

ОГЛЯДИ

УДК 621.382.323

РОЗВИТОК НЕМТ

Дяченко С.М., Павлюченкова А.М.

Освоєння надвисокочастотних (НВЧ) діапазонів зумовлює безперервний розвиток НВЧ-транзисторів. До них належать арсенід-галієві структури (МЕН або MES FET), в яких електрони з витoku до стоку потрапляють через канал, провідність якого регулюється зміною зворотного зміщення переходу заслін-напівпровідник (метал-напівпровідник).

Збільшення робочої частоти таких транзисторів досягають зменшенням довжини каналу, який визначається довжиною заслону і становить десятки долі мікрметрів в НВЧ-транзисторах. Одночасно з вкороченням довжини каналу та незмінній ширині заслону і сталій густині струму в каналі, падає струм стоку, а, отже, і потужність, яку розвиває транзистор. Виходом може бути збільшення густини струму в каналі. Це досягається легуванням каналу донорами в MES FET до 10^{19} см^{-3} , що призводить до збільшення центрів розсіювання і викликає зменшення рухливості електронів і збільшення флуктуації струму стоку, тобто зростанню шумів.

Розв'язанням цієї проблеми було б збільшення густини струму в каналі без додаткового легування, тобто створення умови, коли іони донорів залишаються поза каналом, а електрони донорних домішок делегуються до каналу.

Виготовлення керівного переходу заслін-напівпровідник у вигляді гетеропереходу забезпечило таке просторове розділення. Між тонкими шарами напівпровідникових матеріалів з подібною кристалічною структурою, але різною шириною забороненої зони, утворюється гетероперехід. За рахунок різниці енергій дна зони провідності напівпровідників на границі їх поділу утворюється область з мінімальною енергією електронів. При виконанні гетеропереходу $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ шар $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ легують донорними домішками з концентрацією $N_d=10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$. Вільні електрони провідності, утворені внаслідок теплової іонізації донорів, нагромаджуються в цій потенціальній ямі на границі поділу шарів. В каналі, розташованому в поверхневому шарі GaAs, утворюється так званий ДЕГ(Д2) – двомірний електронний газ – тонка плівка електронів. Канальний шар не легований, в ньому розсіювання електронів на домішкових центрах та дислокаціях мінімальне, а рухливість, відповідно, висока. Тому даний клас пристроїв носить назву НЕМТ (High Electron Mobility Transistor). Це НВЧ-транзистор з низьким рівнем шумів. На рухливість електронів сприятливо впливає охолодження транзистора, бо зменшується вплив решіткового розсіювання і ру-

хливість електронів зростає від $0,8 \cdot 10^4$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T=300$ К і до $1,4 \cdot 10^5$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T=77$ К [1].

Матеріали, що використовуються для гетеропереходу, повинні мати подібні кристалічні решітки. Транзистори, де це правило порушується, називаються рНЕМТ або псевдоморфні НЕМТ ($\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}$, $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$, $\text{InGaP}/\text{InGaAs}$, тощо). Прилади цього типу за рахунок збільшення розриву енергій дна зони провідності і збільшення рухливості електронів мають більші робочі частоти. Для поступового переходу від підшарку до каналу використовують прилади зі складним багатошаровим буфером. Це – метаморфні НЕМТ-структури (mНЕМТ), тобто прилади з послідовною зміною концентрації домішок в буферному шарі для забезпечення плавного переходу від різних кристалічних структур складових транзистора.

За звичай використовується комбінація GaAs з $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Існують й інші комбінації, в залежності від застосування пристрою. Для підвищення робочих частот розробники прагнуть збільшити концентрацію індію в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -каналіному шарі [2]. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ НЕМТ є найбільш перспективним для створення потужних НВЧ-генераторів та підсилювачів, малошумлячих RF-підсилювачів та RF-перемикачів (RF – радіочастоти). Широко заборонені зони, великі швидкості насичення носіїв заряду наряду з високими пробивними полями дозволяють виготовляти пристрої субмікронних розмірів, що мають значні переваги в порівнянні з пристроями на основі звичайних матеріалів $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [3].

