

Оксанич А.П.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Когдась М.Г.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Палагін В.А.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Донських О.В.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Ситник В.Ю.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Артеменко В.О.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

РОЗРОБКА СЕНСОРНИХ МАТРИЦЬ НА ПОРУВАТИХ НАПІВПРОВІДНИКАХ ДЛЯ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ

У статті проведено дослідження частотних залежностей ємності багатошарової структури матричних сенсорів з товстими шарами поруватого напівпровідника в умовах вакууму та газового середовища (водень, вуглекислий газ), визначено, що у вакуумі ємність мало змінюється при варіації частоти. При переміщенні датчика у середовище H_2 або CO_2 з концентрацією від 100 до 10000ppm $C(f)$ -характеристики матричного сенсору зміщуються у бік великих значень ємності, а при збільшенні концентрації ємність слабо залежить від частоти в області малих частот і значно змінюється при 10^3 Гц. Чим вище концентрація, тим більше високочастотну область зміщується ділянку різкого зростання ємності. Шляхом математичного моделювання розроблено еквівалентну схему структур із товстими шарами ПК в змінному струмі, що описує ємнісні властивості та враховує роль адсорбованих полярних молекул на стінках пір. Показано, що у області високих частот визначальний вклад у ємність дає ємність шару поруватого напівпровідника, а в області малих частот – ємність гетеро-переходу поруватий напівпровідник/метал. Отримано параметри, що визначають частотні та часові параметри контакту з бар'єром Шоттки, і постійною часу. Запропоновано апроксимацію можна використовувати при побудові кривих, апроксимуючих залежностей. Також запропоновано метод обробки сигналів від поруватих матричних сенсорів, який відрізняється застосуванням полігармонійного живлення з налаштованим набором частот, що дозволяє звести ємність вимірюваної структури до ємності шару поруватого напівпровідника та безпосередньо вимірювати величину діелектричної проникності поруватого шару. Важливою особливістю способу є застосування широкого діапазону частот (10^2 - 10^6 Гц), при яких зміна $C(\omega)$, зумовлена адсорбцією газів, та враховує лише повільні процеси струмоперенесення в газочутливому напівпровідниковому матеріалі, що визначає відповідну зміну елементів еквівалентного електричного ланцюга, в тому числі C_{PE} .

Ключові слова: матриця, серсор, газ, полігармонійний сигнал, вольт-фарадна характеристика.

Постановка проблеми. Для контролю технологічних середовищ та безпеки виробництва, необхідні системи контролю концентрації газів. Зазвичай такі системи включають в себе матрицю з газочутливих елементів та пристрій обробки сигналу. В якості датчиків сенсорних систем можуть використовуватися напівпровідникові матеріали. У даний час, для цих цілей широко використову-

ються сенсори на основі напівпровідників. Недоліком таких сенсорів є недостатньо високий діапазон робочих температур, їх низька селективність і стабільність. Особливо перспективними є розробки на поруватому GaAs, оскільки робота напівпровідникового сенсора тим ефективніше, чим більше розвинена поверхня кристалу. Одним із напрямків застосування поруватого GaAs є виготовлення

сенсорів газу, які можуть працювати при кімнатній температурі і мають підвищену швидкодію.

Незважаючи на інтенсивне дослідження властивостей поруватого напівпровідника, таких як ємність, електропровідність, фотолюмінесценція та велика площа питомої поверхні, що забезпечує високу хімічну активність матеріалу, до і після впливу газових середовищ, сенсорні, оптичні та електрофізичні властивості вивчені недостатньо. Тому виникає необхідність отримання параметрів контакту Шотткі, які в свою чергу визначаються його вольт-амперними характеристиками (ВАХ) та вольт-фарадними характеристиками (ВФХ). Створення таких сенсорів актуально, так як дозволить вирішувати комплексну задачу моніторингу атмосфери, контроль технологічних середовищ і безпеки промислового виробництва з використанням пристроїв електроніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, детектування наявності шкідливих газів або парів у навколишньому середовищі може ґрунтуватися на різних фізичних принципах. Виділяють, зокрема, електрохімічні, термохімічні, калориметричні, спектроскопічні методи контролю, а також методи контролю на основі механічного та ядерного магнітного резонансу [1].

