концентрації носіїв заряду створюють умови для нерівномірного виходу електронів із витoku і входу в стік, що приводить до значного підвищення шумової температури в каналі.

The influence of ohmic contacts morphology on hot electrons noise is investigated in GaAs n^+-n-n^+ -type transistor structures at 80 and 300 K temperatures. It is shown that in ohmic contacts with greater grain sizes heterogeneity of electrical field and carrier concentration distribution creates the conditions for the irregular output of electrons from the source and their input to the drain, which results in appreciable increase of the channel noise temperature.

Відомо, що шуми гарячих електронів і їх дифузія в коротких транзисторних структурах, де створюються сильні електричні поля, при збільшенні швидкодії зростають [1]. Тому для створення надшвидкодійної електроніки на польових транзисторах і діодах з наднизьким рівнем шуму необхідно досліджувати можливості одночасного підвищення дрейфової швидкості і подавлення шуму та дифузії гарячих електронів в активній області каналу транзистора. Такі дослідження проведені в ряді робіт [2-4]. Відомо, що із зменшенням розмірів відбуваються суттєві зміни умов переносу зарядів і флуктуаційних явищ в напівпровіднику, які поки що недостатньо вивчені теоретично і експериментально. Слід підкреслити, що тут маються на увазі розміри (міжелектродні відстані) значно більші тих, які необхідні для виникнення ефектів квантування. Ми розглянемо n^+-n-n^+ структури з довжиною n -області порядку долей мікрона, щоб забезпечити максимальну швидкодію при мінімальному рівні шуму.

Одним із шляхів, який дозволяє збільшити дрейфову швидкість в більшій мірі, ніж виростуть шуми гарячих електронів, є спосіб зменшення міжелектродних відстаней до критичних, що визначаються часом пробігу і кінцевим часом розігріву електронів. В таких структурах чистого напівпровідника ($n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) дрейфову швидкість можна навіть збільшити порівняно із стаціонарною, що спостерігається в довгих зразках [5], а шуми зменшити [6]. В коротких n^+-n-n^+ структурах, коли пробігаючи через n -область, електрони не встигають досягти енергій, більших за критичну для певного порогового процесу розсіювання, то цей процес не буде давати внеску в дрейфову швидкість, тобто її зменшувати, і не будуть проявлятися шуми, пов'язані з цим процесом. Образно кажучи, вводиться як би новий сильний механізм розсіювання, а

саме вихід електронів у стік, який конкурує з іншими механізмами розсіювання. В залежності від результатів цієї конкуренції, тобто шляхом підбору міжелектродних відстаней, рівня легування (розсіювання на домішках), температури ґратки (інтенсивність акустичного розсіювання) і т.і. можна ефективно керувати дрейфовою швидкістю, шумами і дифузією.

В GaAs, крім переходу у верхні долини, існує також цілий ряд інших порогових процесів, які проявляються лише при досягненні електронами певної енергії. Це розсіювання на полярних оптичних фононах, уткання електронів [7], резонансне розсіювання на домішках [8]. Кожному вищенаведеному пороговому процесу в GaAs буде відповідати критична міжелектродна відстань, менше якої в структурах не буде проявлятися вплив певного процесу на дрейфову швидкість і шуми.

Вищенаведені явища, що виникають у коротких n^+-n-n^+ структурах арсеніду галію, досить детально розглядалися в роботі [6]. Однак мало досліджувался вплив технологічних факторів формування електродів контактів у таких структурах, що особливо важливо для реальної технології виготовлення транзисторів.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження впливу морфології омичних контактів до n^+ -шарів на шуми гарячих електронів в n^+-n-n^+ структурах.

1. Зразки

Експериментальні дослідження температури шуму в каналі польового транзистора проводились на беззатворних транзисторних структурах. Вихідною епітаксальною структурою (ЕС) була ЕС типу n^+-n-n^+-i GaAs, профіль легування якої схематично зображений на рис.1.