Структура такого НЕМТ- транзистора показана на рис.1. В якості підшарку використовують сапфір, SiC , Si , AlN або складні оксиди. Одним з найбільш важливих моментів у створенні гетероструктур є вирощування буферного шару (GaN , AlN), який служить для ізоляції дефектів в підшарку від робочої частини транзистора. Епітаксіальна структура містить буферний шар GaN товщиною ~ 100 нм, нелегований шар GaN товщиною ~ 2 мкм, нелегований розмежувальний шар (спейсер) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ товщиною ~ 5 нм для поступового переходу від нелегованого шару до легovanого кремнієм шару $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ з концентрацією заряду $\sim 5 \cdot 10^{18}$ см^{-3} товщиною ~ 10 нм та нелегований бар'єрний шар $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ товщиною ~ 10 нм, який зменшує вплив металізації заслону на легovanу область транзистора [4].

Для використання фізичних переваг нітридних напівпровідників необхідна розробка та реалізація конструкцій пристроїв. Цю задачу можна розділити умовно на два напрями: модернізацію структури під 2Д каналом та оптимізацію надбар'єрних елементів транзистора (бар'єрний шар, заслін, контакти, топологія) [5].

Найбільш застосовуваними для цих транзисторів є підшарки з карбїду кремнію, так як можна отримати високі значення струму, крутості, вихідної потужності, ККД. Для AlGaN/GaN НЕМТ вирощених на SiC методом

МПЕ (молекулярно-променевої епітаксії) густина вихідної потужності складає $11,2 \text{ Вт/мм}^2$ з ККД=58% при постійній напрузі 48 В на частоті 10 ГГц [6]. Розроблена модель AlGa_xN/GaN HEMT з довжиною заслону 120 нм, в якому досягнута гранична частота 120 ГГц та максимальна частота генерації 160 ГГц [7]. Зокрема, ці пристрої дозволяють високі робочі напруги. Повідомляється, що напруга пробою становить 1650 В [8].

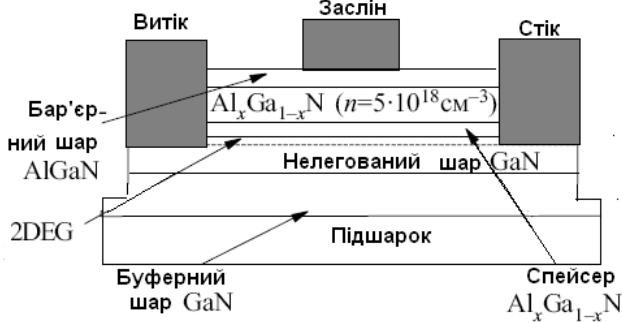


Рис.1. Схематичне зображення AlGa_xN/GaN HEMT

Модель AlGa_xN/AlN/GaN HEMT з високою рухливістю в каналі GaN. Пристрої продемонстрували дуже високу вихідну потужність 45,2 Вт на 8 ГГц в неперервному режимі [9]. Розроблено широкопasmовий підсилювач на 400 Вт вихідної потужності на GaN HEMT для частот від 2,9 до 3,5 ГГц [10]. Напівпровідникові структури AlGa_xN/GaN HEMT

мають багато переваг, так як властивості нітриду галію забезпечують найкращі параметри на сьогодні. Максимальна частота генерації цих транзисторів сягає 350 ГГц [11].

Перше практичне застосування HEMT транзистори знайшли в системах супутникового зв'язку діапазонів 12-18 й 18-26,8 ГГц. Випробування цих транзисторів у малошумній апаратурі наземних станцій супутникового зв'язку в діапазоні 20-30 ГГц показали можливість одержання підсилення сигналу в 33 дБ. При цьому рівень шумів у лінії передавання був знижений до 1,71 дБ, що майже вдвічі нижче, ніж у пристроях, що використовують звичайні польові транзистори на арсеніді галію.

