



**Журнал фізики
та інженерії
поверхні**

**Журнал физики
и инженерии
поверхности**

Том 2, № 1

Vol. 2, No. 1

**Journal of
Surface Physics
and Engineering**

2017

ISSN 2519-2493(Online)

ISSN 2519-2485(Print)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА
НАУКОВИЙ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР МОН та НАН УКРАЇНИ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Журнал фізики та інженерії поверхні

Журнал фізики и инженерии поверхности

ЗАСНОВАНИЙ У 2016 РОЦІ

ВИДАЄТЬСЯ 4 РАЗИ НА РІК

Journal of Surface Physics and Engineering

Том 2, № 1, січень – березень 2017

ХАРКІВ

«Журнал фізики та інженерії поверхні» висвітлює досягнення і проблеми плазмових, радіаційних, лазерних та комплексних фізичних технологій, а також дослідження процесів формування тонких плівок та модифікації поверхонь матеріалів, фізичних властивостей виникаючих структур, проблем економіки та підготовки кадрів у галузі високих технологій.

«Журнал физики и инженерии поверхности» освещает достижения и проблемы плазменных, радиационных, лазерных и комплексных физических технологий, а также исследования процессов формирования тонких пленок и модификации поверхностей материалов, физических свойств возникающих структур, проблем экономики и подготовки кадров в области высоких технологий.

«Journal of Surface Physics and Engineering» highlights the achievements and problems of plasma, radiation, laser and complex physical technologies as well as research of thin film formation and surface modification, physical properties of resulting structures, economic issues and education in the field of high technologies.

Редакційна колегія

Азаренков М. О. (головний редактор), Фаренік В. І. (перший заступник головного редактора), Береснев В. М. (заступник головного редактора), Турбін П. В. (заступник головного редактора), Удовицький В. Г. (відповідальний секретар), Агеєв Л. О., Андреев А. О., Бакай О. С., Бізюков О. А., Брагіна Л. Л., Воеводін В. М., Войцєня В. С., Гірка І. О., Гордієнко Ю. Є., Дзюбенко М. І., Дудін С. В., Довбня А. М., Єгорєнков В. Д., Єрмолаєв О. М., Жуковські П. (Люблін, Польща), Клепиков В. Ф., Ковтун Г. П., Кондратенко А. М., Костюк Г. І., Курода С. (Сенген, Японія), Лавриненко С. Д., Литвиненко В. В., Литовченко С. В., Милославський В. К., Мисаєлідес П. (Тесалоніки, Греція), Неклюдов І. М., Погребняк О. Д., Соболев О. В., Хороших В. М., Целуйко О. Ф.

Адреса редакції: НФТЦ МОН та НАН України, майдан Свободи, 6, м. Харків, 61022, а/с 4499, Україна

Тел. 38 057 7054667, e-mail: journal_pse@ukr.net, <http://www.pse.scpt.org.ua>

Редакционная коллегия

Азаренков Н. А. (главный редактор), Фареник В. И. (первый заместитель главного редактора), Береснев В. М. (заместитель главного редактора), Турбин П. В. (заместитель главного редактора), Удовицкий В. Г. (ответственный секретарь), Агеев Л. А., Андреев А. А., Бакай А. С., Бизюков А. А., Брагина Л. Л., Воеводин В. Н., Войцєня В. С., Гирка И. А., Гордиенко Ю. Е., Дзюбенко М. И., Дудин С. В., Довбня А. Н., Егорєнков В. Д., Ермолаєв А. М., Жуковски П. (Люблин, Польша), Клепиков В. Ф., Ковтун Г. П., Кондратенко А. Н., Костюк Г. И., Курода С. (Сенген, Япония), Лавриненко С. Д., Литвиненко В. В., Литовченко С. В., Милославский В. К., Мисаэлидэс П. (Тессалоники, Греция), Неклюдов И. М., Погребняк А. Д., Соболев О. В., Хороших В. М., Целуйко А. Ф.

Адрес редакции: НФТЦ МОН и НАН Украины, площадь Свободы, 6, г. Харьков, 61022, п/я 4499, Украина

Тел. 38 057 7054667, e-mail: journal_pse@ukr.net, <http://www.pse.scpt.org.ua>

Editorial Board

Azarenkov M. O. (Editor-in-Chief), Farenik V. I. (Vice Editor-in-Chief), Beresnev V. M. (Associate Editor-in-Chief), Turbin P. V. (Associate Editor-in-Chief), Udovytskyi V. G. (Executive secretary), Ageiev L. O., Andreiev A. O., Bakai O. S., Biziukov O. A., Bragina L. L., Dziubenko M. I., Dudin S. V., Dovbnia A. M., Girka I. O., Gordiienko Yu. Ye., Khoroshikh V. M., Klepikov V. F., Kovtun G. P., Kondratenko A. M., Kostyuk G. I., Kuroda S. (Sengen, Japan), Lavrinenko S. D., Lytvynenko V. V., Lytovchenko S. V., Miloslavsky V. K., Missaelides P. (Thessaloniki, Greece), Nekliudov I. M., Pogrebnyak O. D., Sobol O. V., Tseluiko O. F., Voievodin V. M., Voitsenia V. S., Yegorenkov V. D., Yermolaiev O. M., Zhukowsky P. (Lyublin, Poland).

Address: SCPT MES & NAS Ukraine, 6 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, box 4499, Ukraine
Tel. 38 057 7054667, e-mail: journal_pse@ukr.net, <http://www.pse.scpt.org.ua>

Затверджено до друку рішенням

Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, (протокол № 6 від 30 березня 2017 р.)

Вченої ради Наукового фізико-технологічного центру, (протокол № 3 від 29 березня 2017 р.)

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ 21918-11818Р від 18.01.2016.

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, оформлення, 2016

© Науковий фізико-технічний центр, оригінал-макет, 2016

Івацішин Ф. О., Григорчак І. І., Матулка Д. В.	
Електрофізичні властивості супрамолекулярних ансамблів InSe<CH ₄ N ₂ S>, InSe<FeSO ₄ > та InSe<CH ₄ N ₂ S<FeSO ₄ >>.....	4
Йулдашев Х. Т., Ахмедов Ш. С., Хайдаров З.	
Исследование инфракрасной фотографической системы на основе кремния, легированного платиной.....	12
Конотопский Л. Е., Копылец И. А., Севрюкова В. А., Зубарев Е. Н., Мамон В. В., Кондратенко В. В.	
Рост, структура и оптические свойства многослойных рентгеновских зеркал W/Mg ₂ Si.....	17
Жураев Н., Халилов М., Отажонов С., Алимов Н.	
Фоточувствительность и механизм протекания тока в гетероструктурах p-CdTe-SiO ₂ -Si с глубокими примесными уровнями.....	26
Сейдаметов С. В., Лоскутов С. В., Щетинина М. О.	
Влияние электрического потенциала на процесс деформирования алюминия в условиях испытаний кинетическим индентированием.....	30
Базалеев Н. И., Донец С. Е., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В., Лонин Ю. Ф., Пономарев А. Г., Уваров В. Т.	
Ударно-защитные поверхности алюминиевых сплавов, модифицированных сильноточным релятивистским электронным пучком.....	35
Тетелошвили М. Г., Джабуа З. У., Гигинеишвили А. В.	
Приготовление тонких пленок TmS и их электрофизические свойства.....	41
Йулдашев Х. Т., Ахмедов Ш. С., Рустамов У. С., Эргашев К. М.	
Исследование фонового излучения и возможности его ограничения в полупроводниковой ионизационной системе.....	44
Григорчак І. І., Івацішин Ф. О., Кулик Ю. О., Григорчак О. І.	
Антрацен між шарами неорганічного напівпровідника: відгук на електричне поле і освітлення.....	49
Зайцев Р. В.	
Діелектричний теплопровідний контакт для теплообмінника фотоенергетичної установки.....	59
<i>Правила оформлення статей.....</i>	65
<i>Правила оформления статей.....</i>	66
<i>Information for authors.....</i>	67

УДК: 537.226.8

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНИХ АНСАМБЛІВ $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}>$, $\text{InSe}<\text{FeSO}_4>$ ТА $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{FeSO}_4>>$

Ф. О. Іващин, І. І. Григорчак, Д. В. Матулка
*Національний університет «Львівська політехніка»,
Львів, Україна*

Надійшла до редакції 03.03.2017

У роботі представлені результати досліджень електропровідних властивостей супрамолекулярних ансамблів $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}>$, $\text{InSe}<\text{FeSO}_4>$ та $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{FeSO}_4>>$ в залежності від ступеня ієрархізації гостьового контенту. Зокрема показано, що впровадження тиосечовини між шари монокрystalа InSe приводить до 3-кратного зменшення дійсної частини комплексного питомого опору інтеркалату. Розрахунки показали, що саме впровадження тиосечовини приводить до значних змін: густини станів на рівні Фермі, довжини перескоку і розкиду пасткових центрів. Підтвердження розрахунків отримано при вимірюванні струмів термостимульованої деполяризації. Натомість впровадження сульфату заліза (II) приводить до появи явища «від'ємної ємності» при освітленні, що відкриває перспективу створення фотокерованих ліній затримки. Натомість коінтеркаляція тиосечовини та сульфату заліза (II) нівелює перелічені вище ефекти. Також досліджено магнето- та фоточутливість отриманих інтеркалатів.

Ключові слова: InSe , $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$, FeSO_4 , інтеркаляція, імпедансна спектроскопія.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫХ АНСАМБЛЕЙ $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}>$, $\text{InSe}<\text{FeSO}_4>$ И $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{FeSO}_4>>$

Ф. О. Иващин, И. И. Григорчак, Д. В. Матулка

В работе представлены результаты исследований электропроводящих свойств супрамолекулярных ансамблей $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}>$, $\text{InSe}<\text{FeSO}_4>$ и $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{FeSO}_4>>$ в зависимости от степени иерархии гостевого контента. В частности показано, что внедрение тиомочевини между слоями монокристалла InSe приводит к 3-кратному уменьшению действительной части комплексного удельного сопротивления интеркалата. Расчеты показали, что именно внедрение тиомочевини приводит к значительным изменениям: плотности состояний на уровне Ферми, длины перескока и разброса ловушек. Подтверждение расчетов получено при измерении токов термостимулированной деполяризации. Однако внедрение сульфата железа (II) приводит к появлению эффекта «отрицательной емкости» при освещении, что открывает перспективу к созданию фотоуправляемых линий задержки. Вместе с тем коинтеркаляция тиомочевини и сульфата железа (II) нивелирует вышеперечисленные эффекты. Также исследованы магнето- и фоточувствительность полученных интеркалатов.

Ключевые слова: InSe , $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$, FeSO_4 , интеркаляция, импедансная спектроскопия.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SUPRAMOLECULAR ENSEMBLES

$\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}>$, $\text{InSe}<\text{FeSO}_4>$ AND $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{FeSO}_4>>$

Ф. О. Иващин, И. И. Григорчак, Д. В. Матулка

The dependence of electric conductivity properties of supramolecular ensembles $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}>$, $\text{InSe}<\text{FeSO}_4>$ and $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{FeSO}_4>>$ on the hierarchization degree of guest component was established in the work. It was shown in particular, the insertion of thiourea into interlayer space of single crystal InSe results in 3 folded decrease in real component of specific complex impedance of intercalate in the work. As it was approved by calculation, the thiourea insertion leads to drastic changes in density of states at Fermi level, jump length and trap centers dispersion. Experimental results of thermodepolarizing current investigation confirmed calculations as well. At the same time Iron (II) Sulfate insertion leads to the negative capacitance effect at lighting, what opens a new view on photoregulated delay lines technologies. But the cointercalation of thiourea and Iron II Sulfate does not lead to above listed effects. Magneto- and photo- sensitivity of obtained intercalates was investigated.

Keywords: InSe , $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$, FeSO_4 , intercalation, impedance spectroscopy.

ВСТУП

Розвиток досліджень в області супрамолекулярної хімії вказує на важливість і перспективність цієї галузі науки. Вивченню фізичних властивостей супрамолекулярних архітектур і зокрема клатратів присвячена значно менша кількість робіт. Однак, їх аналіз дав змогу зробити висновок, що найбільш наближеними до практичного використання є результати досліджень напівпровідникових клатратів — фононних стекло, котрі є одними з найбільш перспективних термоелектричних матеріалів. В цьому випадку практично знайдено вирішення гіпотези Слека [1, 2] про формування структур, в яких слабозв'язані атоми, або молекули (гості) можуть коливатися в обмеженому об'ємі з частотою, яка забезпечує резонансне розсіювання фононів, забезпечуючи низьку теплопровідність при високій електропровідності по зв'язках господаря [3]. Що ж стосується інших фізичних аспектів супрамолекулярних ансамблів «господар-гість», то, насамперед, слід відзначити роботи присвячені розрахункам електронної структури (див., наприклад, [4]), або ж системам з перенесенням енергії шляхом збудження електронів (excitation energy transfer) [5].

Зовсім недавно нашій лабораторії вдалось успішно синтезувати супрамолекулярний ансамбль нової архітектури: субгосподар<господар<гість>> [6]. Ряд неординарних властивостей ієрархічних клатратів, безперечно актуалізували подальший розвиток досліджень, і вивчення залежності перебігу фізичних процесів від виду матриці субгосподаря, а також з'ясування впливу на них власне ієрархічності архітектури. Цьому і присвячена дана робота.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Беручи до уваги сьогоденний всезростаючий інтерес до нанофотоелектроніки і квантової когерентної спінтроніки поставлена мета роботи досягалася шляхом заміни молекулярно-граткового діелектричного SiO_2 -субгосподаря на фоточутливий напівпровідниковий квазі-двовимірний селенід індію (InSe).