На поверхні n^+ -шару формувались електроди у вигляді омичних контактів з топологією, наведеною на рис.2-а, за двома технологіями. За першою технологією омичний контакт формувалася із традиційних шарів AuGe (12%) - 50 нм, Ni - 20 нм і Au - 250 нм, або ж без нікеля. За другою - напівпровідник перед нанесенням металізації оброблявся низькоенергетичними іонами аргону і одночасним збагаченням поверхні атомами германію і нікелю. Крім цього у багат шаровій металізації застосовувались тугоплавкі метали Ti або ж Mo, у такій, наприклад, композиції: AuGe (12%) - 50 нм, Ni - 20 нм, Au - 100 нм, Mo - 30 нм, Au - 200 нм [9]. Це дозволило суттєво поліпшити морфологію контакту при однакових його електрофізичних параметрах. Якщо при першій технології зерна сплавленого контакту в основному мали розміри $\sim 0,3-0,5$ мкм і більше (рис. 3-а), то друга технологія забезпечила розміри зерен менше 0.1 мкм (рис3-б).

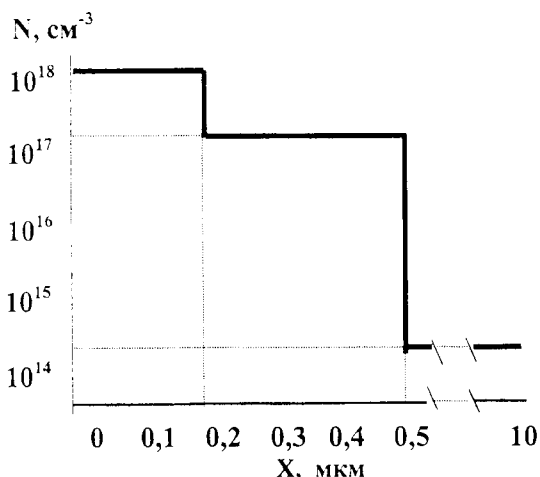
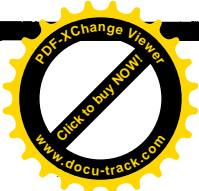


Рис.1. Профіль концентрації N_d в ЕС.

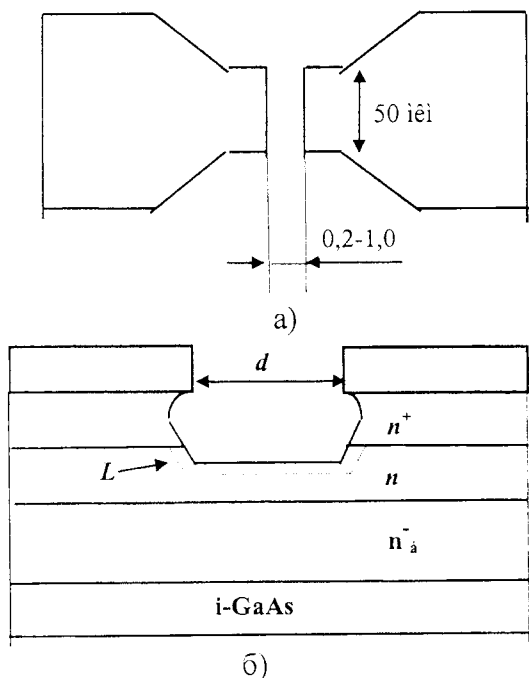


Рис.2. Топологія зразка (а) та поперечний розтин щілини (б).

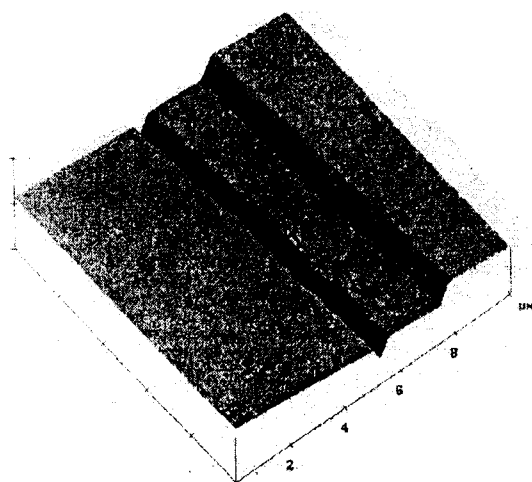


Рис.3 а)