Існують й інші напрямки застосування HEMT. Можливе створення магнітних пристроїв-додатків, що використовують GaAs HEMT, які не сприйнятливі до феромагнітного шуму і придатні для високошвидкісної електроніки, магнітних пристроїв зберігання даних [12]. В експериментальній роботі [13] виявлено випромінювання, яке створене коливанням плазмових хвиль терагерцового діапазону, що поширюються в каналі Al-GaAs/GaAs HEMT, явище є перспективним для створення джерел подібних коливань.

HEMT має кращі шумові властивості, ніж арсенід-галієві MESFET. На частотах від 0,1 до 250 ГГц особливу увагу фахівці приділяють саме HEMT. Мінімальна власна шумова температура T_{\min} існуючих рHEMT у дециметровому діапазоні становить 7-12 К навіть без охолодження, а в середині цього діапазону шумова температура підсилювачів лежить в межах 25-50 К [14]. Подальше зниження T , що є необхідним для багатьох застосувань (зв'язку, радіоастрономії та ін.), можна досягти за допомогою охо-

лодження підсилювача до криогенних температур, але цей спосіб, внаслідок недоліків сучасної кріотехніки (громіздкість, великі експлуатаційні витрати, тощо) набув досить обмеженого поширення. Проблема зниження коефіцієнта шуму залишається актуальною для НЕМТ, а основними джерелами виникнення власних шумів в польових транзисторах є шум каналу, індукований шум заслону і шуми паразитних опорів заслону та стоку.

На надійність НЕМТ впливають параметри епітаксціальних структур, технології їх вирощування та геометрія пристрою. Ці транзистори є досить надійними, виявляють високу стійкість до іонізуючих факторів [15].

НЕМТ завдяки їх мал шумним характеристикам можуть замінити польові MES FET в різних областях. Більш високочастотні та потужні НЕМТ, створені на основі GaN, забезпечують сьогодні найкращі параметри. Мал шумні потужні транзистори мають великі перспективи у розвитку та застосуванні і складають основу активної компонентної бази радіоелектронної апаратури в НВЧ діапазоні.

Література

1. Дулин В.Н., Аваев Н.А., Демин В.П. и др., под. ред. Г.Г. Шишкина. Электронные приборы. – М.: Энергоавтомиздат. – 1989. – 495с.
2. Kim T., Kim D., Shin S., Jo S., Jang J., Song J.. Characteristics of 0.2 μm depletion and quasi-enhancement mode self-aligned gate capless *p*-HEMTs//ELECTRONICS LETTERS . – 2006. – № 20.
3. Шахнович И. Твердотельные СВЧ-приборы и технологии. Состояние и перспективы // Электроника НТБ. – 2005. – №5. – с.59.
4. Босый В.И., Иващук А.В., Ковальчук В.Н., Семашко Е.М. Мощные СВЧ-транзисторы на основе широкозонных полупроводников // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – №3. – с.54.
5. Rajan S., Mishra U., Palacios T.. AlGaIn/GaN HEMTs: RECENT DEVELOPMENTS AND FUTURE DIRECTIONS // International Journal of High Speed Electronics and Systems.-2008. – №4. – с.155-163.
6. Poblenz C., Corrion A., Recht F., Sun Chang Soo, Chu Rongming, Shen Likun, Speck James S., Mishra Umesh K. Power performance of AlGaIn / GaN HEMTs grown on SiC by ammonia-MBE at 4 and 10 GHz // IEEE Electron Device Lett. – 2007. – №11, с. 945-947.
7. Tyagi R., Ahlawat A., Pandey M., Pandey S. New two-dimensional C-V model for prediction of maximum frequency of oscillation (f_{max}) of deep submicron AlGaIn/GaN HEMT for microwave and millimeter wave applications//Microelectronics J. - 2008. – №12.
8. Takuma Nanjo, Misaichi Takeuchi, Muneyoshi Suita, Toshiyuki Oishi, Yuji Abe, Yasunori Tokuda, Yoshinobu Aoyagi. Remarkable breakdown voltage enhancement in AlGaIn channel high electron mobility transistors // Appl. Phys. Lett. – 2008. – №92.
9. Wang X.L., Chen T.S., Xiao H.L., Tang J., Ran J.X., Zhang M.L., Feng, C., Hou, Q.F., Wei M., Jiang L.J., Li J.M., Wang Z. An internally-matched GaN HEMTs device with 45.2W at 8GHz for X-band application // Solid-State Electronics. – 2009. – Vol. 53. – P.332-335.
10. Poulton M., Krishnamurthy K., Martin J., Landberg B., Vetry R., Aichele D. WIDEBAND 400 W PULSED POWER GAN AMPLIFIER // Microwave J. 2008. – V. 51.
11. Samoska L., Deal W., Pukala D., Fung A. Submillimeter-Wave HEMT Amplifier Module With Integrated Waveguide Transitions Operating Above 300 GHz // IEEE Trans. on MTT. – 2008. – Vol. 56. – P.1380-1388.

