

С.П. Новосядлий, В.М. Грига, А.В. Павлишин, В.М. Луковкін

Фоточутливість польових транзисторів Шотткі на епішарах GaAs на моно-Si-підкладці

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна,
kkie@pu.if.ua

В даній статті описані досліджені основи і фізичні механізми, які визначають фоточутливість арсенідгалієвих ПТШ на моно-Si-підкладках на бар'єрі Шотткі при їх освітленні випромінюванням в області домішкової смуги поглинання. Проведені експерименти показали, що характер змін струму стоку в такій структурі при освітленні визначаються типом глибоких центрів, а величина його зміни визначається в основному дією двох факторів: зміною ширини шару об'ємного заряду бар'єрного контакту та ширини дипольного шару на межі розділу активний гетероперехідний шар-Si-підкладка.

Ключові слова: електроніка, ВІС, польові транзистори Шотткі, електроскопія, GaAs.

Стаття поступила до редакції 08.09.2019; прийнята до друку 15.12.2019.

Вступ

Напівпровідникові сполуки типу $A^{III}B^{IV}$, зокрема арсенід галія (арсенід-галія-алюмінія), сьогодні широко використовуються для створення як цифрових швидкодіючих, так і аналогових НВЧ-приладів та ІС(ВІС). Тому для практичної реалізації активних елементів ВІС, наприклад польових транзисторів із бар'єром Шотткі, як правило використовуються як тонкі епішари, леговані епішари, які сформовані на підкладках моно-Si великого діаметру > 150 мм. Дана технологія забезпечує утворення глибоких домішкових рівнів, які суттєво впливають на параметри і характеристики активних елементів.

Для дослідження ПТШ із затвором Шотткі на гетеропереході ми використали цікавий метод фотоіндукованої струмової спектроскопії який входить в розроблений нами посібник по електрофізичному діагностуванню субмікронних структур ВІС. Електрофізичне діагностування забезпечується використанням тестових структур, зокрема хілотронів для оцінки швидкості та рухливості носіїв заряду.

Метою наших досліджень і було дослідження основних фізичних механізмів, які визначають

фоточутливість арсенідгалієвих ПТШ при їх освітленні випромінювання в області домішкової смуги поглинання, що відповідає на середині забороненої зони GaAs — це важливо при їх використанні як фотодетекторів приймального оптичного модуля у ВОСП (Волоконно оптична система передачі).

I. Аналіз фізичних процесів у гетероперехідних ПТШ

Зміна опору каналу ПТШ при інфрачервоному освітленні визначається модуляцією ширини шару об'ємного заряду під бар'єрним контактом та зміною дипольного шару в каналі на межі розділу активний шар GaAs і Si-підкладка, що викликаються оптичним перезарядженням глибоких центрів в забороненій зоні GaAs. Тут в загальному випадку в шарі об'ємного заряду бар'єру Шотткі та дипольного шару на межі розділу активний шар GaAs-Si-підкладка можуть знаходитися як на донорному, так і акцепторному рівні. При освітленні структури ПТШ оптичним випромінюванням в домішковій смугі поглинання (коли енергія випромінювання $h\nu$ є менша ширини забороненої зони арсеніду галію) в

залежності від типу і ступеня заповнення глибоких рівнів можливі два види переходів.

При переході прямого типу поглинання кванта оптичного випромінювання приводить до переходу електронів із валентної зони на незаповнені акцепторні або донорні рівні. Переходи другого типу приводять до переходу із заповнених вже рівнів у вільну провідну зону. Таким чином, в результаті оптичного освітлення, що демонструє рис. 1а змінюється заряд, захоплений глибокими рівнями, що відповідно викликає модуляцію густини заряду в шарі об'ємного заряду Шотткі і відповідної зміни його ширини – а це вже пряма зміна провідності каналу.

Стійкість та характер впливу цих процесів на модуляцію опору каналу будуть в значній мірі визначатись там, в якій саме області вони відбуваються.