Вирощені методом Бріджмена-Стокбаргера монокристали InSe (рис. 1) володіли

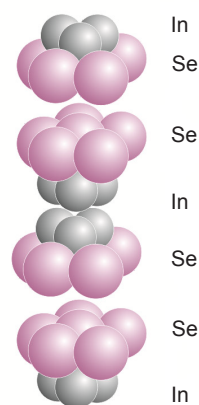


Рис. 1. Просторове зображення структури InSe

яскраво вираженою шаруватою структурою і n -типом провідності. Ширина забороненої зони селеніду індію складає 1,32–1,45 eВ, завдяки чому монокристал є фоточутливим у видимій області спектру. З іншої сторони, як добре відомо [7], InSe характеризуються шаруватою структурою і наявністю так званих «гостьових» позицій — орієнтованих перпендикулярно до кристалографічної осі C областей дії слабких сил Ван-дер-Ваальса. Така шарувата будова дозволяє шляхом інтеркаляції впровадити в означені «гостьові» позиції чужорідні іони, молекули чи атоми [8].

В якості проміжного господаря було обрано тіосечовину ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$), яка є одним з найпростіших тіоамідів (рис. 2). Завдяки нелінійним оптичним властивостям тіосечовина в даний час широко використовується в електронній промисловості, наприклад, як поляризаційні фільтри, електронні оптичні затвори, електронні модулятори, а також в якості компонент в електрооптичних і електроакустичних пристроїв. Крім того, тіосечовина широко використовується в різних електрохімічних процесах. [9].

В сполуках включення молекула тіосечовини утворює кристалічну структуру

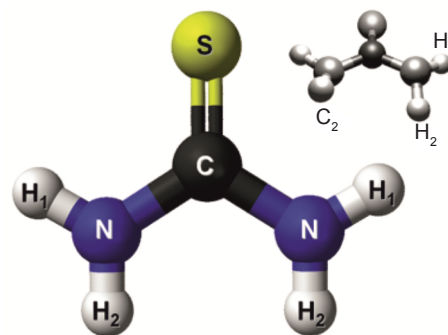


Рис. 2. Молекулярна структура тіосечовини

господаря, який має однонаправлені канали, що не перетинаються. Гостьові молекули можуть розташовуватись всередині цих тунелів. Для більшості молекул гостя структура ромбоєдрична (рис. 3) і гостьові молекули орієнтуються неупорядковано. У багатьох випадках ця ромбоєдрична структура перетворюється в моноклінну структуру при низьких температурах. Внутрішня поверхня тунелю тіосечовини далека від циліндричної, вздовж тунелів є звуження (діаметром $<5,8 \text{ \AA}$) і потовщення (діаметр $<7,1 \text{ \AA}$). Часто доцільно розглядати структуру тіосечовини, як господаря типу «клітки», а не типу «тунелю». Сполуки включення тіосечовини співмірні з гостьовими молекулами переважно розташованими в клітках, що відповідає двом молекулам гостей за одиницю повтору відстані структури тіосечовини вздовж тунелю і молярним відношенням гість/тіосечовина 1:3. [10]. Дипольний момент тіосечовини становить $18,86 \times 10^{-30} \text{ Кл}\cdot\text{м}$, а відносна діелектрична проникність тіосечовини — 2,224 [11].

Магніточутливим гостьовим компонентом використовували сульфат заліза (II) (рис. 4) [12]. Вибір FeSO_4 в якості гостьового компонента ґрунтувався на тому, що він є відомим прекурсором для синтезу наномагнетиту, а також тим, що його катіонна складова має великий спіновий магнітний момент. Це дає можливість для керування властивостями інкапсулатів (наприклад, поєднання фотоелектричних і феромагнітних властивостей), головним чином для забезпечення їх високої чутливості до зовнішніх фізичних полів.

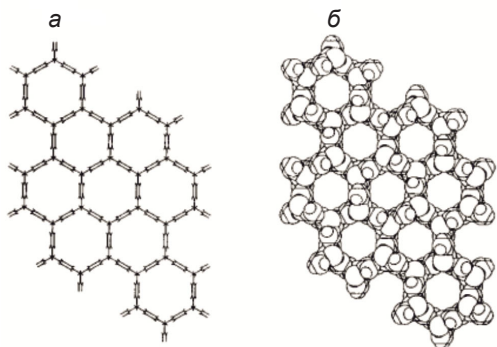


Рис. 3. Ромбоєдрична структура господаря тіосечовини без гостьових молекул: *a* — дев'ять повних тунелів із атомними радіусами, що дорівнюють нулю; *б* — дев'ять повних тунелів із Ван-дер-Ваальсовими радіусами атомів. Відстань між центрами сусідніх тунелів становить близько $9,2 \text{ \AA}$

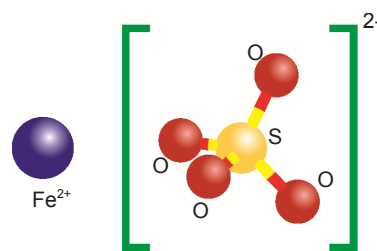


Рис. 4. Хімічна формула сульфату заліза (II)

На основі обраних компонентів з метою порівняння властивостей синтезували як звичайні супрамолекулярні ансамблі ($\text{InSe}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\rangle$, $\text{InSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$), так і клатрати з ієрархічною архітектурою $\text{InSe}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{FeSO}_4\rangle\rangle$, сформованою кавітатизацією гостьових контентів за типом «господар-гість». Для формування супрамолекулярних ансамблів була застосована детально описана нами в роботі [13] тристадійна інтеркаляційно-деінтеркаляційна технологія, в результаті якої досягалася 4-кратна ступінь розширення вихідної матриці для кожного виду гостьового контенту, вміст якого контролювався прецизійними гравіметричним і хімічним аналізами.

Імпедансні виміри проводилися в напрямку кристалографічної осі *C* в діапазоні частот 10^{-3} – 10^6 Гц за допомогою вимірювального комплексу «AUTOLAB» фірми «ECO CHEMIE» (Голандія), укомплектованого комп'ютерними програмами FRA-2 та GPES. Видалення сумнівних точок проводилося фільтром Діріхле [14, 15]. Частотні залежності комплексного імпедансу *Z* аналізувалися в середовищі програмного пакету ZView 2.3 (Scribner Associates). Похибки апроксимації не перевищували 4%. Адекватність побудованих імпедансних моделей пакету експериментальних даних була підтверджена повністю випадковим характером частотних залежностей залишкових різниць першого порядку [14, 15]. Імпедансні дослідження отриманих зразків проводилися за нормальних умов, при освітленні імітатором сонячного випромінювання потужністю 65 Вт та при накладанні постійного магнітного поля напруженістю 2,75 кОе. Фізичні поля прикладалися в напрямку кристалографічної осі *C* монокристалу InSe .

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 5 наведені частотні залежності дійсної частини питомого комплексного імпедансу вихідної 4-хкратно розширеної матриці InSe до та після інтеркаляції тіосечовини, сульфату заліза та їх коінтеркаляції. Вимірювання проводилися за нормальних умов. Для вихідної матриці маємо типову поведінку — частотнезалежна вітка в діапазоні частот 10^{-3} – 10^4 Гц.

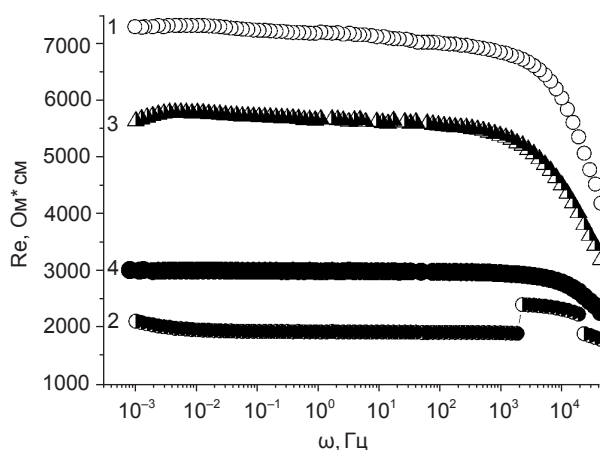


Рис. 5. Частотні залежності дійсної складової питомого комплексного імпедансу, перпендикулярного до шарів розширеного InSe (1), $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}>$ (2), $\text{InSe}<\text{FeSO}_4>$ (3) та $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{FeSO}_4>>$ (4)

Впровадження тіосечовини між шари вихідної матриці InSe суттєво зменшує значення реальної складової питомого комплексного імпедансу в понад 3 рази. Також міняється характер залежності $\text{Re } Z(\omega)$ — з'являється спадаюча ділянка в області низьких частот та, що більш цікавіше, аномальна частотна поведінка в інтервалі 2×10^3 – 2×10^4 Гц. Така аномальна поведінка може бути пов'язана з тим, що зазначений інтервал енергій носіїв струму є наближеним до умов інтерференційної блокади резонансного тунелювання. Однак, без додаткових досліджень не може бути відхилена і гіпотеза щодо закидання носіїв струму у резонансні стани [16] і утримуванні їх впродовж часу помітно більшого від періоду синусоїдального вимірювального сигналу.

Впровадження сульфату заліза (II) між шари вихідної матриці слабо зменшує значення реальної складової питомого комплексного імпедансу в 1,25 рази. Проте на відміну від попереднього інтеркалянту приводить до протилежного характеру частотної поведінки реальної частини питомого комплексного

імпедансу у низькочастотній області спектру. Аномалія, що спостерігалася в попередньому випадку — відсутня.

Коінтеркаляція тіосечовини та сульфату заліза (II) нівелює усі вище згадані ефекти та приводить до зменшення значень дійсної частини питомого імпедансу у 2,5 рази.

Підтвердження вище сказаного також бачимо на діаграмах Найквіста (рис. 6). Слід відмітити, що 3-х дуговий характер діаграм Найквіста яскраво виражений для наноструктур, що містять тіосечовину. Це свідчить про зміну енергетичної топології сформованої наноструктури, що привносить інтеркаляція тіосечовини. З метою з'ясування вище сказаного твердження за теорією Джебола-Поллака [17] були проаналізовані і представлені залежності густини станів на рівні Фермі, довжини перескоку і розкид пасткових центрів за нормальних умов для вихідного 4-хкратно розширеного селеніду індію (InSe), $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}>$, $\text{InSe}<\text{FeSO}_4>$ та $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{FeSO}_4>>$ (рис. 7). Бачимо, що найбільшої зміни набувають вищезгадані параметри саме для зразка інтеркальованого тіосечовиною. Експериментальним підтвердженням отриманих теоретичних розрахунків є вигляд залежностей струму термостимульованої деполаризації (ТСД) представлених на рис. 8.

Наступним етапом роботи було дослідження впливу поля світлової хвилі та постійного магнітного поля на вищеописані властивості наноструктур.

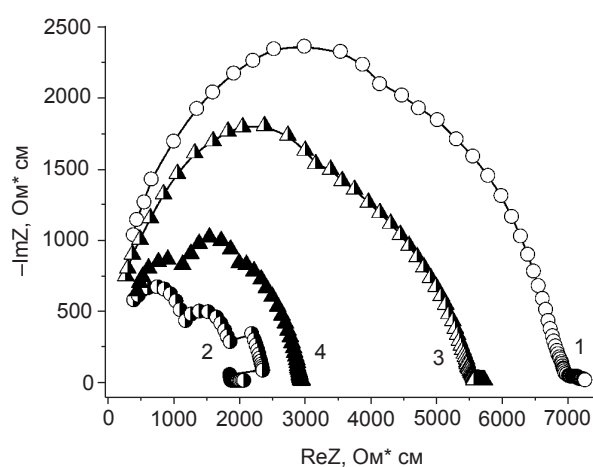


Рис. 6. Частотні залежності уявної складової питомого комплексного імпедансу, перпендикулярного до шарів розширеного InSe (1), $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}>$ (2), $\text{InSe}<\text{FeSO}_4>$ (3) та $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{FeSO}_4>>$ (4)