Численні дослідження показали, що багато з властивостей поруватого шару напівпровідника, такі як інтенсивність фотолюмінесценції, ємність, електропровідність, коефіцієнт відбиття, інфрачервоне поглинання, резонансна частота резонатора [2] роблять перспективним його використання у сенсорах газів. Останні дослідження зосереджуються в основному на інтеграції поруватих шарів напівпровідника в сенсорні структури, що демонструють вдосконалені архітектури резисторного та транзисторного типу, сенсорні на основі діодів Шотткі та р-п переходу, що показано на рис. 1, а також хімічній обробці поверхні (наприклад, силанізації, карбонізації, металізації тощо) з метою підвищення чутливості, вибіркової та надійності. Сенсори газів з бар'єром Шотткі працюють за високих температур, вони є швидкими пристроями, дозволяють контролювати появу H_2 у навколишній атмосфері. Як правило, струм зростає лінійно зі збільшенням концентрації газу. Остання функція важлива для розробки вимірювальних пристроїв.

Діоди Шотткі мають унікальні електричні характеристики, які відрізняють їх від звичайних випрямляючих діодів:

- низьке значення прямої і зворотної напруги;
- високі показники струму витоку;

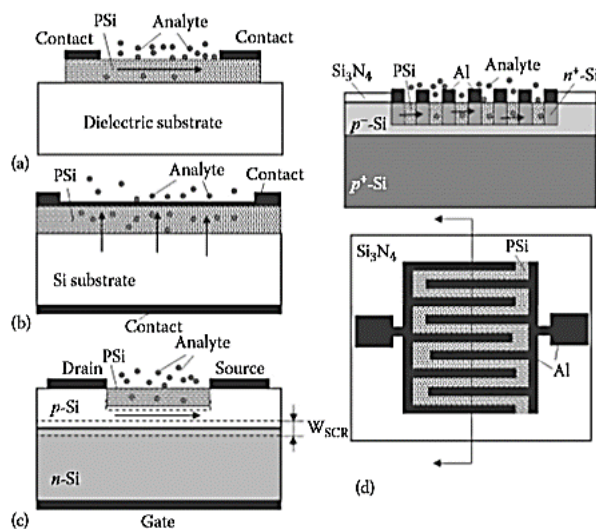


Рис. 1. Архітектури резисторного (а) та транзисторного сенсорів (с), сенсорів на основі діодів Шотткі (b) та р-п переходу (d)

– фактична відсутність заряду зворотного відновлення.

Сенсори на основі Si мають перевагу низької вартості та високорозвиненої технології, тоді як складені напівпровідникові пристрої виявляють перевагу більш високої чутливості, швидшого реагування та підвищення робочих температур [3]. Багато авторів повідомляють про сенсори на основі GaAs з забороненою зоною 1,43 eV [4, 5] для визначення газів.

Для багатьох напівпровідників III-V групи, висота бар'єру не завжди відповідає теорії через велику щільність поверхні, що викликає забруднення рівня Фермі [6]. Freeouf та ін. [7] запропонували ефективну модель роботи виходу, яка підкреслює роль проміжного шару, утвореного реакцією між металом та GaAs для визначення висоти бар'єру. Однак, деякі дослідники виявили, що забруднення рівня Фермі не відбувається, коли з'єднання метал-GaAs виготовлено на чистих (100) поверхнях GaAs [8].

Було багато повідомлень про ефективність діодів Шотткі на основі каталітичних металів (Pt і Pd)/GaAs для визначення різних газів, таких як водень [9, 10] та ін. Салехі та ін. [11] успішно виготовили сенсори на основі діодів Шотткі з $In_2O_3-Sn/GaAs$ для визначення CO. Ці сенсори спрацьовували в режимі прямого зміщення і відгук на газу був пов'язаний зі зниженням роботи виходу металу та бар'єру Шотткі у з'єднанні метал/GaAs.

Підвищення чутливості поруватого сенсора пояснювалося морфологією поверхні і було роботою двох параметрів: площі поверхні та щільності

порожнин між стінками пір (кількість пір, що важливо в каталізаторах). Також були досліджені характеристики вимірювання діодів Шотткі на основі Pd/porous GaAs та Au/porous GaAs у порівнянні з сенсорами на основі Pd/GaAs та Au/GaAs відповідно. Було встановлено, що сенсор Au/porous GaAs був дуже чутливий до газів CO та NO, в той час як сенсор Au/GaAs реагував на ці гази незначно. Значне зниження напруги пробую сенсор на основі Au/porous GaAs було зумовлено високою поруватістю структури Au/porous GaAs при появі великих електричних полів у верхній частині поруватого матеріалу.

У роботі [12] було досліджено вольт-фарадні характеристики діода Шотткі Pd/porGaAs і було показано, що висота бар'єру в атмосфері водню збільшується, при цьому збільшується і ємність. Отже, збільшення ємності як у Pd/porGaAs не може бути пов'язане зі зменшенням ширини області об'ємного заряду, а тільки з накопиченням зарядів у структурах.