В шарі об'ємного заряду бар'єру Шотткі поглинання оптичного випромінювання може привести до наступних процесів. Коли акцепторний глибокий рівень знаходиться вище рівня Фермі E_{F1} , поблизу краю вільної зони, для акцепторних рівнів імовірності переходів першого типу є нижчі ніж імовірності переходу другого типу і тому освітлення оптичним випромінюванням буде приводити до підвищення густини позитивного заряду в бар'єрі Шотткі. Це приводить до звуження забороненої зони і відповідного розширення каналу ПТШ. Якщо ж акцепторний рівень знаходиться вже нижче рівня Фермі E_{F1} , то імовірність переходу першого типу стає вища ніж імовірність переходу другого типу, в результаті чого знижується густина позитивного заряду і відповідно розширюється збіднена область під бар'єрним контактом при освітленні структури ПТШ оптичним випромінюванням. Для переходів з участю донорних рівнів буде вже спостерігатися обернена картина процесу модуляції.

Зміна ширини шару об'ємного заряду під бар'єрним контактом при освітленні можна визначити, якщо розв'язати рівняння Пуассона для цієї області. Ширина цього шару об'ємного заряду для структур, в яких концентрація мілких є глибоких рівнів не залежить від товщини з врахуванням заряду, захопленого глибокими рівнями, то зміну їх зарядового стану при освітленні, можна описати виразом:

$$W_d = \left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 \cdot (\varphi_b + U_g)}{\rho} \right)^{1/2}$$

При достатньо високому рівні збудження в умовах насичення домішкового поглинання при певних співвідношеннях параметрів глибоких центрів зміни величини W_d при освітленні прийме вигляд:

$$W_d(U_g) = \pm \left(\frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 \cdot (\varphi_b + U_g)}{qN_d} \right)^{1/2} \cdot \frac{kN_E}{N_d}$$

Тут знак “+” відповідає переходам першого роду з участю акцепторних рівнів та другого типу з участю донорних рівнів. Поглинання оптичного

випромінювання вже в дипольному шарі на межі розділу канал-підкладка також приводить до зміни зарядового стану глибоких центрів і, відповідно, до зміни його товщини. Тут глибина проникнення збідненого дипольного шару на межі розділу канал-підкладка в області каналу матиме вигляд:

$$W_e = \left(\frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 \cdot (\varphi_u - U_s)}{\rho_0 \cdot (\rho_0 + \rho_s)} \right)^{1/2}$$

Таким чином, проведений аналіз фоточутливості GaAs-транзисторів на бар'єрах Шотткі (ПТШ), дає можливість визначити: характер зміни струму стоку ПТШ-транзисторів при освітленні та випромінювання в області домішкової смуги поглинання буде визначатися типом глибоких центрів в забороненій зоні, а величина зміни – сумою таких ефектів: зміною ширини шару об'ємного заряду бар'єрного контакту, шириною дипольного шару на межі розділу канал-підкладка при оптичному перезарядженні глибоких центрів і самим фотоефектом в квазі-нейтральній області каналу.

Приведений аналіз фізичних процесів підтверджується вихідними ВАХ ПТШ як для газоепітаксійних, так і іонно-легованих структур ПТШ GaAs на моно-Si-підкладах.

II. Експериментальні дані та результати

Освітлення ПТШ оптичним випромінюванням з енергією квантів, яка є дещо меншою ширини забороненої зони, викликає тонкі переходи з участю глибоких рівнів типу EL2 в забороненій зоні GaAs. Характер і величина зміни струму стоку при освітленні визначаються відповідними змінами провідностей витоку, стоку, каналу та перехідного шару гетеропереходу канал-підкладка, які по суті справи є наслідком фотогенерації вільних носіїв заряду та змінного зарядового стану цих глибоких рівнів, які визначають термодинамічну стабільність таких оптичних фототранзисторів.

Методом фотоіндукованої струмової електроскопії як інформативного діагностичного методу досліджувались нормальні польові транзистори Шотткі, виготовлені як тестові структури на основі GaAs-шарів, осаджених на моно-Si-підкладах. Концентрація носіїв заряду в активному шарі $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, ширина каналу 0.15-0.2 мкм, довжина каналу 0.65 мкм, яка сформована субмікронною технологією ВІС з використанням висококонтрасної літографії. Як опори стік-витоків контактів використовувались плівки АКГ-1-1, осаджених магнетронним способом товщиною 1.2 мкм, ці ж плівки склали затворну систему.