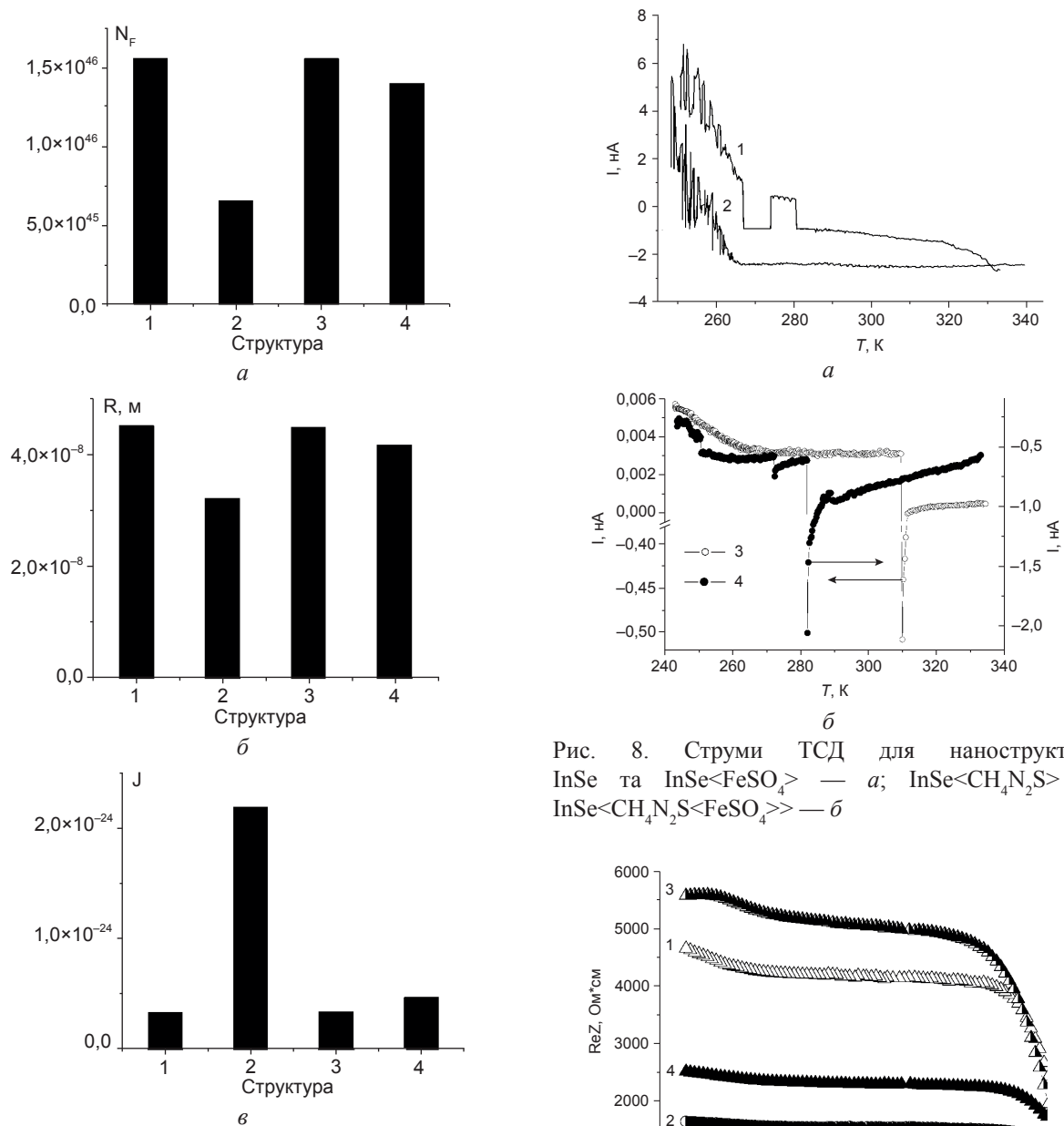


Рис. 7. Густина станів на рівні Фермі — *a*, довжина перескоку — *b* і розкид пасткових центрів — *в* для InSe (1), $\text{InSe}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\rangle$ (2), $\text{InSe}\langle\text{FeO}_4\rangle$ (3) та $\text{InSe}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{FeSO}_4\rangle\rangle$ (4)

На рис. 9 представлені частотні залежності дійсної частини питомого імпедансу та залежність уявної частини питомого імпедансу від реальної для вимірювань проведених у магнітному полі. Як бачимо постійне магнітне поле не сильно міняє величину значень як реальної так і уявної частини комплексного питомого імпедансу. Дещо розширюються низькочастотні частотонезалежні ділянки реальної частини комплексного імпедансу.

Однак більш радикальних змін набувають характеристики під дією світлової хвилі. Як бачимо з представлених залежностей реальної частини комплексного імпедансу

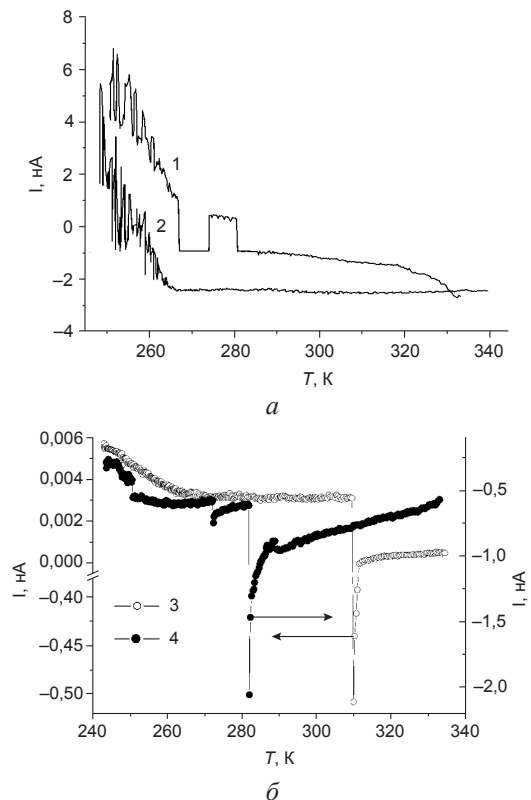


Рис. 8. Струми ТСД для наноструктури InSe та $\text{InSe}\langle\text{FeSO}_4\rangle$ — *a*; $\text{InSe}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\rangle$ та $\text{InSe}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{FeSO}_4\rangle\rangle$ — *б*

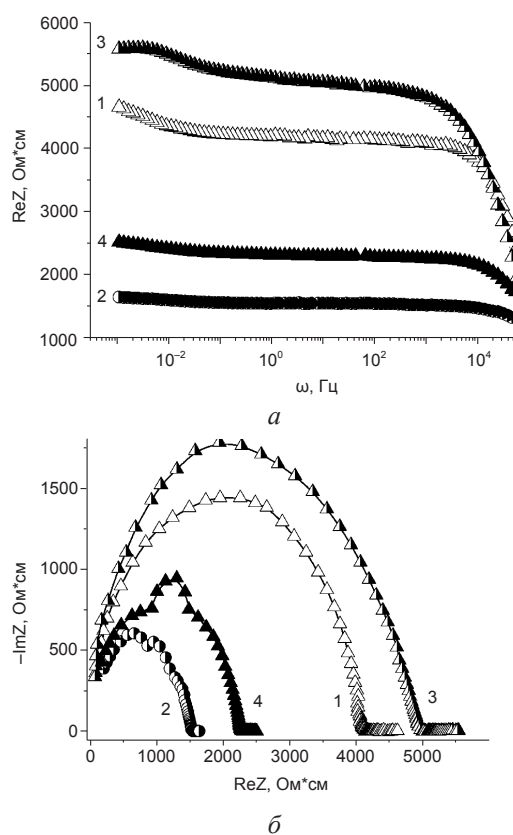


Рис. 9. Частотна залежність дійсної складової питомого імпедансу — *a*, залежність дійсної складової питомого імпедансу від уявної — *б* для вимірювань проведених у магнітному полі для InSe (1), $\text{InSe}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\rangle$ (2), $\text{InSe}\langle\text{FeO}_4\rangle$ (3) та $\text{InSe}\langle\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}\langle\text{FeSO}_4\rangle\rangle$ (4)

приведених на рисунку 10а, залежності носять повністю немонотонний частотозалежний характер. Така поведінка може бути зумовлена захопленням та утриманням носіїв струму пастковими центрами прилипання в продовж часу співмірного із півперіодом синусоїдального вимірювального сигналу. Описане явище на діаграмах Найквіста приймає вигляд від'ємної ємності, або носить індуктивний характер. Останнє яскраво видно із представлених результатів на рис. 10б. Описаний ефект має важливе практичне значення з точки зору оптично керованої індуктивності [18, 19]. Відношення питомого опору під дією поля до питомого опору за нормальних умов на найнижчій частоті представлено на рис. 11.

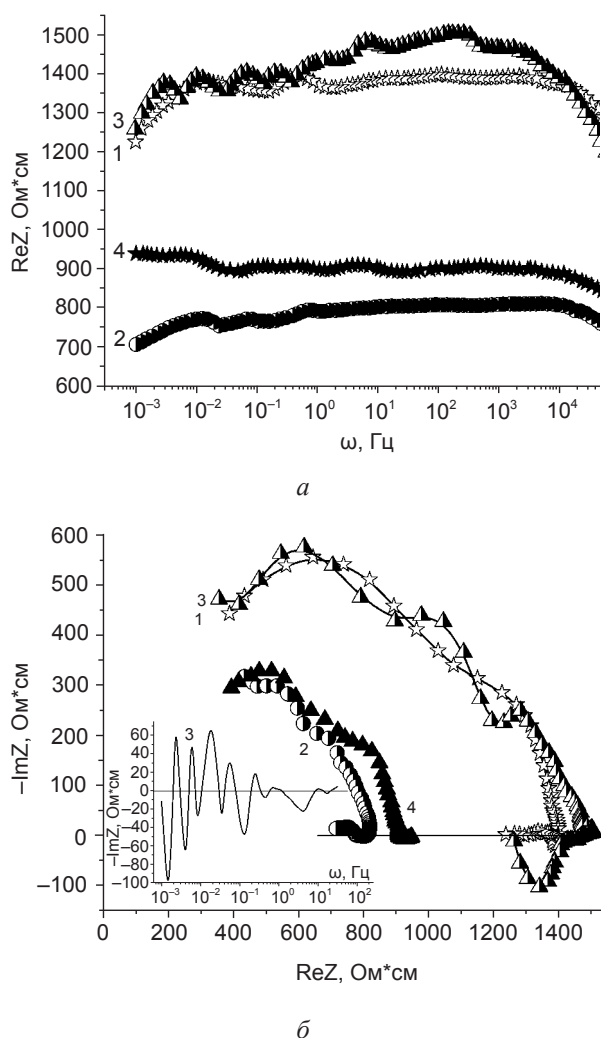


Рис. 10. Частотна залежність дійсної складової питомого імпедансу — а, залежність дійсної складової питомого імпедансу від уявної — б для вимірювань проведених при світлі для InSe (1), InSe<CH₄N₂S> (2), InSe<FeSO₄> (3) та InSe<CH₄N₂S<FeSO₄>> (4)

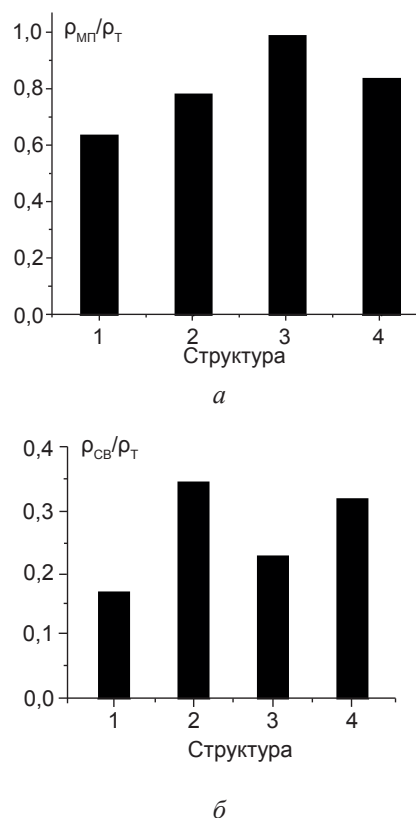


Рис. 11. Магнеторезистивний — а і фоторезистивний — б ефекти для InSe (1), InSe<CH₄N₂S> (2), InSe<FeSO₄> (3) та InSe<CH₄N₂S<FeSO₄>> (4)

ВИСНОВКИ

1. Інтеркаляція InSe тіосечовиною приводить до трьохкратного зменшення реальної складової питомого комплексного опору та появи ефекту інтерференційної блокади резонансного тунелювання в частотному інтервалі $2 \times 10^3 - 2 \times 10^4$ Гц.
2. Впровадження тіосечовини між шари монокристалу InSe значним чином змінює густину станів на рівні Фермі, довжину перескоку і розкид пасткових центрів на відміну від сульфату заліза (II) та їх коінтеркаляції.
3. При освітленні інтеркалату InSe<FeO₄> візуалізується ефект «від'ємної ємності», який є важливий з точки зору практичного використання в якості оптично керованої індуктивності.
4. Коінтеркаляція тіосечовини та сульфату заліза (II) між шари монокристалу InSe практично нівелює вище перелічені ефекти.