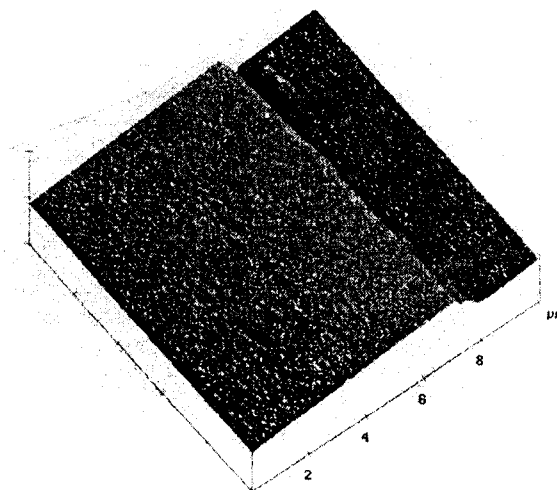


Рис.3 б)

Рис. 3. Фрагменти морфології омичного контакту при стандартній (а) і поліпшеній (б) технології: 1 – SiO_2 ; 2 – AuGe-Ni-Au ; 3 – Ti-Au ; 4 – $[\text{Ge,Ni}] - \text{AuGe-Au-Mo-Au}$.

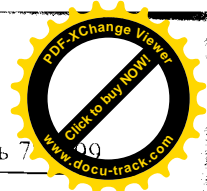
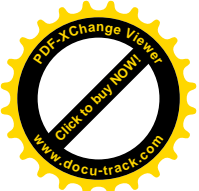
Режими формування контактів підбирались так, щоб отримати в обох варіантах приблизно однаковий питомий опір контакту (r_c) в межах $(5-6) \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ і тим самим гарантувати ідентичний вплив контактного опору електродів (R_n) на вимірювання ефективної шумової температури в зразках. Для забезпечення надійних умов контактування із зовнішніми електродами на сформовані контакти додатково наносилась металізація: $\text{Ti} - 30 \text{ нм}$ і $\text{Au} - 300 \text{ нм}$.

Між двома контактними площадками p^+ -шар стравлювався, і таким чином формувались вузькі щілини від 0,2 до 1,0 мкм (рис.2-б). Краєві ефекти, що при цьому виникали, враховувались за методикою, наведеною в роботах [6,10,11]. Середня електрична довжина зазору L зображена на рис.3-б: $L = d + D$. Для дуже вузьких щілин, тобто для коротких каналів, різницею між L і d зневажати не можна.

2. Методика вимірювань ефективної шумової температури зразків

Для вимірювання шумової температури зразка використовувався стробуючий радіометр з попереднім параметричним підсилювачем на частоті $\omega = 10 \text{ ГГц}$ і змішувачем на частоті 36 ГГц . В секції хвилевода II-типу, один кінець якого закорочувався, розміщався зразок і узгоджувався з хвилеводом на мінімальний коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ). Електрони в зразку розігрівались імпульсами постійного струму подовженністю 0,2...2 мкс і частотою надходження 125 Гц . До хвилеводної секції із зразком під'єднувався або стробуючий радіометр для визначення випромінюваної зразком потужності, або ж вимірювач КСХ [6,10]. Температура шуму визначалась шляхом порівняння сигналів радіометра, який під'єднувався або до хвилеводної секції із зразком, або ж до еталонного джерела шуму. Оцінка втрат шумового сигналу в хвилеводному тракті проводилась при градуванні: зразок нагрівався до відомої температури T_0 , вважалось, що показання радіометра відповідають температурі шуму $T_w = \kappa_n T_0$, де κ_n - коефіцієнт втрат.

Малосигнальний опір $\tilde{R}(E)$ досліджуваного зразка визначався із вольтамперної характеристики, помірною



імпульсами постійної напруги $\tilde{R}(E) = dU/dI$. Контрольні вимірювання $\tilde{R}(E)$ на НВЧ робились по такій методиці. Визначався КСХ хвилеводу із зразком під час дії сильного електричного поля. Потім, при виключеному електричному полі електропровідність зразка змінювалась (магнітним полем, нагріванням і т.ін.) настільки, щоб отримати попереднє значення КСХ і вимірявся опір зразка R^* на постійному струмі, що дає $R(E) = R^*$. При цьому повинні задовольнятися дві умови. По-перше магнітне поле, чи температура ґратки повинні мало впливати на реактивну складову імпедансу хвилеводу із зразком, по-друге необхідне виконання умови $(\omega t_p)^2 \gg 1$, де t_p - час релаксації імпульса. Ці умови добре виконувались на частоті 10 ГГц.