Структура ПТШ представлена на рис. 1. Вплив оптичного випромінювання в діапазоні довжини хвиль 0.9-1.8 мкм на характеристики ПТШ досліджувались з використанням установки фотонного відпалу “Імпульс 3М”, а електрофізичні параметри активної і пасивної області досліджувались на основі діагностичних методів, розроблених авторами для субмікронної технології

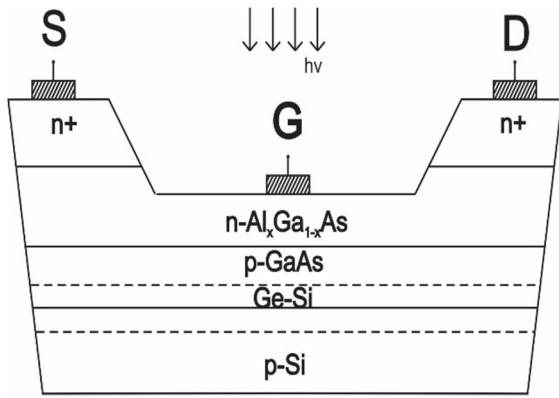


Рис. 1. Структура гетероперехідного ПТШ.

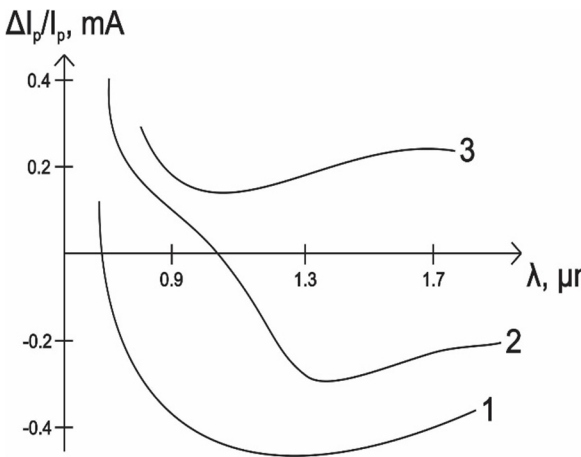


Рис. 2. Спектральні залежності зміни фотоструму стоку ПТШ на основі газоепітаксійних шарів (1,2) та іонно-легованих (3) структур.

ВІС. Спектральні характеристики струму стоку (рис. 2) вказують на наявності групи глибоких центрів з енергією порядку 0.72-0.91 eВ. На основі аналізу фоточутливості GaAs готових ПТШ(ТС) розраховувалися зміна провідності каналу, розраховані за формулою:

$$\Delta\sigma / (q \cdot \mu \cdot N_d \cdot L/l) = F(t - w(U_{sh})),$$

які були сформовані в двох варіантах: а) газоепітаксійних шарів і б) іонно-легованих багатозарядною імплементацією шарів.

Як було встановлено із аналізу спектральних характеристик струму стоку, для першого варіанту газоепітаксійних структур ПТШ характерним є присутність глибоких центрів-акцепторів, що дають для транзисторів позитивний тангенс кута нахилу (рис. 3) криві 1, 4, де струм стоку при освітленні: випромінюванням в домішковій смугі поглинання зменшується. Тут при зміщенні напруги на затворі від нуля до напруги відсічки перехід забезпечує шар об'ємного заряду на бар'єрному контакті Шотткі.

І як було показано із спектральної залежності струму стоку вже для другого варіанту — іонно-легованих ПТШ характерно присутність глибоких донорних рівнів і експериментально це видно на вихідних характеристиках ПТШ(рис. 3, криві 2, 3), де вже є від'ємний тангенс кута нахилу. Для глибоких донорних рівнів вже є характерне в основному

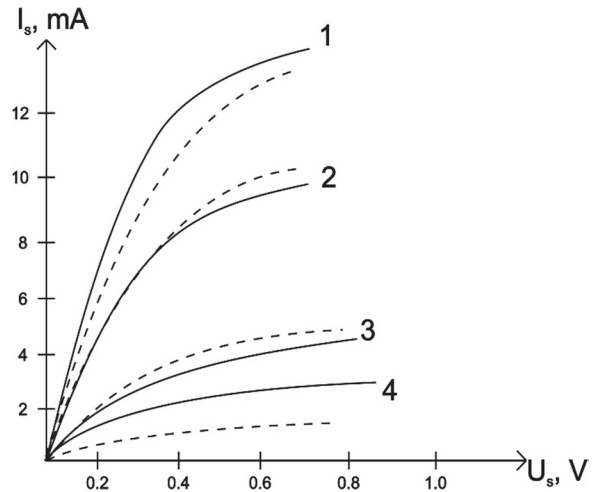


Рис. 3. Вихідні ВАХ ПТШ на основі газоепішарів (4) і іонно-легованих гетерошарів GaAs (2, 3) без освітлення неперервне і з освітленням штриховані.