У роботі [13] авторами запропоновано систему на основі виготовлених окремих сенсорів на поруватому кремнію, показано, що сенсорні елементи отримані з керованими параметрами, характеризуються суттєвим розкидом перетворювальних характеристик в системі координат “повний імпеданс-частота”. Крім того, при дії на матрицю різними концентраціями заданих газових сумішей, спостерігається кореляційна залежність індивідуального імпедансного спектру сенсора з концентрацією даного типу газу.

Постановка завдання. Під терміном матричний сенсор розумітимемо об'єднану групу сенсорів, виготовлених на одній підкладці поруватого напівпровідника (рис. 2).

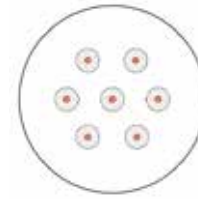


Рис. 2. Схематичне зображення матричного сенсора на поруватому напівпровіднику

У даній роботі кремнієві пластини n-типу SEP-10 (111). Діаметр платини становив 76 мм, а товщина – 420 мкм. Всього було виготовлено 4 зразка [14].

При виготовленні матричного сенсора на пластину напівпровідника з тильної сторони наносять контакт Au/Ge-Ni-Au, а з протилежної сторони формують електрохімічним методом сім поруватих шарів діаметром 10 мм, з однаковими режимами травлення імпульсним струмом. На кожен поруватий шар напильють контакт пладію діаметром 3 мм.

Основною задачею є розробка установки та способу аналізу концентрації газів шляхом вимірювання частотної залежності (спектру) вольт-фарадних характеристик $C(\omega)$ сенсорних елементів на основі поруватих напівпровідників з полігармонічним живленням при впливі різних газів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Весь процес автоматизації визначення та аналізу параметрів сенсорних елементів можна розділити на три етапи: узгодження сигналів, формування моделей, збереження і виведення даних. Схема електрична структурна системи визначення та аналізу параметрів матричних сенсорних елементів на рис. 3 [15].

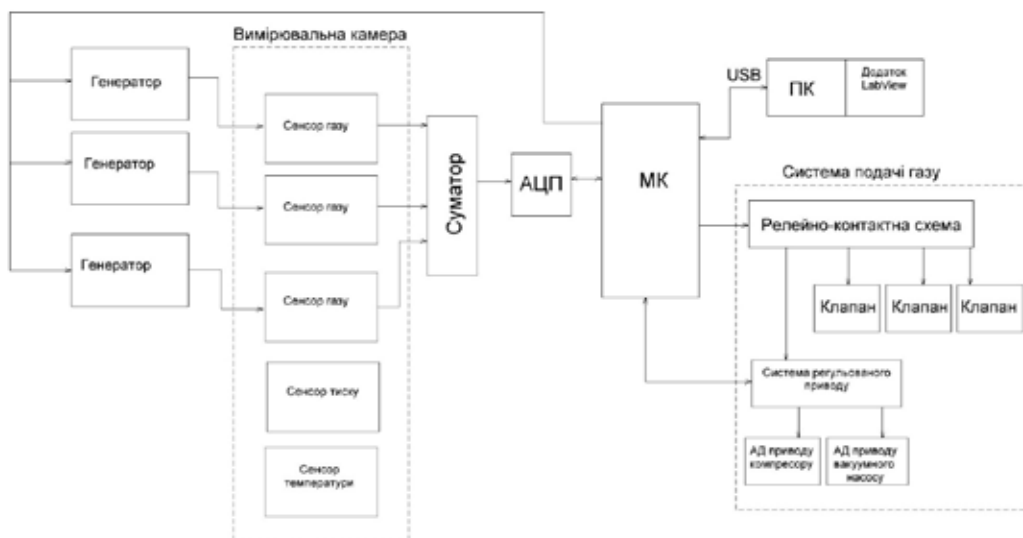


Рис. 3. Схема електрична структурна системи визначення та аналізу параметрів матричних сенсорних елементів

Апаратна частина комплексу включає:

- вимірювальну камеру;
- сенсорний елемент на основі діодів Шотткі, що утворюється поруватими плівками GaAs, сенсори тиску та газу, сенсор струму та напруги;
- блок узгодження та управління, що включає перетворювач інтерфейсів;
- пристрій збору даних;
- ПК з програмним забезпеченням та послідовним інтерфейсом USB.