3. Результати експериментів

Як видно із рис.4, де представлені залежності шумової температури каналів від напруги на активній області, зразки, в яких металізація електродів має поліпшену морфологію, мають значно нижчу шумову температуру. Особливо ця різниця помітна для коротких каналів ($d = 0,2$ мкм) і значно менший вплив морфології для довших каналів ($d = 1,0$ мкм). Враховуючи те, що r_k і відповідно R в обох типах контактів ідентичні, різну шумову температуру на зразках можна пояснити лише впливом морфології контакту.

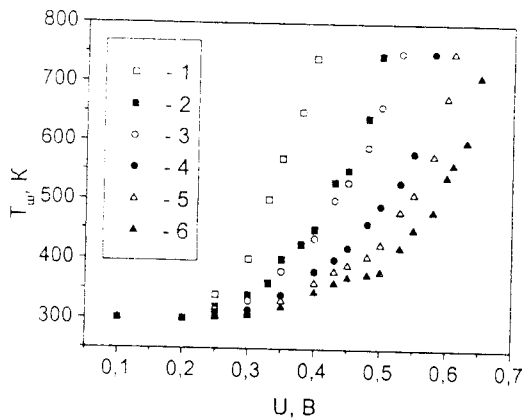


Рис.4. Залежність шумової температури каналу від напруги на активній області зразка на частоті 10 ГГц при температурі 300 К: 1, 2 - $d=0,2$ мкм, 3, 4 - $d=0,6$ мкм, 5, 6 - $d=1,0$ мкм: 1, 3, 5 - стандартна технологія, 2,4,6 - поліпшена.

Очевидно, що в зразках із більшими розмірами зерен сплавлених електродів контактів створюються умови для нерівномірнішого виходу електронів із витоку і входу у стік. Чим більшими будуть зерна і, відповідно, розмітшим край контакту, тим значнішими будуть неоднорідності розподілення електричного поля і концентрації носіїв заряду. При цьому слід очікувати також зменшення дрейфової швидкості, тому що ці неоднорідності можуть зайняти значну частину досліджуваного n-шару.

На рис.5 представлені залежності шумової температури каналів від напруги на активній області при охолодженні до $T = 80$ К. Як видно із рисунка, вплив морфології контакту на шумову температуру в охолодженому каналі ще значніший. Так наприклад, в каналі з $d = 0,2$ мкм при $T = 80$ К для двох зразків з $DT_{ch} \sim 340$ К при рівні $T_{ch} \sim 750$ К і $DT_{ch} \sim 120$ К при $T_{ch} \sim 400$ К, тоді як в каналі при $T = 300$ К при цих же рівнях T_{ch} DT_{ch} складає 290 і 60 К. Це можна

пояснити більшим впливом на шумову температуру r_k . В омичних контактах зразків серії I, виготовлених по традиційній технології, із-за більшого розмивання фронту сплавлення при охолодженні спостерігається зменшення впливу термопольової емісії на струм, і r_k значно зростає. А в зразках серії II з кращою морфологією і, відповідно, різкішим фронтом сплавлення внесок термопольової емісії менший і при охолодженні r_k від температури залежить також менше [12].

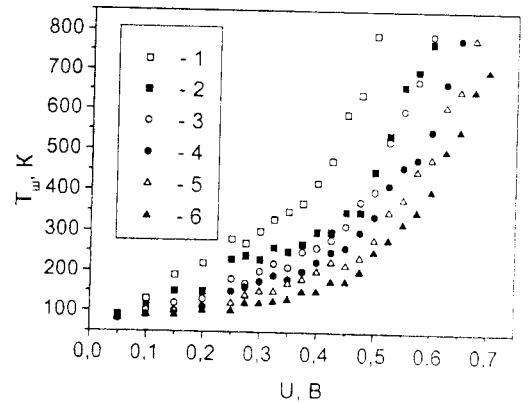


Рис.5. Залежність шумової температури каналу від напруги на активній області зразка на частоті 10 ГГц при температурі 80 К: 1, 2 - $d=0,2$ мкм, 3, 4 - $d=0,6$ мкм, 5, 6 - $d=1,0$ мкм: 1, 3, 5 - стандартна технологія, 2,4,6 - поліпшена.