ЛІТЕРАТУРА

- Slack G. A. New materials and performance limits for thermoelectric cooling, in CRC handbook of thermoelectrics (ed: D. M. Rowe) // CRC Press, Boca Raton. — 1995. — P. 407–440.
- Slack G. A. Design concepts for improved thermoelectric materials (ed T. M. Tritt, M. G. Kanatzidis, H. B. Lyon Jr and G. D. Mahan) // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Warrendale. — Pennsylvania: MRS Press. — 1997. — Vol. 478. — P. 47–54.
- Шевельков А. В. Аномально низкая теплопроводность и термоэлектрические свойства новых катионных клатратов в системе Sn-In-As-I / А. В. Шевельков, Е. А. Кельм, А. В. Оленев, В. А. Кульбачинский, В. Г. Кытин // Физика и техника полупроводников. — 2011. — Т. 45. — С. 1454–1458.
- Борщ Н. А. Электронная структура Zn-замещенных германиевых клатратов / Н. А. Борщ, Н. С. Перславцева, С. И. Курганский // Физика и техника полупроводников. — 2009. — Т. 43, вып. 5. — С. 590–594.
- Moustafa Sh. Ibrahim. Etaiw Supramolecular host-guest systems as frameworks for excitation energy transfer / Sh. Ibrahim. Moustafa, El-din H. Safaa // Spectrochimica Acta. — 2002. — Part A 58. — P. 373–378.
- Bishchaniuk T. M. Colossal magnetocapacitance effect at room temperature / T. M. Bishchaniuk, I. I. Grygorchak // Applied Physics Letters. — 2014. — Vol. 104. — P. 203104-1–203104-3.
- Puzzarini C. Molecular Structure of Thiourea / C. Puzzarini // J. Phys. Chem. A. — 2012. — Vol. 116. — P. 4381–4387.
- Jones M. J. Molecular dynamics of cyclohexane guest molecules in the cyclohexane / thiourea inclusion compound: an incoherent quasielastic neutron scattering investigation / M. J. Jones, F. Guillaume, K. D. M. Harris, A. E. Aliev, P. Girard, A. -J. Dianoux // Molecular Physics. — 1998. — Vol. 93. — P. 545–554.
- Pluta T. Electric properties of urea and thiourea / T. Pluta, A. J. Sadlej // J. Chem. Phys. — 2001. — Vol. 114. — P. 136–146.
- Seidell, Atherton, Linke, William F. Solubilities of Inorganic and Organic Compounds (2nd ed.) // NY: D. Van Nostrand Company, 1919. — 343 p.
- Lies R. M. A. III–VI Compounds / R. M. A. Lies // Preparation and cryst. growth material with layered structure. — Dordrecht-Boston, 1977. — P. 225–254.
- Friend R. H. Electronic Properties of intercalation complexes of the transition metal dichalcogenides / R. H. Friend, A. D. Yoffe // Adv. Phys. — 1987. — Vol. 1. — P. 1–94.
- Grygorchak Ivan. Intercalated Nanostructure Consisting of Inorganic Receptor and Organic Ambipolar Semiconductor / Ivan Grygorchak, Fedir Ivashchyshyn, Pavlo Stakhira, Renji R. Reghu, Vladyslav Cherpak, and Juozas Vidas Grazulevicius // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. — 2013. — Vol. 8. — P. 1–5.
- Стойнов З. Б. Электрохимический импеданс / З. Б. Стойнов, Б. М. Графов, Б. Савова-Стойнова, В. В. Елкин. — Москва: Наука, 1991. — 336 с.
- Impedance spectroscopy. Theory, experiment and application / Ed. E. Barsoukov and J. R. Macdonald // Wiley interscience (Canada), 2005. — 585 p.
- Алешкин В. Я. Примесные резонансные состояния в полупроводниках / В. Я. Алешкин, Л. В. Гавриленко, М. А. Одноблюдов, И. Н. Ясиевич // Физика и техника полупроводников. — 2008. — Т. 42. — С. 899–922.
- Pollak M. Low frequency conductivity due to hopping processes in silicon / M. Pollak, T. H. Geballe // Phys. Rev. — 1961. — Vol. 6. — P. 1743–1753.
- Bisquert J., Randriamahazaka H., Garcia-Belmonte G. Inductive behaviour by charge-transfer and relaxation in solid-state electrochemistry / J. Bisquert, H. Randriamahazaka, G. Garcia-Belmonte // Electrochimica Acta. — 2005. — Vol. 51. — P. 627–640.
- Mora-Sero I. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forwards Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells / I. Mora-Sero, J. Bisquert // Nano Letters. — 2006. — Vol. 6. — No. 4. — P. 640–650.

REFERENCES

- Slack G. A. New materials and performance limits for thermoelectric cooling, in CRC handbook of thermoelectrics (ed: D. M. Rowe) // CRC Press, Boca Raton. — 1995. — P. 407–440.
- Slack G. A. Design concepts for improved

- thermoelectric materials (ed T. M. Tritt, M. G. Kanatzidis, H. B. Lyon Jr and G. D. Mahan) // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Warrendale. — Pennsylvania: MRS Press. — 1997. — Vol. 478. — P. 47–54.
3. Shevel'kov A. V. Anomal'no nizkaya teploprovodnost' i termoelektricheskie svojstva novyh kationnyh klatratov v sisteme Sn-In-As-I / A. V. Shevel'kov, E. A. Kel'm, A. V. Olenov, V. A. Kul'bachinskij, V. G. Kytin // *Fizika i tehnika poluprovodnikov.* — 2011. — Vol. 45. — P. 1454–1458.
 4. Borsch N. A. Elektronnaya struktura Zn-zameshennyh germanievych klatratov / N. A. Borsch, N. S. Perslavceva, S. I. Kurganskij // *Fizika i tehnika poluprovodnikov.* — 2009. — Vol. 43, vyp. 5. — P. 590–594.
 5. Moustafa Sh. Ibrahim. Etaiw Supramolecular host-guest systems as frameworks for excitation energy transfer / Sh. Ibrahim, Moustafa, El-din H. Safaa // *Spectrochimica Acta.* — 2002. — Part A 58. — P. 373–378.
 6. Bishchaniuk T. M. Colossal magnetocapacitance effect at room temperature / T. M. Bishchaniuk, I. I. Grygorchak // *Applied Physics Letters.* — 2014. — Vol. 104. — P. 203104-1–203104-3.
 7. Puzzarini C. Molecular Structure of Thiourea / C. Puzzarini // *J. Phys. Chem. A.* — 2012. — Vol. 116. — P. 4381–4387.
 8. Jones M. J. Molecular dynamics of cyclohexane guest molecules in the cyclohexane / thiourea inclusion compound: an incoherent quasielastic neutron scattering investigation / M. J. Jones, F. Guillaume, K. D. M. Harris, A. E. Aliev, P. Girard, A. -J. Dianoux // *Molecular Physics.* — 1998. — Vol. 93. — P. 545–554.
 9. Pluta T. Electric properties of urea and thiourea / T. Pluta, A. J. Sadlej // *J. Chem. Phys.* — 2001. — Vol. 114. — P. 136–146.
 10. Seidell, Atherton, Linke, William F. *Solubilities of Inorganic and Organic Compounds* (2nd ed.) // NY: D. Van Nostrand Company, 1919. — 343 p.
 11. Lies R. M. A. III–VI Compounds / R. M. A. Lies // *Preparation and cryst. growth material with layered structure.* — Dordrecht-Boston, 1977. — P. 225–254.
 12. Friend R. H. Electronic Properties of intercalation complexes of the transition metal dichalcogenides / R. H. Friend, A. D. Yoffe // *Adv. Phys.* — 1987. — Vol. 1. — P. 1–94.
 13. Grygorchak Ivan. Intercalated Nanostructure Consisting of Inorganic Receptor and Organic Ambipolar Semiconductor / Ivan Grygorchak, Fedir Ivashchyn, Pavlo Stakhira, Renji R. Reghu, Vladyslav Cherpak, and Juozas Vidas Grazulevicius // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics.* — 2013. — Vol. 8. — P. 1–5.
 14. Stojnov Z. B. Elektrohimicheskij impedans / Z. B. Stojnov, B. M. Grafov, B. Savova-Stojnova, V. V. Elkin. — Moskva: Nauka, 1991. — 336 p.
 15. Impedance spectroscopy. Theory, experiment and application / Ed. E. Barsoukov and J. R. Macdonald // *Wiley interscience (Canada)*, 2005. — 585 p.
 16. Aleshkin V. Ya. Primesnye rezonansnye sostoyaniya v poluprovodnikah / V. Ya. Aleshkin, L. V. Gavrilenko, M. A. Odnoblyudov, I. N. Yassievich // *Fizika i tehnika poluprovodnikov.* — 2008. — Vol. 42. — P. 899–922.
 17. Rollak M. Low frequency conductivity due to hopping processes in silicon / M. Rollak, T. H. Geballe // *Phys. Rev.* — 1961. — Vol. 6. — P. 1743–1753.
 18. Bisquert J., Randriamahazaka H., Garcia-Belmonte G. Inductive behaviour by charge-transfer and relaxation in solid-state electrochemistry / J. Bisquert, H. Randriamahazaka, G. Garcia-Belmonte // *Electrochimica Acta.* — 2005. — Vol. 51. — P. 627–640.
 19. Mora-Sero I. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forwards Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells / I. Mora-Sero, J. Bisquert // *Nano Letters.* — 2006. — Vol. 6. — No. 4. — P. 640–650.

УДК 621.393.3:621.382:621.385

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ПЛАТИНОЙ

Х. Т. Йулдашев, Ш. С. Ахмедов, З. Хайдаров

*Ферганский политехнический институт,
Фергана, Узбекистан*

Поступила в редакцию 22. 02. 2017

В работе исследовалась работоспособности полупроводниковой фотографической ионизационной камеры (ПФИК) со сверхтонкой газоразрядной ячейкой с использованием фотоприемных пластинок из кремния, легированного платиной. Экспериментально изучены вольтамперные характеристики, температурные зависимости, амперваттные характеристики, а также спектральные характеристики фототока в газоразрядной ячейке ПФИК.

Ключевые слова: фотографическая регистрация, инфракрасное излучение, электронно-оптический преобразователь, температурные зависимости, спектральные характеристики.

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ФОТОГРАФІЧНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ КРЕМНІЮ, ЛЕГОВАНОГО ПЛАТИНОЮ

Х. Т. Йулдашев, Ш. С. Ахмедов, З. Хайдаров

В роботі досліджувалася працездатність напівпровідникової фотографічної іонізаційної камери (НФІК) з надтонкою газорозрядною коміркою з використанням фотоприймальних пластинок із кремнію, легованого платиною. Експериментально вивчено вольтамперні характеристики, температурні залежності, амперватні характеристики, а також спектральні характеристики фотоструму в газорозрядній комірці НФІК.

Ключові слова: фотографічна реєстрація, інфрачервоне випромінювання, електронно-оптичний перетворювач, температурні залежності, спектральні характеристики.

INVESTIGATION OF INFRARED PHOTOGRAPHIC SYSTEM BASED ON SILICON DOPED WITH PLATINUM

X. T. Yuldashev, Sh. S. Akhmedov, Z. Haydarov

In the present work we investigated the performance of the semiconductor photographic ionization chamber with superfine gas discharge cell plates using a photodetector of the silicon doped with alloy addition platinum. Experimentally studied the current-voltage characteristics, temperature dependences, ampere watt characteristics and spectral characteristics of the photocurrent in the gas discharge cell.

Keywords: photographic recording, infrared, electro-optical transducer, the temperature dependence of spectral characteristics.

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковая фотографическая система ионизационного типа остается наиболее перспективным устройством для регистрации оптических изображений в широком спектральном диапазоне [1, 2]. Удовлетворяя принципу управляемой фоточувствительности [3] эта система является приемлемой для удовлетворения инфракрасной фотографии. В настоящее время продолжают работы по созданию современных приборов с высокими фотографическими параметрами [4].

В полупроводниковой ионизационной камере (ПИК) фотоприемником (ФП)

инфракрасного излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 1,1-4,2$ мкм используется кремний, легированный платиной [5], а в диапазоне длин волн $\lambda = 10,6$ мкм — кремний, легированный серой [6].

Авторами работы [7] экспериментально исследовано влияние степени компенсации уровней Si(S) на фотопроводимость в спектральной области 10,6 мкм. Проведены теоретические расчеты для одноуровневой системы при различной степени компенсации и для двух энергий активации (ΔE). Установлено, что в фотопроводимости на длине волны 10,6 мкм участвуют не менее двух уровней примеси.

В настоящей работе приводятся результаты исследований фотоэлектрических свойств полупроводниковых ФП, использованных в ионизационных системах.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основной частью ПИК является газоразрядная ячейка, которая заключена между фотоприемником и контрэлектродом. Контрэлектрод изготавливается из стеклянной пластинки с проводящим прозрачным покрытием SnO_2 или из волоконно-оптической шайбы, также с покрытием SnO_2 . При проецировании на поверхность фотоприемника инфракрасного (ИК) изображения объекта в нем возникает распределение фотопроводимости, повторяющее интенсивность падающего ИК излучения. При приложении между фотоприемником и прозрачным контрэлектродом достаточного по величине напряжения происходит пробой газоразрядного промежутка, благодаря автоэлектронной эмиссии с внутренней поверхности фотоприемника [8]. Распределение плотности тока и яркости свечения газоразрядной плазмы будет определяться распределением фотопроводимости полупроводникового фотоприемника.

2.1. Вольтамперные характеристики

Типичные вольтамперные характеристики (ВАХ) газоразрядной ячейки с фотоприемником из кремния р-типа проводимости, легированного платиной ($p\text{-Si}\langle\text{Pt}\rangle$), приведены на рис. 1. Часть ВАХ захватывает интервал плотности токов 10^{-9} – 10^{-7} А/см², который ранее при изучении газоразрядных ячеек с полупроводниковыми электродами практически никогда не исследовался, поскольку при существовавших методах регистрации изображений в использованных фотоприемниках был неактуальным. Таким образом, проведенные измерения впервые осуществлены в области низких уровней плотностей токов в газоразрядной ячейке.

Из ВАХ следует, что в области напряжений, непосредственно следующих за напряжением пробоя газового промежутка, наблюдается участок сверхлинейного нарастания тока с наклоном, который увеличивается по мере

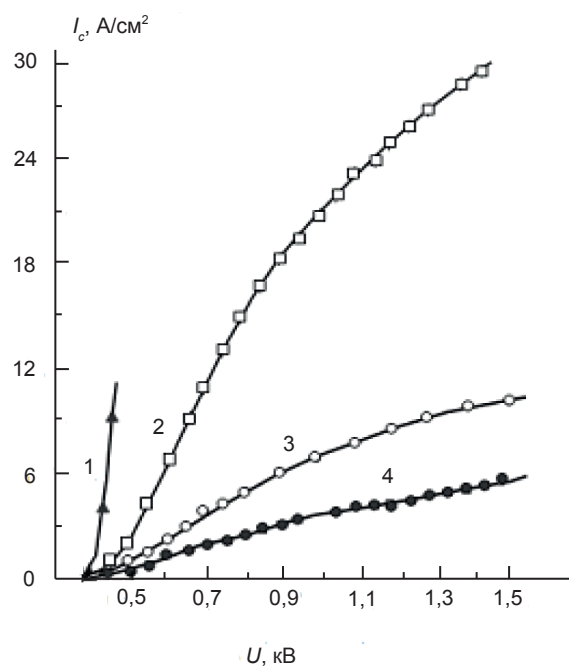


Рис. 1. Вольтамперные характеристики газоразрядной ячейки ПФИК при разных мощностях ИК излучения J : 1 — $1,6 \cdot 10^{-4}$ Вт/см², 2 — $5,3 \cdot 10^{-6}$ Вт/см², 3 — $1,8 \cdot 10^{-6}$ Вт/см², 4 — $2,4 \cdot 10^{-7}$ Вт/см²

роста проводимости полупроводникового электрода. При дальнейшем возрастании напряжения сверхлинейный участок переходит в линейный. Причиной наблюдаемого хода ВАХ является, по-видимому, то обстоятельство, что на начальной стадии развития таунсендовского разряда дифференциальное сопротивление разрядного промежутка велико и сравнимо с омическим сопротивлением полупроводникового электрода. Линейный участок ВАХ не имеет тенденции к суперлинейности, т. е. при рабочих напряжениях ПФИК, вплоть до $1,6 \cdot 10^3$ В не возникает монополярной инжекции из контактов и других нелинейных процессов.