До мікроконтролерної системи послідовно підключений перетворювач інтерфейсів «струмова петля-напруга» та сенсор струму та напруги по інтерфейсу I²C. Блок узгодження та управління забезпечує регулювання клапанів, двигуна насоса при надходженні необхідного значення сигналу для відкачування і напуску атмосфери. У якості об'єкта вимірювань використовується сенсорний елемент на основі діодів Шотткі, заснований на методі прямого перетворення. Цей пристрій використовується для перетворення вимірюваної величини, де кожному значенню $\{y\}$ відповідає значення величини результату вимірювання $\{x_p\}$. За допомогою формули (1) розраховується результат вимірювання методом прямого вимірювання:

$$x_p = \{x_p\} [x], \quad (1)$$

де $\{x_p\}$ – значення величини результату вимірювання, відраховане безпосередньо з показань вимірювального пристрою; $[x]$ – одиниця вимірювання фізичної величини.

Вимірювання ємності досліджуваних структур було проведено в частотному діапазоні $f = 10^2$ - 10^6 Гц. Амплітуда змінної напруги становила 0,1 В. Дослідження проводилися в умовах вакууму, в газовому середовищі водню, вуглекислого газу та на повітрі. Було помічено, що вакуумне відкачування призводить до зменшення величини ємності, що свідчить про вплив повітря та газів на ємнісні параметри вимірюваних структур. На рис.4 для кімнатної температури представлені типові $C(f)$ характеристики для кількох зразків, сформованих кремнію p-типу провідності. Як впливає з наведеного малюнка, спостерігається однаковий вид залежності $C(f)$. Місткість структури в області великих частот була мінімальною і слабо залежала від величини f . При зменшенні частоти інтервалі 10^2 - 10^5 Гц ємність збільшилася кілька порядків, а області малих частот (менше 10^2 Гц) знову слабо залежала від f . Додаткові дослідження, проведені в інтервалі 1-25 МГц, показали, що ємність при цих частотах трохи зменшувалася зі зростанням f і ця зміна для крайніх точок частотного інтервалу склала 10-20%.

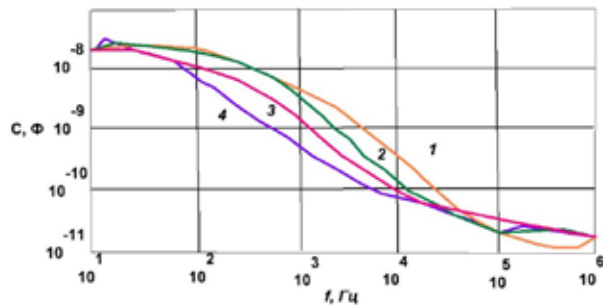


Рис. 4. Залежність ємності структур від частоти для ПК, сформованого на p⁺-Si (4). dПК: 1 – 106 мкм, 2 – 86 мкм, 3 – 67 мкм, 4 – 109 мкм.

Це можна пояснити так. В області високих частот ($f > 1$ МГц) ємність тестової структури визначається найменшою ємністю в системі послідовно з'єднаних конденсаторів (рис.5, а) – ємністю шару ПК (C2). При зниженні частоти в результаті частотної залежності ємність конденсатора C2 може підвищуватися і наближатися до ємності конденсатора, що має мінімальне значення набору C1, C3, C4. У тому випадку, коли ємність C2 перевищить другу за величиною децимі ємність у ланцюжку послідовно з'єднаних конденсаторів, ємність усієї структури визначатиметься вже конденсатором з мінімальною ємністю з ряду C1, C3, C4. Найбільш ймовірно, що такою ємністю є ємність переходу ПК/МК (C3). Саме ємність збідненого шару на межі пористий шар/кремнієва підкладка найчастіше використовується при аналізі ємнісних властивостей структур з ПК [16]. Прямим експериментальним доказом цього є вид вольт-фарадних характеристик (ВФХ), виміряної на тестових зразках у сфері малих частот, що відповідає виду ВЕХ переходу ПК/МК [16]. Таким чином, ступінчастий вид залежності $C(f)$ може бути обумовлений визначальним вкладом ємності шару ПК (C2) в області високих частот, ємності переходу ПК/МК (C3) при низьких частотах та спільним вкладом ємностей C2 та C3 при проміжних значеннях f .