Висновки

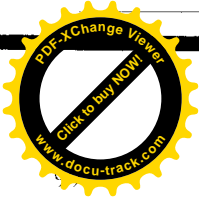
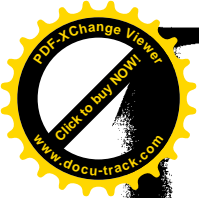
Таким чином, можна стверджувати, що морфологія омичних контактів суттєво впливає на шуми гарячих електронів в транзисторних структурах типу n⁺-n-n⁺.

Досліджені явища будуть мати особливо важливе значення при конструюванні НВЧ приладів із субмікронними розмірами елементів технології, в яких ігнорувати вище приведені результати вже неможливо і необхідно удосконалювати технологічні рішення для отримання морфології контактів, близької до ідеальної.

Слід очікувати також значного впливу морфології контактів на НВЧ параметри транзисторів, які використовуються при глибокому охолодженні, на рівні $T = 80$ К.

Література

1. Hot electron noise temperature in n-type GaAs channel at fields over 100 kV/cm / V.Bareikis, J.Liberis, A.Matulionis et.al.// Proc. 18th European Workshop on Compound Semiconductor Devices and ICs (WOCOSICE'94), Kinsale, Ireland.- 1994.- P/217-222.
2. Effect of hydrogen on hot electron noise in short samples of GaAs / V.Bareikis, J.Liberis, A.Matulionis et.al. Semicond. Sci. Technol. - 1993, 8.- P.1829-183
3. Experiments on hot electron noise in semiconductor materials for high-speed devices / V.Bareikis, J.Liberis, A.Matulionis et.al.// IEEE Trans. Electron Devices.-1994, ED-41.- P.2050-2060.
4. Microwave noise of GaAs planar doped barrier diodes at high bias / J.Liberis, A.Matulionis, P.Sakalas et.al. / 20th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, Vilnius.-1996.-P62-63.
5. Ruch J.G. Electron dynamics in short channel field-effect transistors // IEEE Trans. Electron Devices.-1972. ED-19.- P.652.



А.В. Иващук та ін. "Вплив морфології омичних контактів на шуми гарячих електронів..."

5. Шумы в микронных n^+p-p^+ структурах GaAs / Барейкис В., Либериc Ю., Матуленис А. и др. // ФТП.-1987, 21.- Вып.5, с.916-92 Матуленис А., Пожела Ю., Реклайтис А. Время убегания электронов при рассеянии полярными оптическими фононами // ФТП.- 1974, 8.- №9, с.1830-1833.
6. El-Ghanem H.M., Ridley B.K. Impurity scattering of electrons in non-degenerate semiconductors // J.Phys.C.: Sol.State Phys. - 1980, 13.- № 10, p.2041.
7. Иващук А.В., Босый В.И., Кохан В.П., Стовповой М.А. "Способ изготовления омического контакта к полупроводниковому соединению A_3B_5 с проводимостью n-типа". А. с. № 299219. Заявка № 3204366 от 04.07.88.
8. В.А.Барейкис, В.И.Дворников, А.В.Иващук, Ю.С.Либериc, А.Ю.Матуленис, П.А.Сакалас. Зависимость СВЧ шумов от длины канала беззатворных транзисторных структур арсенида галлия.- У Всесоюзная конференция "Флуктуационные явления в физических системах", г.Паланга, сентябрь 1988 г. Тезисы докладов, с.46-48.
9. В.И.Босый, Л.Г.Гассанов, А.В.Иващук, Б.Барейкис, Ю.Либериc, А.Матуленис, П.Сакалас. Шумы в коротких легированных GaAs n^+p-p^+ -структурах в сильных электрических полях.- У11 Всесоюзный симпозиум "Плазма и неустойчивости в полупроводниках", г.Паланга, сентябрь 1989 г.
10. Каганович Э.Б., Свешников С.В. Получение омических контактов к полупроводниковым соединениям $A^{III}B^V$ (обзор) // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.- 1992.- Вып.22, с.1-16.