Отметим, что снижение порога регистрируемой минимальной плотности тока в ПФИК напрямую связано с возможностью осуществления эффекта стабилизации и управления током газового разряда при малых плотностях тока несамостоятельного разряда в газовом промежутке. Поскольку при описанных выше опытах контролировалась равномерность свечения экрана и формирование изображения, причем для плотностей токов до 10^{-9} А/см² они были вполне удовлетворительными, можно ожидать, что естественный предел

снижения величины пороговой регистрируемой минимальной плотности тока при стационарном освещении лежит значительно ниже, чем это зафиксировано в настоящей работе.

2.2. Спектральные характеристики газоразрядной ячейки с фотоприемником из *p*-Si<Pt>

Для спектральных исследований была собрана установка, в которой фотографируемым и наблюдаемым объектом являлась щель ИК монохроматора (монохроматор фирмы «Карл Цейс Йена тип S-10/2603» с призмой NaCl и источником света типа «Глобар»). Изображение щели проектировалось двояковыпуклой линзой из ВаF₂ на приемную поверхность фотоприемника ПФИК. Интенсивность излучения, падающего на фотоприемник, была определена прямыми измерениями метрологическим термостолбиком типа ЛЭТИ с чувствительностью 0,72 В/Вт.

На рис. 2. приведена спектральная характеристика фототока в ПФИК в диапазоне чувствительности фотоприемного элемента $h\nu = 0,3-1,2$ эВ ($\lambda = 1-4,13$ мкм) из *p*-Si<Pt>. Полученная спектральная характеристика хорошо согласуется с данными работы [9]. В районе $h\nu = 0,31$ эВ ($\lambda = 4$ мкм) на длинноволновом краю спектрального диапазона фоточувствительность составляет примерно 8 % от максимального значения. Во всем заданном диапазоне ИК излучения получены удовлетворительные изображения выходной щели монохроматора.

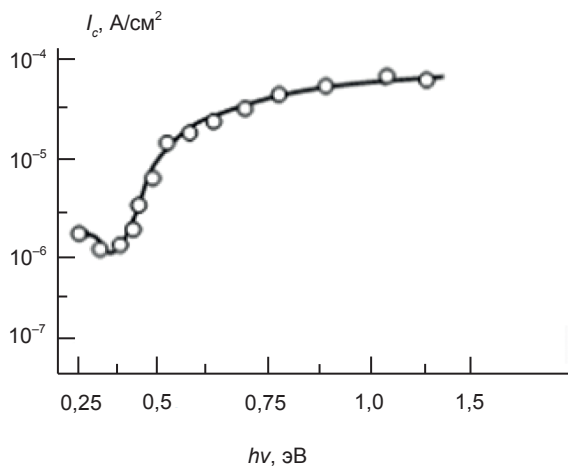


Рис. 2. Спектральные характеристики фототока в газоразрядной ячейке ПФИК

На рис. 3 приведены температурные зависимости темного и фототоков. Как видно из кривых, фототок в широком диапазоне температур вплоть до 125 К остается неизменным, что является весьма важным признаком при эксплуатации ПФИК. Из температурных зависимостей темного тока можно определить энергии ионизации эмиттерного уровня примеси платины в кремнии. Рассчитанная энергия ионизации примеси составляет $\Delta E = 0,317$ эВ, что согласуется с результатами работ [10].

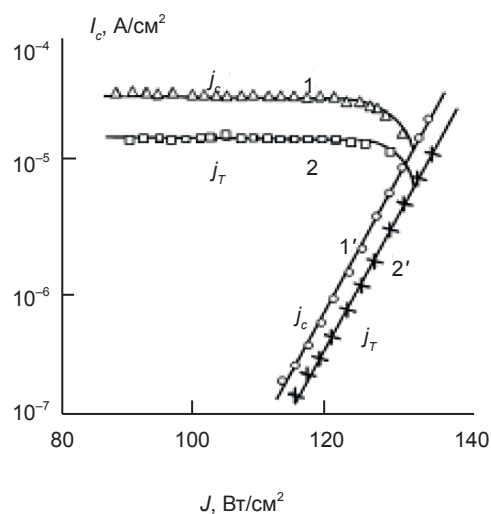


Рис. 3. Температурные зависимости темного и фототоков в газоразрядной ячейке ионизационной камеры для двух разных исходных удельных сопротивлений ρ фотоприемников из *p*-Si<Pt>: 1 и 1'—0,41 Ом·см; 2 и 2'—1,25 Ом·см

На рис. 4 приведены ампер-ваттные зависимости сверхтонкой газоразрядной ячейки ПФИК, снятые в трех участках спектрального диапазона длин волн λ : 1 — 1,1–2,3 мкм, 2 — 1,6–3,4 мкм, 3 — 2,6–4,2 мкм

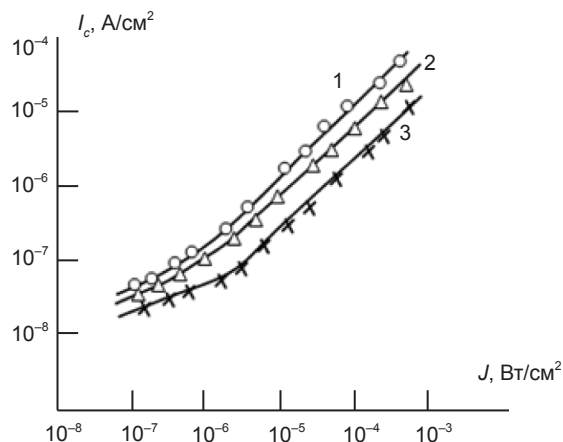


Рис. 4. Ампер-ваттные характеристики ПФИК с фотоприемником из *p*-Si<Pt> для трех разных областей спектрального диапазона длин волн λ : 1 — 1,1–2,3 мкм, 2 — 1,6–3,4 мкм, 3 — 2,6–4,2 мкм

спектральной области чувствительности при $\Delta\lambda = 1,1-2,3$ мкм, $\Delta\lambda = 1,6-3,4$ мкм и $\Delta\lambda = 2,6-4,2$ мкм. Зависимость имеет широкий диапазон линейности и допускает фотографическую регистрацию изображений при пороговой регистрируемой мощности излучения до 10^{-7} Вт/см² за время экспонирования в интервале $(0,1-2 \cdot 10^{-3})$ с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом можно создать прибор ночного видения и пространственно-временной диагностический прибор для исследования ИК излучений объектов в ближней области длин волн при температуре термоэлектрического охладителя и дальнейшей области длин волн при температуре жидкого азота. Применение ПИК для обнаружения дефектов и неоднородностей твердых и жидких веществ делает ее еще более современной, то есть этот метод является более дешевым и простым. Необходимо отметить, что результаты исследований с применением ПИК всегда воспроизводимы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Йулдашев Х. Т., Хайдаров З. Новый фотографический эффект в сверхтонкой газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом // Прикладная физика. — 2016. — № 5. — С. 75–80.
2. Йулдашев Х. Т., Касымов Ш. С., Хайдаров З. Фотопреобразователь ИК-изображений со сверхтонкой газоразрядной ячейкой и люминофором // Прикладная физика. — 2016. — № 2. — С. 94–99.
3. Йулдашев Х. Т., Касымов Ш. С., Хайдаров З. Усилительные процессы в газоразрядной ячейке, состоящей из полупроводника с плазменными контактами // Журнал физики и инженерии поверхности. — 2016. — Т. 1, № 3. — С. 268–273.
4. Лодыгин А. Н., Астров Ю. А., Порцель Л. М., Берегулин Е. В. Динамика таунсендовского разряда в аргоне // ЖТФ. — 2015. — Т. 85, № 5. — С. 27–31.
5. Хайдаров З. Исследование сверхтонкой газоразрядной ячейки с полупроводниковым электродом из кремния, легированного платиной // ФИП. — 2011. — Т. 9, № 4. — С. 385–389.

6. Сиябеков Х. Б., Туланов В. Т. Фотопроводимость кремния, легированного серой, в спектральном диапазоне 10,6 мкм // ФТП. — 1997. — Т. 31, № 12. — С. 1425–1427.
7. Горлин Г. Б., Туланов В. Т., Сиябеков Х. Б. Влияние степени компенсации уровней серы на фотопроводимость кремния в спектральной области 10,6 мкм // ЖТФ. — 1997. — Т. 67, № 10. — С. 142–143.
8. Йулдашев Х. Т., Касымов Ш. С. Исследование характеристик полупроводникового фотопреобразователя ионизационного типа со сверхтонкой газоразрядной ячейкой // ФИП. — 2015. — № 2. — С. 137–141.
9. Астров Ю. А., Ахмедова М. М., Лебедева А. А., Мамадолимов А. Т., Парицкий Л. Г., Порцель Л. М., Юсупов П. Полупроводниковая фотографическая система и преобразователь изображений ионизационного типа на основе кремния, компенсированного платиной. — М.: (Деп. в ВИНТИ.: № 19763 — 76Деп), 1976. — 15 с.
10. Астров Ю. А., Парицкий Л. Г., Рывкин С. М. Исследование быстродействия полупроводниковых преобразователей изображений ионизационного типа. — М.: (Деп. В ЦНИИ «Электроника».: № Деп — 2472/78), 1978. — 22 с.

REFERENCES

1. Juldashv H. T., Hajdarov Z. Novyj fotograficheskiy effekt v sverhtonkoj gazorazryadnoy yachejke s poluprovodnikovym elektrodom // Prikladnaya fizika. — 2016. — No. 5. — P. 75–80.
2. Juldashv H. T., Kasymov Sh. S., Hajdarov Z. Fotopreobrazovatel' IK-izobrazhenij so sverhtonkoj gazorazryadnoy yachejkoj i lyuminoforom // Prikladnaya fizika. — 2016. — No. 2. — P. 94–99.
3. Juldashv H. T., Kasymov Sh. S., Hajdarov Z. Usilitel'nye processy v gazorazryadnoy yachejke, sostoyaschej iz poluprovodnika s plazmennymi kontaktami // Zhurnal fiziki i inzhenerii poverhnosti. — 2016. — Vol. 1, No. 3. — P. 268–273.
4. Lodygin A. N., Astrov Yu. A., Porcel' L. M., Beregulin E. V. Dinamika taunsendovskogo razryada v argone // ZhTF. — 2015. — Vol. 85, No. 5. — P. 27–31.
5. Hajdarov Z. Issledovanie sverhtonkoj

- gazorazryadnoj yachejki s poluprovodnikovym elektrodom iz kremniya, legirovannogo platinoj // FIP. — 2011. — Vol. 9, No. 4. — P. 385–389.
6. Siyabekov H. B., Tulanov V. T. Fotoprovodimost' kremniya, legirovannogo seroj, v spektral'nom diapazone 10,6 mkm // FTP. — 1997. — Vol. 31, No. 12. — P. 1425–1427.
7. Gorlin G. B., Tulanov V. T., Siyabekov H. B. Vliyanie stepeni kompensacii urovnej sery na fotoprovodimost' kremniya v spektral'noj oblasti 10,6 mkm // ZhTF. — 1997. — Vol. 67, No. 10. — P. 142–143.
8. Juldashv H. T., Kasymov Sh. S. Issledovanie harakteristik poluprovodnikovogo foto-preobrazovatelya ionizacionnogo tipa so sverhtonkoj gazorazryadnoj yachejkoj // FIP. — 2015. — No. 2. — P. 137–141.
9. Astrov Yu. A., Ahmedova M. M., Lebedeva A. A., Mamadolimov A. T., Parickij L. G., Porcel' L. M., Yusupov P. Poluprovodnikovaya fotograficheskaya sistema i preobrazovatel' izobrazhenij ionizacionnogo tipa na osnove kremniya, kompensirovannogo platinoj. — M.: (Dep. v VINITI.: No. 19763 — 76Dep), 1976. — 15 p.
10. Astrov Yu. A., Parickij L. G., Ryvkin S. M. Issledovanie bystrodejstviya poluprovodnikovyh preobrazovatelej izobrazhenij ionizacionnogo tipa. — M.: (Dep. V CNII «Elektronika».: No. Dep — 2472/78), 1978. — 22 p.

РОСТ, СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛ W/Mg₂Si

Л. Е. Конотопский, И. А. Копылец, В. А. Севрюкова, Е. Н. Зубарев,
В. В. Мамон, В. В. Кондратенко

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 16.03.2017

Электронно-микроскопическими и рентгенодифракционными методами исследована структура многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) W/Mg₂Si. Показано, что в процессе изготовления МРЗ W/Mg₂Si наблюдается межслоевое взаимодействие, в результате которого формируется перемешанная зона на границе Mg₂Si-W из силицида вольфрама. Установлено, что состав перемешанной зоны зависит от толщины слоев, составляющих период рентгеновского зеркала. В МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм формируется перемешанная зона силицида вольфрама с преимущественным содержанием вольфрама: W₃Si и/или W₅Si₃. В МРЗ с периодом 14,2 нм состав перемешанной зоны близок к WSi₂. Плотности перемешанных зон в МРЗ W/Mg₂Si с периодами 3,1 нм и 14,2 нм составляют 16,1 г/см³ и 8,2 г/см³ соответственно. Проведена оценка оптических свойств МРЗ W/Mg₂Si. Показано, что на длине волны 9,89 нм отражательная способность неоптимизированного по конструкции МРЗ W/Mg₂Si находится на уровне с оптимизированным МРЗ W/B₄C.