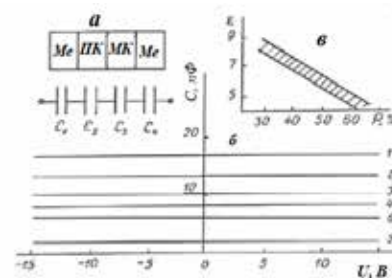


Рис. 5. а-структура Me/ПК/МК/Me та її еквівалентна ємнісна схема; б-типіві ВЕХ структур на основі Si, легованого бором (1-4), фосфором (5), сурмою (6): 1-P=67%, dПК=67 мкм, 2 – P=66%, dПК=86 мкм, 3 – P = 65%, dПК = 100 мкм, 4 – P = 68%, dПК = 110 мкм, 5 – dПК = 140 мкм, 6 – dПК = 165 мкм; зразки 1-4 отримані на КДБ-0,03 за однакових умов анодування протягом різного часу; в – залежність діелектричної проникності ПК від величини вагової пористості.

На рис. 6 і 7 представлені зміни залежності $C(f)$ від газового середовища, в яке вони були поміщені для зразків з товстими шарами ПК, отриманими на підкладках n^+-Si , відповідно. Як випливає з наведених рисунків, має місце однаковий характер зміни $C_{(f)}$ H_2 і CO_2 . У вакуумі ємність мало змінюється при варіації частоти. При приміщенні датчика в середу H_2 або CO_2 з концентрацією від 100 до 10000ppm $C_{(f)}$ - характеристики структури зміщуються у бік великих значень ємності, а при збільшенні концентрації ємність слабо залежить від частоти в області малих частот і значно змінюється при 10^3 Гц.

При аналізі експериментальних результатів було розглянуто різні фізичні моделі, серед яких найкращий збіг з експериментом показала запропонована нами комбінована модель, що враховує ємнісні властивості переходу ПК/МК і що розглядає наявність адсорбованих полярних молекул на поверхні пор. Загальна еквівалентна схема такої моделі показано на рис.7. Вона включає дві послідовно з'єднані схеми, одна з яких описує електричні властивості ПК за наявності адсорбованих молекул на стінках пор (СПК), а друга враховує властивості гетеропереходу ПК/МК (СПП). У схемі використані такі позначення: C_1^* – ємність шару ПК, R_1^* – опір шару ПК, C_2^* - ємність, що враховує роль адсорбованих молекул, R_2^* – опір, пов'язаний з адсорбованими атомами, C_3^* та R_3^* - ємність та опір переходу ПК/МК. Важливо відзначити, що за своєю фізичною суттю розглянута модель відноситься до відсутності повітряного середовища (вологого повітря) в обсязі пір, коли не відбувається формування суцільного каналу провідності по стінках пір, що має місце, наприклад, датчиках вологості на постійному струмі. Ця модель відповідає вакуумним умовам і бере до уваги лише адсорбовані молекули та атоми, вакуумної десорбції яких не відбувається. Ідеологія опису ролі адсорбованих атомів на стінках пір як послідовно з'єднаних C_2^* і R_2^* . У цьому випадку результуюча ємність всього ланцюжка (C) запишеться

$$1 / C = 1 / C_{ПК} + 1 / C_{ПП}, \quad (2)$$

$$C_{ПК} = C_1^* + C_2^* / [1 + (\omega C_2^* R_2^*)^2], \quad (3)$$

$$C_{ПП} = C_3^* [1 + (\omega C_3^* R_3^*)^2] / (\omega C_3^* R_3^*)^2, \quad (4)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (5)$$

де ω – кругова частота, f – частота в Герцах. Формула (2) взята з роботи [13], формула (4) – з [17].

У запропонованій еквівалентній схемі є 6 невідомих параметрів, тому повний детальний аналіз

для всього інтервалу залежностей $C(f)$, представлених на рис.6 – 7, на підставі ф.(2) – (5) виявляється затрудненим. Завдання полегшується у разі, коли залежність ємності структури від частоти має вигляд плавної сходинки, що у області низьких частот (рис.6). За цих умов області мінімальної частоти ємність структури визначається ємністю переходу ПК/МК СПП, а за максимальної частоти – ємністю СПК, де визначальна роль належить ємності $C1^*$. Невідомі параметри $C1, C2, C3, R1, R2$ і $R3$ можуть бути визначені наступним чином. Ємність $C1^*$ – з ділянки $C(f)$ - характеристики в області великих частот, $C2^*$ – із частотної залежності динамічної провідності, $C3^*$ та $R3^*$ – з лінійних діаграм $R(1/C)$ [7] (R та C – провідність і ємність всієї структури на певній частоті), $R1^*$ – зі статичної ВАХ структури в області малих зсувів (із загального опору віднімається внесок $R3^*$), $R2^*$ – із частотної залежності динамічної провідності в області високих частот.