12. Liang C., Yu-Ru Li, Li-Hung Lin, Po-Tsun Lin, Chun-Kai Yang, Yen Shung Tseng, Kuang Yao Chen, Cooper N., Simmons M., Ritchie D. Electron heating and huge positive magnetoresistance in an AlGaAs/GaAs high electron mobility transistor structure at high temperatures // APPL. PHYS. LETT. – 2008. – №92. – P.152117.

13. Hashim, Abdul Manaf, Ahir, Zon Fazlila Mohd, Kasai, Seiya, Hasegawa, Hideki. Odd Harmonic Responses in Two-Dimensional AlGaAs/GaAs HEMT Devices Due to Plasma Wave Interaction // AIP Conference Proceedings. – 2009. – Vol. 1150. – P.328-335.

14. Белов Л. Твердотельные усилители малой и средней мощности // Электроника: НТБ. – 2006. – №5. – с.50.

15. Аболдуев И.М., Гладышева Н.Б., Дорофеев А.А. Разработка HEMT на основе гетероструктур AlGaIn/GaN/сапфир // Материалы VI-ой НТК «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА». – 2007. – с. 39.

Дяченко С.М., Павлюченкова А.М. Розвиток HEMT. В статті наводиться огляд останніх робіт і перспективні напрямки розвитку транзисторів з високою рухливістю електронів

Ключові слова: нітрид галію, HEMT

Дяченко С.М., Павлюченкова А.М. Развитие HEMT. В статье приводится обзор последних работ и перспективные направления развития транзисторов с высокой подвижностью электронов

Ключевые слова: нитрид галлия, HEMT

Dyachenko S.M., Pavlyuchenkova A.M. Development HEMT. This paper provides an overview of recent work and future directions High Electron Mobility Transistor development

Key words: Gallium Nitride, HEMT

УДК 533.9.082.74

МЕТОДИ НВЧ-ДІАГНОСТИКИ ПЛАЗМИ

Воропаєв П.В., Митрофанов А.Б., Біденко В.А., Зоренко О.В.

Цей огляд присвячений методам НВЧ-діагностики, заснованим на зондуванні плазми електромагнітними хвилями і на реєстрації власного випромінювання плазми. Ці методи найбільш широко використовуються на великих термоядерних установках типу ТОКАМАК і Стеларатор. В огляді розглядаються проблеми багатоканальної інтерферометрії [1], особливості поляриметрії [2] та велика увага приділяється циклотронній НВЧ-діагностиці [3]. Як відомо, за допомогою перерахованих методів можна отримати дані по просторово-часовим залежностям основних параметрів плазми: щільності плазми, температури електронів та іонів, модуля та напрямку магнітної індукції пологоїдалного поля.

Тенденція до збільшення розрядного струму, а отже, і поздовжнього магнітного поля, щільності, температури і розмірів плазми в установках сучасного і майбутнього покоління викликає необхідність залучення для ді-