Ключевые слова: рентгеновская дифрактометрия, многослойное рентгеновское зеркало, магнетронное распыление, силицид магния, вольфрам.

РІСТ, СТРУКТУРА ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

БАГАТОШАРОВИХ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ДЗЕРКАЛ W/Mg₂Si

Л. Є Конотопський, І. А. Копилець, В. А. Севрюкова, Є. М. Зубарєв,
В. В. Мамон, В. В. Кондратенко

Електронно-мікроскопічними та рентгенодифракційними методами досліджено структуру багатошарових рентгенівських дзеркал (БРД) W/Mg₂Si. Показано, що під час виготовлення БРД W/Mg₂Si спостерігається міжшарова взаємодія, в результаті якої формується змішана зона на границі Mg₂Si-W з силициду вольфраму. Встановлено, що склад змішаних зон залежить від товщини шарів, що складають період рентгенівського дзеркала. У БРД W/Mg₂Si з періодом 3,1 нм формується змішана зона силициду вольфраму з переважним вмістом кремнію: W₃Si та/або W₅Si₃. У БРД з періодом 14,2 нм склад змішаної зони близький до WSi₂. Щільність змішаних зон у БРД W/Mg₂Si з періодами 3,1 нм та 14,2 нм складає 16,1 г/см³ та 8,2 г/см³ відповідно. Оцінені оптичні властивості БРД W/Mg₂Si. Показано, що на довжині хвилі 9,89 нм відбивна здатність не оптимізованого по конструкції БРД W/Mg₂Si знаходиться на рівні з оптимізованим БРД W/B₄C.

Ключові слова: рентгенівська дифрактометрия, багатошарове рентгенівське дзеркало, магнетронне розпилення, силицид магнію, вольфрам.

GROWTH, STRUCTURE AND OPTICAL FEATURES OF

W/Mg₂Si MULTILAYER X-RAY MIRRORS

L. E. Konotopskiy, I. A. Kopylets, V. A. Sevrykova, E. N. Zubarev,
V. V. Mamon, V. V. Kondratenko

Transmission electron microscopy and low-angle X-ray diffraction methods are used for investigations of W/Mg₂Si multilayers structure. It is shown that due to interlayer interaction mixed zones of tungsten silicide are formed on the Mg₂Si-W interface during deposition of W/Mg₂Si multilayers. It is found that the composition of the mixed zones depends on thickness of the layers in X-ray mirror. In the W/Mg₂Si multilayers with period of 3.1 nm the intermixed zones of tungsten silicide with the predominant content of tungsten namely W₃Si and/or W₅Si₃, can be formed. In the multilayers with a period of 14.2 nm the composition of mixed zones is close to WSi₂. Densities of mixed zones in multilayers with periods of 3.1 nm and 14.2 nm are 16.1 g/cm³ and 8.2 g/cm³ respectively. It is shown that reflectivity of the non-optimized in construction W/Mg₂Si multilayer at wavelength of 9.89 nm is close to that of optimized W/B₄C multilayer.

Keywords: X-ray diffraction, multilayer X-Ray mirror, DC magnetron sputtering, magnesium silicide, tungsten.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий нанесения пленочных покрытий позволило изготавливать многослойные периодические композиции с нанометровыми толщинами слоев. Многослойные рентгеновские зеркала являются разновидностью таких покрытий [1]. Они представляют собой искусственные кристаллы, в которых в одном направлении реализовано периодическое чередование слоев двух материалов, соотношение оптических констант которых обеспечивает максимальный коэффициент отражения зеркала. МРЗ широко используются для управления рентгеновским излучением в диапазоне длин волн 0,5–50 нм в различных областях науки и техники, среди которых рентгеновская астрофизика и рентгеновский спектральный анализ.

Особый интерес для двух указанных выше областей применения МРЗ представляет часть спектра 0,9–2,5 нм. Данный участок электромагнитного спектра содержит характеристические линии таких элементов, как Mg, Na, F, O (Mg- α = 0,989 нм, Na- α = 1,191 нм, F- α = 1,832 нм, O- α = 2,362 нм) [2]. Контроль содержания указанных элементов в сталях, алюминиевых и магниевых сплавах является важным как для металлургии, так и для других отраслей промышленности.

В рентгеновской астрофизике в указанном участке спектра планируются исследования черных дыр, нейтронных звезд, наблюдение гамма-всплесков [3].

В рентгеновских спектрометрах с волновой дисперсией традиционно для указанного диапазона длин волн используются МРЗ W/Si и W/B₄C. Улучшение оптических характеристик данных рентгеновских зеркал позволит увеличить чувствительность прибора, а также уменьшить время экспозиции при анализе исследуемых образцов. Поэтому существует целый ряд работ [4, 5, 6], посвященных совершенствованию методов изготовления рентгеновских зеркал W/Si и W/B₄C для повышения их коэффициента отражения. Тем не менее, отражательная способность МРЗ W/Si и W/B₄C даже в случае отсутствия «дефектов» конструкции ограничена оптическими константами слабо поглощающих слоев Si и B₄C [7]. Поэтому поиск

новых пар материалов является актуальной задачей.

По оптическим характеристикам наиболее перспективным в рассматриваемой части рентгеновского спектра слабопоглощающим материалом является Mg. Однако низкая температура плавления Mg ограничивает возможность выращивания короткопериодных зеркал на его основе. В работе [8] указывается, что методом магнетронного распыления не удастся вырастить на основе магния (W/Mg) зеркала с периодом меньше 4 нм. При этом типичное значение периода зеркала при его использовании в рентгеновских спектрометрах с волновой дисперсией составляет примерно 3 нм.

Для решения проблемы создания короткопериодных зеркал на основе магния целесообразно перейти к более тугоплавким материалам, например, силициду магния Mg₂Si. Силицид магния имеет близкие к Mg оптические константы, что делает данный материал перспективным для изготовления МРЗ на его основе. При этом открывается возможность выращивать сплошные слабопоглощающие слои в отличие от Mg при меньших толщинах. Однако это предположение нуждается в экспериментальном подтверждении.

Вторым материалом в зеркале целесообразно использовать W, как и в случае зеркал W/Si и W/B₄C. На длине волны Mg- α = 0,989 нм при угле падения 9° теоретически рассчитанный коэффициент отражения идеального МРЗ W/Mg₂Si выше, чем у МРЗ W/Si ($R_{W/Si} = 54,3\%$) и W/B₄C ($R_{W/B_4C} = 52,1\%$) и составляет 59,2%. Необходимо отметить, что в МРЗ W/Si и W/B₄C в результате межслоевого взаимодействия формируются перемешанные зоны [9, 10, 11], которые приводят к снижению коэффициента отражения. В этой связи необходимо знать реальную структуру МРЗ W/Mg₂Si. Это позволит предложить оптимальную конструкцию зеркала и оценить его оптические характеристики.

Ранее рентгеновские зеркала W/Mg₂Si исследовались в работе [12]. Было показано, что в процессе осаждения многослойной композиции W/Mg₂Si с периодом 8 нм наблюдается взаимодействие W с Si.

В результате формируются перемешанные зоны на границах W-Mg₂Si и Mg₂Si-W. Методом эллипсометрии было установлено, что толщина зоны, которая формируется на границе Mg₂Si-W, составляет 2 нм, толщина второй зоны — 0,5 нм. Вместе с тем остались невыясненными такие важные параметры для оптимизации конструкции зеркал и последующей их эксплуатации как плотность перемешанных зон, влияние толщин слоев W и Mg₂Si на эволюцию зон. Кроме того остается открытым вопрос о возможности выращивания МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3 нм. В этой связи, целью данной работы было исследование особенностей формирования перемешанных зон в короткопериодных МРЗ W/Mg₂Si в исходном состоянии, оценка отражательной способности зеркал с учетом их реальной структуры и сравнение оптических характеристик данного рентгеновского зеркала с МРЗ W/B₄C в Mg-K α и Na-K α излучении.

МЕТОДИКА

Образцы МРЗ W/Mg₂Si на стеклянных и монокристаллических кремниевых (111) подложках были изготовлены методом прямого магнетронного распыления в среде аргона. МРЗ были осаждены с периодами (толщиной пары слоев) 3,1 нм и 14,2 нм и количеством пар слоев 120 и 40 соответственно. Вакуумная камера предварительно прогревалась и откачивалась до давления 10⁻⁴ Па. Давление аргона во время осаждения составляло 0,3 Па. Подложка перед осаждением очищалась пучком ионов аргона. Толщина слоев контролировалась путем задания скорости транспортировки подложки над мишенями при стабилизации скоростей осаждения из мишеней W и Mg₂Si. В процессе нанесения многослойного покрытия температура подложки не превышала 50 °С.

Структура МРЗ W/Mg₂Si исследовалась с помощью просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии с последующим компьютерным моделированием.

Для получения электронно-микроскопических изображений поперечных срезов и картин электронной микродифракции использовался просвечивающий

электронный микроскоп ПЭМ-У. Величина ускоряющего напряжения составляла 100 kV.

Съемка малоугловых рентгеновских дифрактограмм проводилась в $\theta/2\theta$ геометрии на дифрактометре ДРОН-3М в излучении Cu-K α_1 . Монохроматизация первичного пучка обеспечивалась кососрезанным кремниевым (110) монохроматором. Моделирование экспериментальных кривых проводилось в программе X-Ray Calc [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Малоугловая рентгеновская дифрактограмма от МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм в исходном состоянии (рис. 1) свидетельствует о высоком уровне периодичности слоев. Наличие дифракционных максимумов на углах >14° указывает на низкий уровень среднеквадратичной шероховатости границ раздела слоев. Удовлетворительное совпадение экспериментальной и расчетной малоугловой кривой рентгеновской дифракции достигается при значении плотности слоев W ~16,2 г/см³. Полученное значение плотности слоев вольфрама значительно меньше табличного значения для массивного W ($\rho = 19,25$ г/см³ [7]).

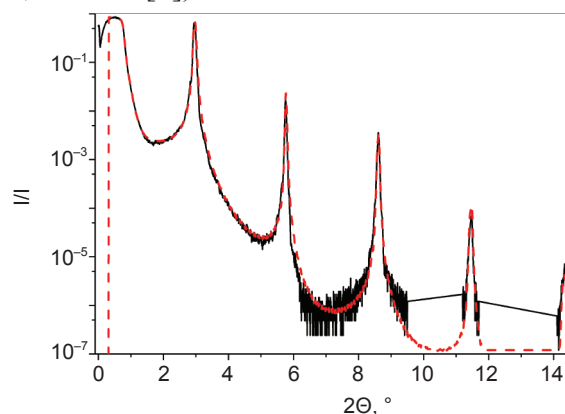


Рис. 1. Экспериментальная (—) и теоретическая (---) малоугловые рентгеновские дифрактограммы в излучении Cu-K α_1 от МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм

Принимая во внимание результаты работы [2], мы считаем, что уменьшение плотности сильно поглощающего слоя связано с формированием перемешанных зон в МРЗ W/Mg₂Si в результате взаимодействия W с Si (W с Mg не взаимодействует [14]). Для того чтобы подтвердить этот факт прямым методом, были проведены электронно-микроскопические исследования поперечных срезов МРЗ W/Mg₂Si.

Согласно данным электронно-микроскопического изображения поперечного среза МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм (рис. 2а) в исходном состоянии представляет собой структуру периодически чередующихся слоев двух материалов. Толщины слоев, как следует из фотометрирования поперечного среза (рис. 2б), близки. Картина электронной микродифракции (рис. 2в) свидетельствует о том, что слои силицида магния кристаллические. Необходимо отметить, что силицид магния формируется в равновесной кубической, а не гексагональной модификации, как наблюдалось в многослойной системе Si/Mg₂Si [15]. Это косвенно свидетельствует об отсутствии механических напряжений в МРЗ W/Mg₂Si, достаточных для формирования силицида магния в гексагональной модификации. Также на картине электронной микродифракции присутствует гало, соответствующее аморфным слоям второго материала. Положение гало находится близко к положению рефлексов соответствующих самым интенсивным линиям W, WSi₂ и W₅Si₃ ($d_{W(110)} = 0,2238$ нм, $d_{WSi_2(511)} = 0,212$ нм, $d_{W_5Si_3(411)} = 0,2109$ нм). Поэтому отнести гало к чистому вольфраму или к его силицидам не представляется возможным.

Таким образом, с помощью электронной микроскопии поперечных срезов не удается визуализировать наличие перемешанных зон в МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм. Объяснить их отсутствие на электронно-микроскопическом изображении (рис. 2а) можно исходя из предположения, что весь материал одного из слоев, в данном случае W, расходуется на формирование перемешанной зоны. Для того чтобы проверить данное предположение, было изготовлено зеркало W/Mg₂Si с большим периодом 14,2 нм и соответственно большими толщинами составляющих слоев ($t_w = 5,8$ нм, $t_{Mg_2Si} = 8,4$ нм). Электронно-микроскопическое изображение поперечного среза МРЗ W/Mg₂Si с периодом 14,2 нм (рис. 3а) свидетельствует о том, что данное рентгеновское зеркало состоит из трех чередующихся слоев. Перемешанная зона формируется на границе Mg₂Si-W. Определить толщины слоев с высокой точностью в рентгеновском зеркале по данным картины поперечного среза невозможно.