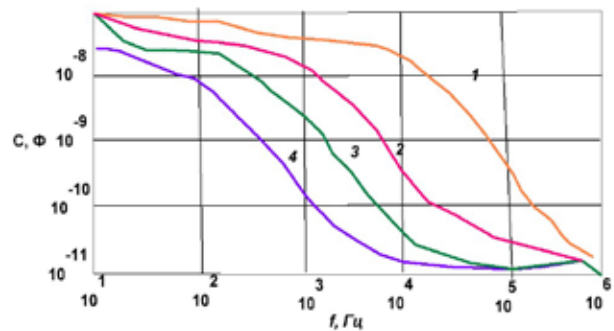


Рис. 6. Залежність $C(f,T)$ для тестової структури в газовому середовищі водню. Товщина шару ПК – 106 мкм, пористість – 65%.

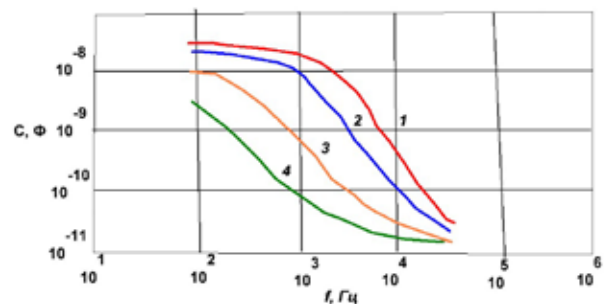


Рис. 7. Залежність $C(f,T)$ для тестової структури в газоваому середовищі вуглекислого газу. Товщина шару ПК – 91 мкм, пористість – 52%

Як конкретний приклад розглянемо зразок ПК, представлений на рис. 8 (крива 1). Набір параметрів для еквівалентної схеми такого зразка за кімнатної температури наведено в табл. 1.

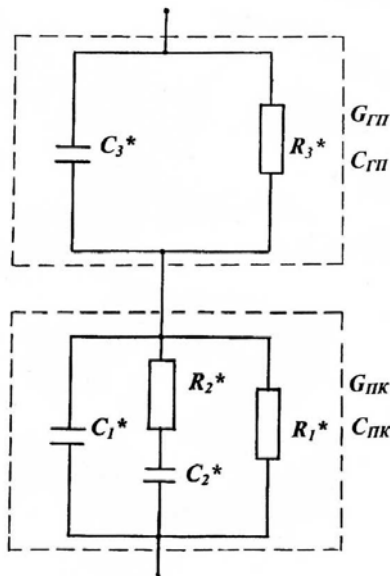


Рис. 8. Еквівалентна схема для опису електричних властивостей структур із товстими шарами ПК на змінному струмі

Таблиця 1

Параметри еквівалентної схеми для одного із зразків ПК

C_1^* , Ф	C_2^* , Ф	C_3^* , Ф	R_1^* , Ом	R_2^* , Ом	R_3^* , Ом
$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	10^7	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^5$

Важливо відзначити, що зазначені величини (за винятком C_2^*) визначені безпосередньо з експерименту без застосування підгоночних процедур. Лінійна діаграма Бермана для зразка зображено на рис.9. З таблиці слід, що опір пористого шару R_1^* набагато перевершує опір переходу R_3^* , і при вимірі на постійному струмі основний внесок у опір структури дійсно вносить опір шару ПК. На рис.10 наведено теоретичну залежність $C(f)$ (крива 2), побудована при даному наборі параметрів на підставі рис. 6 та 7, яка добре описує загальний вигляд експериментальної залежності (крива 1). Подібна хороша відповідність експериментальних та теоретичних кривих $C(f)$ була отримана нами та для інших структур з товстими шарами ПК, що підтвердило працездатність запропонованої еквівалентної схеми (рис. 8).

Фізичні процеси, що відбуваються в досліджуваних шарах ПК частотному інтервалі 10^1 - 10^6 Гц, на підставі проведеного аналізу можуть бути описані наступним чином. У вакуумі ємність структури повністю описується ємністю шару ПК, яка залежить від частоти (рис.9, рис.10). Останнє пов'язане з відсутністю впливу адсорбованих атомів, обложених на стінках пір. При приміщенні в газове середовище від 100 до 10000ppm ємність структури починає зростати, причому в області високих частот це

збільшення незначне, а в області низьких частот може досягати кількох порядків. Це пов'язане із зростаючим вкладом адсорбованих молекул, що призводить до збільшення ємності шару ПК. Чим вище концентрація, тим більше високочастотну область зміщується ділянку різкого зростання ємності. Свій вклад у цей процес вносить зменшення опору R_2^* при підвищенні температури. При подальшому підвищенні концентрації газів ємність структури області низьких частот виходить на ділянку слабої зміни ємності при зміні частоти, що з визначальною роллю ємності переходу напівпровідник/метал.