переходи електронів з глибоких рівнів в зону провідності (прямі переходи), що і приводить до фотоіонізації глибоких рівнів, тут густина об'ємного заряду в гетеропереході зростає, викликаючи зменшення ширини забороненої зони, тут вже проходить при освітленні в області домішкового поглинання при певній напрузі на затворі до зміщення каналу.

Висновки

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- Спектральні залежності фотоструму стоку ПТШ, затвору при управлінні струмом стоку як прямим, так і тильним затвором на основі газоепітаксійних (1,2) та іонно-легованих (3) структур (рис. 2), вказують на наявність глибоких центрів одного типу в шарі об'ємного заряду під затвором і дипольному шарі на межі розділу активний шар GaAs і Si-підкладка.

- Експериментальні залежності від довжини каналу ПТШ мають різний нахил на основі іонно-легованих та газоепітаксійних структур ПТШ, що вказує на різну фізичну природу глибоких рівнів, які вносять нестабільність у вихідні характеристики транзистора (рис. 3).

- Введення буферного шару германію (рис. 1) між епітаксійним шаром GaAs та монокремнієвою підкладкою демонструє позитивний ефект генерування таких глибоких акцепторно-донорних центрів, що дозволяє на порядок покращити стабільність вихідних характеристик ПТШ обох видів технології їх формування. Це відповідно відображає можливості формування комплементарних МОН-транзисторів на арсеніді галію.

- Визначені основні механізми фізичних процесів, які є відповідальними за стабільність струму стоку ПТШ та дозволяє формувати тестові

структури для електрофізичного діагностування в субмікронній технології ВІС.

– Фотостимульована газова епітаксія GaAs та багатозарядна імплементація формування затворної системи ПТШ дають можливість поставити на серійне виробництво субмікронну технологію епішарів GaAs на моно-Si-підкладках структур ВІС високої швидкодії і завадостійкості.

– Дана технологія дозволить на одному кристалі формувати кремнієві та арсенід-галієві транзистори (біполярні і польові) в аналогових, цифрових та

силових схемах ВІС. В цьому і полягає її оригінальність.

Новосядлий С.П. – д.т.н., професор кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;
Грига В.М. – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;
Павлишин А.В. – студент;
Луковкін В.М. - аспірант.

- [1] Mizutani T. Photo-Induced Current Spectroscopy for Normally-Off GaAs MESFETs (Japanese Journal of Applied Physics, 1982).
- [2] V.I Sen'ko, M.V Panasenko, Electronics and microcircuitry (Oberehy, Kyiv, 2000).
- [3] M. Shur, Modern devices based on GaAs (Mir, Moscow, 1991).
- [4] F. Tian, E.F. Chor, Thin Solid Films 518(24), 121 (2010).
- [5] M.J. Sikder, P. Valizadeh, Solid-State Electronics 89, 105 (2013).
- [6] V.A. Moskalyuk, D. I. Timofeev, A.V. Fedyaj, Ultrafast electronic devices (NTUU KPI, Kyiv, 2012).

S.P. Novosyadlii, V.M. Gryga, A.V. Pavlyshyn, V.M. Lukovkin

Photosensitivity of MESFETs on Epitaxy Layers of GaAs with Monocrystalline Silicon Wafer

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, kkie@pu.if.ua

In this paper described researched essentials and physical mechanisms which determine photosensitivity of MESFET on epitaxy layers of GaAs with monocrystalline silicon wafer under their illumination in impure zone absorption spectrum. Conducted experiments showed that source current changing with the type of deep centers, change of value is determined by two factors: change width of volumetric charge barrier contact layer and width of dipole layer on border section of active heterojunction layer of Si-wafer.

Keywords: electronics, LSI, Schottky FET, electroscopy, GaAs.