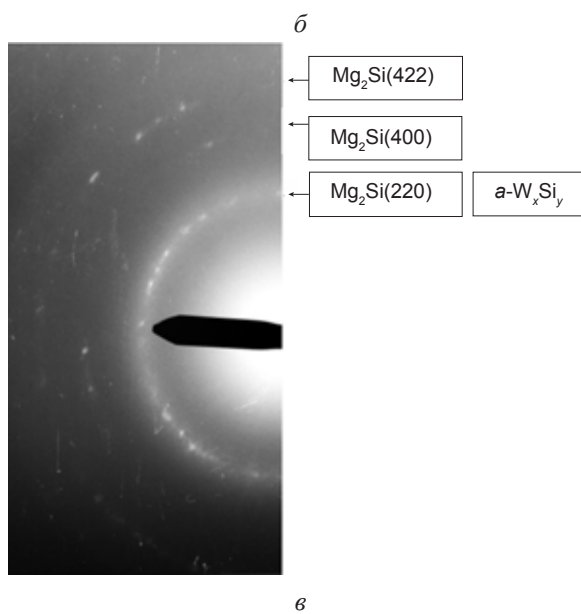
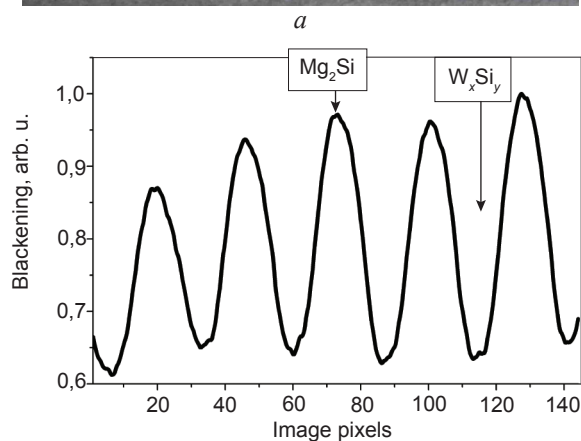
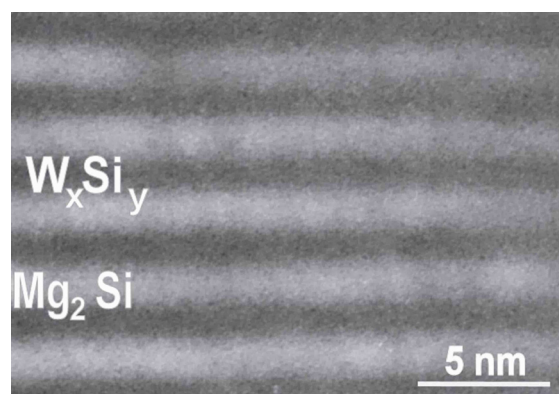


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение поперечного среза W/Mg₂Si в исходном состоянии, подложка снизу — а. Распределение интенсивности на изображении поперечного среза W/Mg₂Si — б. Картина электронной микродифракции от поперечного среза W/Mg₂Si в исходном состоянии — в

Тем не менее, фотометрирование позволяет получить оценочные данные о толщинах слоев. Согласно данным, полученным в результате фотометрирования электронно-микроскопического изображения (рис. 3б), толщина зоны, которая формируется при

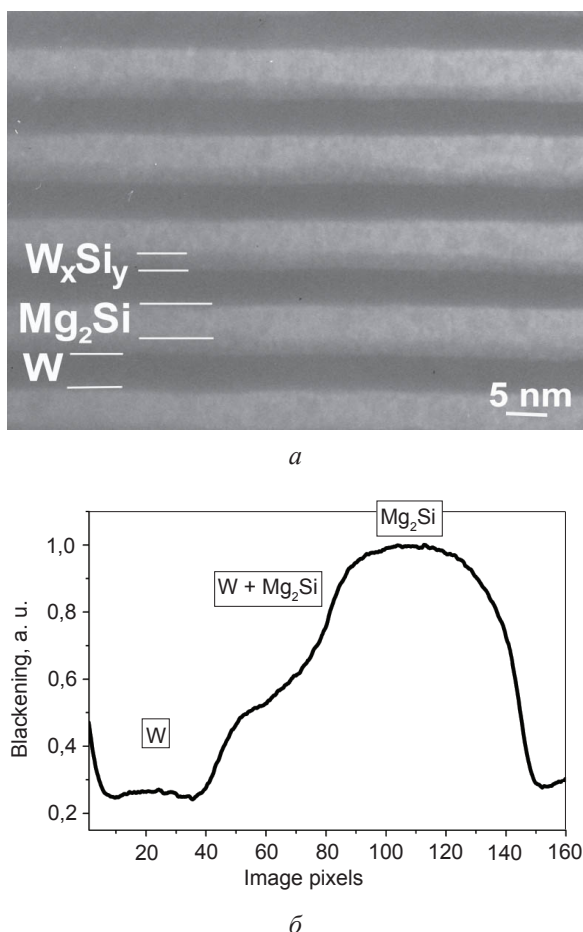


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение поперечного среза W/Mg_2Si с периодом 14,2 нм в исходном состоянии, подложка снизу — а. Фотометрирование одного периода на изображении поперечного среза W/Mg_2Si — б

осаждении силицида магния на вольфрам, составляет $\sim 2,5$ нм. Полученный результат о формировании перемешанной зоны и ее толщине согласуется с данными, которые получили авторы работы [12]. Однако в нашем случае зона выявляется только на одной границе раздела слоев (Mg_2Si - W). Перемешанная зона на границе W - Mg_2Si не выявляется. Это может быть связано с тем, что зона имеет такую плотность, которая не обеспечивает абсорбционный контраст на электронно-микроскопическом изображении. Кроме того, выявление этой зоны осложняется ее малой толщиной (0,5 нм), как следует из работы [12].

Отсутствие на электронно-микроскопическом изображении перемешанных зон в МРЗ W/Mg_2Si с периодом 3,1 нм обусловлено тем, что большая часть слоя или весь слой вольфрама провзаимодействовал с кремнием. Поэтому мы считаем, что рентгеновское зеркало W/Mg_2Si с периодом 3,1 нм

представляет собой чередование слоев Mg_2Si и W_xSi_y .

Известно, что в системе W - Si могут формироваться следующие силициды: W_5Si_3 , WSi_2 и метастабильный W_3Si [16]. Мы проанализировали возможность формирования каждого из этих силицидов на основании моделирования экспериментального спектра малоугловой рентгеновской дифракции от МРЗ W/Mg_2Si с периодом 3,1 нм и 14,2 нм. Моделирование выполнялось с учетом данных электронно-микроскопических исследований поперечных срезов о соотношении толщин слоев в периоде.

Для зеркал с периодом 3,1 нм хорошее совпадение экспериментального и теоретического спектров наблюдается и при моделировании двухслойной моделью W_3Si - Mg_2Si с плотностью перемешанной зоны $\rho = 16$ г/см³. В данном случае расчетное значение плотности перемешанной зоны находится ближе всего к значению плотности массивного W_3Si , которое приводится в литературе $\rho_{лит.}(W_3Si) = 16,1$ г/см³ [16].

При моделировании вольфрамсодержащего слоя силицидом W_5Si_3 хорошее совпадение расчетной и экспериментальной кривой для короткопериодного зеркала достигается, если предположить, что не весь слой вольфрама провзаимодействовал с кремнием. В случае, когда не провзаимодействовавшие слои вольфрама и силицида W_5Si_3 имеют табличные плотности, толщина вольфрама составляет 0,6 нм. Если принять во внимание, что в пленочном состоянии вольфрам имеет плотность на 10 % меньше, то его толщина составит 0,8 нм.

Разделить варианты с образованием W_5Si_3 с не провзаимодействовавшим W и W_3Si с помощью моделирования не представляется возможным.

Моделирование экспериментального спектра от МРЗ W/Mg_2Si в рамках двухслойной модели WSi_2 - Mg_2Si не позволяет удовлетворительно описать экспериментальную дифракционную кривую.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что имеющихся данных недостаточно, чтобы однозначно указать состав W -содержащего слоя в МРЗ W/Mg_2Si с периодом 3,1 нм. Однако мы можем говорить о том,

что его плотность составляет ~ 16 г/см³, что меньше плотности вольфрама. Необходимо отметить, что величина среднеквадратичной шероховатости, с которой выполняется моделирование, не превышает 0,3 нм.

Совпадение экспериментального и теоретического спектров малоугловых рентгеновских дифракций от МРЗ W/Mg₂Si с периодом 14,2 нм (рис. 4б) достигается при значении плотности перемешанной зоны 8,2 г/см³. Полученное значение плотности перемешанной зоны находится ближе всего к плотности

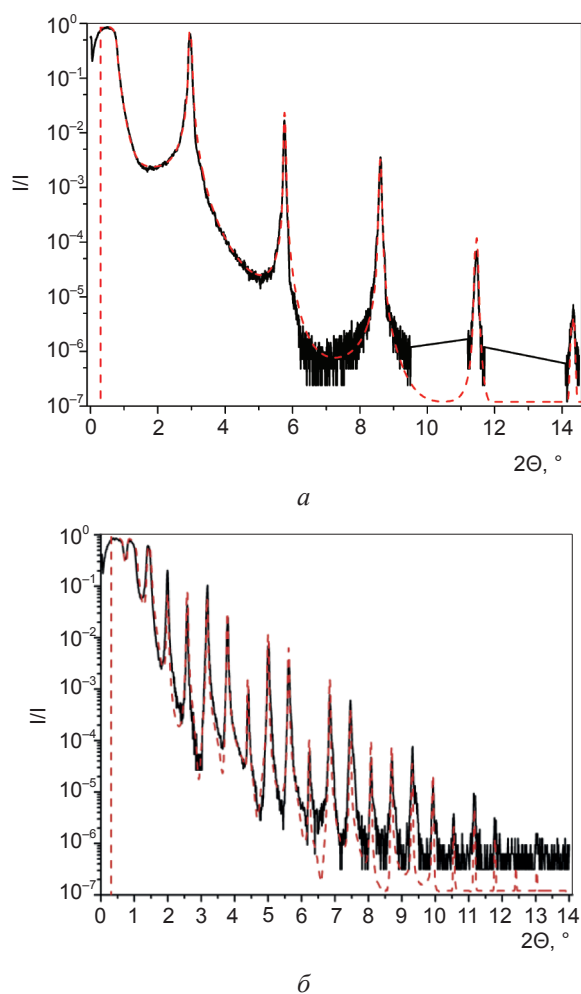


Рис. 4. Экспериментальные (—) и теоретические (---) спектры малоугловых рентгеновских дифракций в излучении Cu- α_1 от МРЗ W/Mg₂Si с периодами 3 нм — а и 14,2 нм — б

WSi₂ ($\rho = 9,528$ г/см³). В работе [9] авторы показали, что в исходном состоянии все слои составляющие МРЗ W/Si (а именно W, Si, W₅Si₃ и WSi₂) аморфные. Плотности слоев отличаются от табличных значений на 7–9%. Полученное нами значение плотности перемешанной зоны в МРЗ W/Mg₂Si с периодом

14,2 нм меньше табличного значения плотности массивного WSi₂ на 14,4%. Такое расхождение может быть связано с тем, что при моделировании трудно корректно учесть наличие свободного магния (см. ниже) в слабопоглощающем слое Mg₂Si.

Таким образом, в системе W-Mg₂Si формируются перемешанные зоны, состав которых зависит от толщин слоев в многослойном покрытии. В МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм формируются перемешанные зоны, состав которых близок к силицидам с минимальным содержанием кремния: W₅Si₃ или W₃Si. Это обусловлено малой толщиной кремнийсодержащего слоя ($t_{\text{Mg}_2\text{Si}} = 1,51$ нм), которая сопоставима с толщиной W ($t_{\text{W}} = 1,5$ нм). При этом не весь кремний взаимодействует с вольфрамом, о чем свидетельствует наличие рефлексов силицида магния на электронной микродифракционной картине от поперечного среза (рис. 2в).

В МРЗ W/Mg₂Si с периодом 14,2 нм толщина слоя Mg₂Si значительно превышает толщину W ($t_{\text{W}} = 5,8$ нм, $t_{\text{Mg}_2\text{Si}} = 8,4$ нм). В этом случае количество кремния не ограничивает формирование силицида вольфрама, обогащенного Si, а именно WSi₂. Этот силицид имеет наибольшую отрицательную теплоту образования среди всех возможных силицидов в данной композиции: $\Delta H_{298,15}^0(\text{W}_5\text{Si}_3) = -9,3$ ккал/ат. металла [17], $\Delta H_{298,15}^0(\text{WSi}_2) = -22,2$ ккал/ат. металла [17], $\Delta H_{298,15}^0(\text{Mg}_2\text{Si}) = -5,07$ ккал/ат. металла [18]. Таким образом, формирование силицидов вольфрама вместо силицида магния направленно на уменьшение свободной энергии системы.

Формирование силицида вольфрама на границе Mg₂Si-W сопровождается обогащением слоя Mg₂Si магнием. Хотя на микродифракционной картине от МРЗ W/Mg₂Si в исходном состоянии магний не выявляется, однако в результате отжига МРЗ W/Mg₂Si при $T = 400$ °С на микродифракционной картине появляется рефлекс, соответствующий 100 %-ой линии Mg (рис. 5).