Результати досліджень дозволяють пояснити ефект аномально сильної зміни діелектричної проникності ПК при варіації концентрації молекул. Існування додаткової фази в ПК може бути пов'язане з наявністю молекул газів в обсязі пор, а у вакуумних умовах – з вкладом адсорбованих молекул на стінках пор. Якщо в досліджуваних пористих структурах взяти до уваги присутність цих двох факторів, то їх роль і стає визначальною в “аномальній” зміні діелектричної проникності ПК.

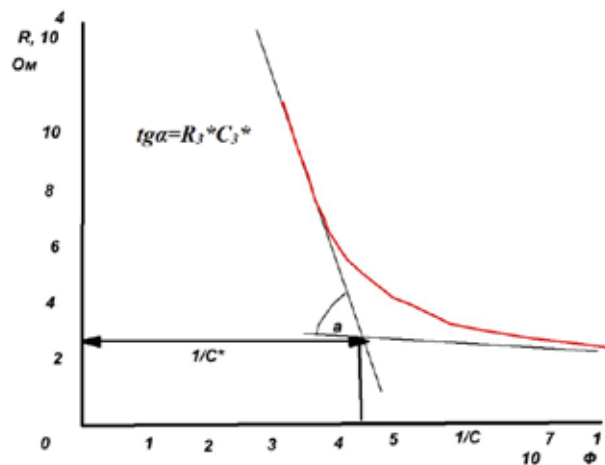


Рис. 9. Лінійна діаграма Бермана для зразка, описаного на рис.7 (крива 1), виходячи з якої визначаються величини R_3^* і C_3^*

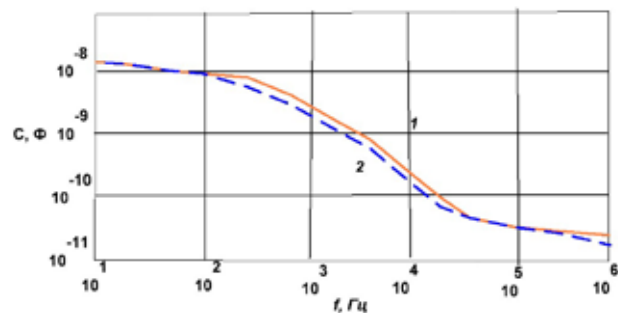


Рис. 10. Експериментальна (крива 1) та теоретична (крива 2) залежності $C(f)$ при кімнатній температурі в вакуумі для одного із зразків ПК. Підкладка – КДБ-0,03, товщина ПК – 106 мкм, пористість 65%

Висновки. Проведено дослідження частотних залежностей ємності багат шарової структури з товстими шарами поруватого напівпровідника в умовах вакууму та газового середовища, що дозволило визначити зростання ємності структури, причому в області високих частот це збільшення незначне, а в області низьких частот може досягати кількох порядків. Шляхом математичного моделювання розроблено еквівалентну схему структур із товстими шарами ПК в змінному струмі, що описує ємнісні властивості та враховує роль адсорбованих полярних молекул на стінках пір. Показано,

що у області високих частот визначальний вклад у ємність дає ємність шару поруватого напівпровідника, а в області малих частот – ємність гетеро-переходу поруватий напівпровідник/метал.

Отримав подальший розвиток метод обробки сигналів від поруватих плівкових сенсорів, який відрізняється застосуванням полігармонійного живлення з налаштованим набором частот, що дозволяє звести ємність вимірюваної структури до ємності шару поруватого напівпровідника та безпосередньо вимірювати величину діелектричної проникності поруватого шару.

Список літератури:

1. Korotcenkov G., Cho B.K. Porous semiconductors: Advanced material for gas sensor applications. Crit. Rev. Sol. St. Mater. 2010. P. 1–37.
2. Lee H. J., Lee C. H. Fabrication of NO₂ Gas sensors by using Au Schottky contacts on rough GaAs surfaces. Journal of the Korean Physical Society. 2010. Vol. 56, P. 639–642.
3. Potje-Kamloth K. Semiconductor junction gas sensors. Chemical Reviews. 2008. P. 367–399.
4. Nikfarjam A., Kalantari D. J. Experimental verification of theoretical analysis of Pd/porous-GaAs as a hydrogen sensor. Journal of Physics D: Applied Physics. 2008. Vol. 41. P. 1–6.
5. Когдась М. Г., Оксанич А. П., Холод О. Г., Притчин С. Е. Удосконалення методу створення контактів з бар'єром Шоттки до поруватого GaAs Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – Київ: Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського. 2018. Том 29 (68) № 6, частина 2. С. 228-234
6. Potje-Kamloth K. Semiconductor junction gas sensors. Chemical Reviews. 2008. P. 367–399.
7. Freeouf J. L., Woodall J. M. Schottky barriers: An effective work function model. Applied Physics Letters. 1981. P. 727–729.
8. Salehi A., Kalantari D. J., Goshtasbi A. Rapid response of Au/Porous-GaAs humidity sensor at room temperature. Proceedings of Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices. 2006. P. 125–128.
9. Cheng S.-Y. A hydrogen sensitive Pd/GaAs Schottky diode sensor. Materials Chemistry and Physics. 2003. P. 525–528.
10. Salehi A., Nikfarjam A., Kalantari D. J. Pd/porous-GaAs Schottky contact for hydrogen sensing application. Sensors and Actuators, B: Chemical. 2006. Vol. 113. P. 419–427.
11. Salehi A., Kalantari D. J. Characteristics of highly sensitive Au/porous-GaAs Schottky junctions as selective CO and NO gas sensors. Sensors and Actuators, B: Chemical. 2007. Vol. 122. P. 69–74.
12. Weichsel C., Pagni O., Leitch A. W. R. Electrical and hydrogen sensing characteristics of Pd/ZnO Schottky diodes grown on GaAs. Semiconductor Science and Technology. 2005. Vol. 20, P. 840–843.
13. Монастирський Л., Яремик Р., Оленич І., Парандій П. Багатоелементні сенсорні системи на основі поруватого кремнію. Вісник Львівського ун-ту. Серія фізична. 2011. Випуск 46. С. 189-195
14. Оксанич А. П., Чебенко В. М., Притчин С. Е., Когдась М.Г., Мащенко М.А. Удосконалення методу отримання поруватих плівок GaAs з використанням нечіткого контролеру. Радиоелектроника и информатика. № 2(85) (2019). С. 4-8.
15. Оксанич А. П., Притчин С. Е., Когдась М.Г., Мащенко М.А., Остріковська Д. А. Розробка автоматизованої системи попередньої обробки сигналів з матричних сенсорів на поруватих напівпровідниках. Радиоелектроника и информатика. 2020. № 1. С. 10-14.
16. Dzhafarov T.D., Can B., Allahverdiev Z.A. Hydrogen-stimulated changes of properties of silver-porous silicon interfaces. Surface Science. 2001. P. 482–485.

Oksanych A.P., Kogdas M.G., Palagin V.A., Donskikh O.V., Sytnyk V.Yu., Artemenko V.O. DEVELOPMENT OF SENSOR MATRICES ON POROUS SEMICONDUCTORS FOR GAS CONCENTRATION CONTROL

In the article, a study of the frequency dependence of the capacitance of a multilayer structure of matrix sensors with thick layers of a porous semiconductor in vacuum and gaseous media (hydrogen, carbon dioxide) was carried out, and it was determined that the capacitance in a vacuum changes little with frequency variation.

When the sensor is moved to an H_2 or CO_2 environment with a concentration of 100 to 10,000 ppm $C(f)$ -, the characteristics of the matrix sensor shift towards large capacitance values, and when the concentration increases, the capacitance weakly depends on the frequency in the low frequency range and changes significantly at 10^3 Hz. The higher the concentration, the more the area of sharp increase in capacitance shifts to the high-frequency region. Through mathematical modeling, an equivalent scheme of structures with thick PC layers in alternating current was developed, which describes the capacitive properties and takes into account the role of adsorbed polar molecules on the pore walls. It is shown that in the region of high frequencies the determining contribution to the capacitance is the capacitance of the porous semiconductor layer; and in the region of low frequencies – the capacitance of the porous semiconductor/metal heterojunction. The parameters determining the frequency and time parameters of the contact with the Schottky barrier and the time constant were obtained. The proposed approximation can be used when constructing curves, approximating dependencies. Also proposed is a method of processing signals from porous matrix sensors, which is characterized by the use of polyharmonic power supply with a set frequency set, which allows reducing the capacity of the measured structure to the capacity of the porous semiconductor layer and directly measuring the dielectric constant of the porous layer. An important feature of the method is the use of a wide range of frequencies (10^2 - 10^6 Hz), at which the change in $C(\omega)$ is caused by the adsorption of gases, and takes into account only the slow processes of current transfer in the gas-sensitive semiconductor material, which determines the corresponding change in the elements of the equivalent electric circuit, including C_{PE} .

Key words: matrix, sensor; gas, polyharmonic signal, volt-farad characteristic.