Теоретически рассчитанная отражательная способность МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм на длине волны Mg- $\alpha = 0,989$ нм, которое исследовалось в данной работе, с реальной структурой слоев составляет 30% (рис. 6). Это близко к расчетному значению

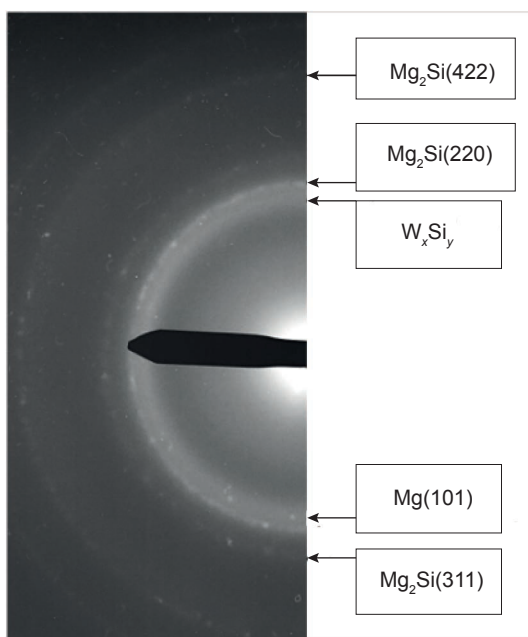


Рис. 5. Электронная микродифракция от поперечного среза МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм отожженного при T = 400 °С

отражательной способности МРЗ W/B₄C — 29 % (рис. 6). Расчет отражательной способности МРЗ W/B₄C выполнялся с учетом реальной структуры зеркала и оптимальным соотношением толщин слоев. Данные для расчета были взяты из работы [11]. Таким образом, отражательная способность неоптимизированного МРЗ W/Mg₂Si находится на одном уровне с МРЗ W/B₄C с оптимальной конструкцией.

Эффективность МРЗ W/Mg₂Si и W/B₄C с периодами ~3 нм была оценена на рентгеновском спектральном приборе СПРУТ

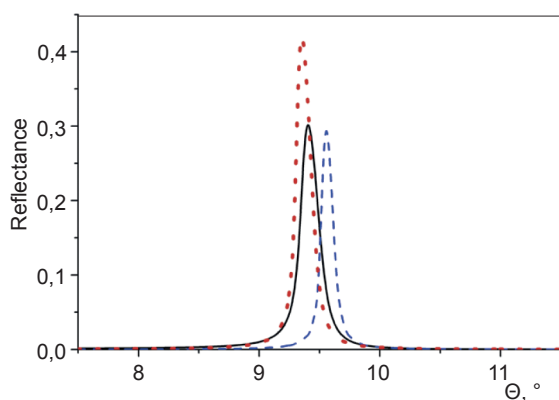
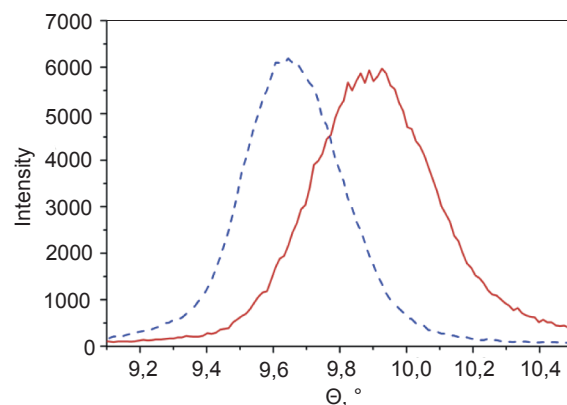
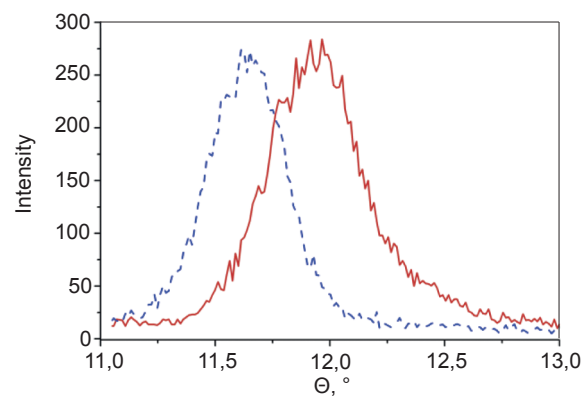


Рис. 6. Теоретически рассчитанный коэффициент отражения для МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм с учетом формирования перемешанных зон и с оптимальным соотношением толщин слоев (.....). Теоретический расчет коэффициента отражения для МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм, которое было исследовано в данной работе (—). Теоретический расчет коэффициента отражения для МРЗ W/B₄C, с которым проводилось сравнение (-----)

[19]. Согласно проведенным измерениям отражательная способность МРЗ W/Mg₂Si на длине волны Mg- $\kappa\alpha = 0,989$ нм находится на уровне с отражательной способностью МРЗ W/B₄C (рис. 7а). Необходимо отметить, что полученные экспериментальные данные по соотношению интенсивностей МРЗ W/B₄C и W/Mg₂Si согласуются с теоретически рассчитанными (рис. 6).



а



б

Рис. 7. Эффективность МРЗ W/Mg₂Si (—) в сравнении с МРЗ W/B₄C (----) в излучении Mg-K α — а, Na-K α — б

На большей длине волны, соответствующей характеристическому излучению Na- $\kappa\alpha = 1,191$ нм, преимущество неоптимизированного МРЗ W/Mg₂Si над МРЗ W/B₄C составляет 5 относительных процентов.

Необходимо отметить, что при изготовлении МРЗ W/Mg₂Si формирование перемешанных зон не учитывалось. Это повлияло на соотношение толщин слоев в МРЗ. Изготовление рентгеновского зеркала W/Mg₂Si с оптимальным соотношением толщин слоев, согласно теоретическому расчету, приведет к повышению его отражательной способности на длине волны Mg- $\kappa\alpha = 0,989$ нм на 10 % (рис. 6).

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что метод магнетронного распыления обеспечивает возможность выращивания высокосоввершенных МРЗ W/Mg₂Si с периодом ~3 нм, что подтверждается данными малоугловой рентгеновской дифракции и электронной микроскопии поперечных срезов. Среднеквадратичная шероховатость межслоевых границ раздела этих зеркал составляет ~0,3 нм, что вполне приемлемо для зеркал с таким периодом.

Важной особенностью формирования МРЗ W/Mg₂Si является межслоевое взаимодействие в процессе изготовления, в результате которого в сильнопоглощающем слое образуется перемешанная зона на границе Mg₂Si-W из силицида вольфрама, а слой Mg₂Si обогащается магнием. Состав и ширина перемешанной зоны зависят от толщины слоев, составляющих период. Так, в исходном состоянии в МРЗ W/Mg₂Si с периодом 3,1 нм формируется перемешанная зона, стехиометрический состав которой близок к силицидам вольфрама с наименьшим содержанием кремния: W₃Si и/или W₅Si₃. При увеличении периода МРЗ до 14,2 нм состав перемешанной зоны меняется и на межслоевых границах формируется силицид вольфрама с составом близким к WSi₂. Моделирование экспериментальных спектров малоугловых рентгеновских дифракций свидетельствует о том, что плотности перемешанных зон в МРЗ W/Mg₂Si с периодами 3,1 нм и 14,2 нм составляют 16,1 г/см³ и 8,2 г/см³ соответственно. Переход от силицида магния к силициду вольфрама обусловлен стремлением системы к понижению свободной энергии за счет усиления межатомных связей у соединений с большей отрицательной теплотой образования.

Показано, что отражательная способность неоптимизированного МРЗ W/Mg₂Si находится на уровне с МРЗ W/B₄C на длине волны Mg-Kα = 9,89 нм. На длине волны Na-Kα = 1,191 нм преимущество неоптимизированного МРЗ W/Mg₂Si над МРЗ W/B₄C составляет 5 %. Согласно расчетам оптимизация соотношения толщин слоев рентгеновского зеркала W/Mg₂Si с учетом формирования перемешанных зон повысит его отражательную способность на 10 % на длине волны 9,89 нм.

Представленные результаты свидетельствуют о перспективности использования короткопериодных МРЗ W/Mg₂Si в рентгеноспектральном анализе для определения таких элементов, как Mg, Na, F, O.

ЛИТЕРАТУРА

1. Spiller E. Low-Loss Reflection Coatings Using Absorbing Materials // *Appl. Phys. Lett.* — 1972. — Vol. 20, No. 9. — P. 365–367.
2. Блохин М. А., Швейцер И. Г. Рентгеноспектральный справочник. — М.: «Наука», 1982. — 376 с.
3. Yongwei Dong. The x-ray timing and polarization satellite — 1, 2, 3: uncovering the mysteries of black holes and extreme physics in the universe // *Proc. of SPIE.* — 2014. — Vol. 9144. — P. 91443O-1–91443O-7.
4. David L. Windt. Reduction of stress and roughness by reactive sputtering in W/B₄C X-ray multilayer films // *Proc. of SPIE.* — 2007. — Vol. 6688. — P. 66880R-1–66880R-10.
5. Kristin K. Madsen, Fiona A. Harrison, Peter H. Mao, Finn E. Christensen, Carsten P. Jensen, Nicolai Brejnholt, Jason Koglin, Michael J. Pivovarov. Optimizations of Pt/SiC and W/Si multilayers for the Nuclear Spectroscopic Telescope Array // *Proc. of SPIE.* — 2009. — Vol. 7437. — P. 743716-1–743716-11.
6. Michaelsen C., Ricardo P., Anders D. Improved graded multilayer mirrors for XRD applications // *Adv. X-Ray Anal.* — 2000. — Vol. 42. — P. 308–320.
7. <http://cxro.lbl.gov/>
8. Platonov Y., Kazuaki Shimizu, Hiroshi Kobayashi, Gary Fournier, Jim Rodriguez. Mg₂Si-based multilayer XRF analyzers with two- and three-layer structure design // *Adv. X-Ray Anal.* — 2009. — Vol. 52. — P. 129–134.
9. Першин Ю. П., Девизенко А. Ю., Мамон В. В., Чумак В. С., Кондратенко В. В. Структура, фазовый состав и модель роста аморфных многослойных рентгеновских зеркал W-Si, изготовленных методом магнетронного распыления // *ЖФИП.* — 2016. — Т. 1, № 1. — С. 27–41.
10. Решетняк Е. Н., Малыхин С. В., Першин Ю. П., Пугачев А. Т. Рентгенографический анализ периодических пленочных композиций W/Si // *Вопросы атомной науки и техники.* — 2003. — № 3. — С. 161–167.

11. Копылец И. А., Кондратенко В. В., Зубарев Е. Н., Рошупкин Д. В. Особенности формирования короткопериодных многослойных композиций W/B₄C // ЖТФ. — 2012. — Т. 82, вып. 12. — С. 101–107.
12. Pierre Boher, Philippe Houdy, Kuhne M., Muller P., Barchewitz R., Delaboudiniere P., David Smith. Tungsten/Magnesium Silicide Multilayers for Soft X-Ray Optics // J. X-ray Sci. Technol. — 1992. — Vol. 3, No. 2. — P. 118–132.
13. <http://sci-progs.com/>
14. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник / Под ред. Н. П. Лякишева. — М.: «Машиностроение», 2001, Т. 3, Книга 1. — 872 с.
15. Конотопский Л. Е., Копылец И. А., Севрюкова В. А., Зубарев Е. Н., Кондратенко В. В. Особенности роста наноразмерных слоев Mg₂Si в многослойных рентгеновских зеркалах Si/Mg₂Si // J. Nano- Electron. Phys. — 2016. — Т. 8, № 2. — С. 02021-1–02021-6.
16. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений. Справочник / Под ред. Т. Я. Косолаповой. — М.: «Металлургия», 1986. — 928 с.
17. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. — М.: «Мир», 1986. — 176 с.
18. <http://www.ukrrentgen.kharkiv.com/>
- Vol. 7437. — P. 743716-1–743716-11.
6. Michaelsen C., Ricardo P., Anders D. Improved graded multilayer mirrors for XRD applications // Adv. X-Ray Anal. — 2000. — Vol. 42. — P. 308–320.
7. <http://cxro.lbl.gov/>
8. Platonov Y., Kazuaki Shimizu, Hiroshi Kobayashi, Gary Fournier, Jim Rodriguez. Mg₂Si-based multilayer XRF analyzers with two- and three-layer structure design // Adv. X-Ray Anal. — 2009. — Vol. 52. — P. 129–134.
9. Pershin Yu. P., Devizenko A. Yu., Mamon V. V., Chumak V. S., Kondratenko V. V. Struktura, fazovyy sostav i model' rosta amorfnyh mnogoslujnyh rentgenovskih zerkal W-Si, izgotovlennyh metodom magnetronnogo raspyleniya // ZhFIP. — 2016. — Vol. 1, No. 1. — P. 27–41.
10. Reshetnyak E. N., Malyhin S. V., Pershin Yu. P., Pugachev A. T. Rentgenograficheskij analiz periodicheskikh plenochnyh kompozicij W/Si // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. — 2003. — No. 3. — P. 161–167.
11. Kopylec I. A., Kondratenko V. V., Zubarev E. N., Roschupkin D. V. Osobennosti formirovaniya korotkoperiodnyh mnogoslujnyh kompozicij W/B₄C // ZhTF. — 2012. — Vol. 82, vyp. 12. — P. 101–107.
12. Pierre Boher, Philippe Houdy, Kuhne M., Muller P., Barchewitz R., Delaboudiniere P., David Smith. Tungsten/Magnesium Silicide Multilayers for Soft X-Ray Optics // J. X-ray Sci. Technol. — 1992. — Vol. 3, No. 2. — P. 118–132.
13. <http://sci-progs.com/>
14. Diagrammy sostoyaniya dvoynyh metallicheskih sistem. Spravochnik / Pod red. N. P. Lyakisheva. — M.: «Mashinostroenie», 2001, Vol. 3, Kniga 1. — 872 p.
15. Konotopskij L. E., Kopylec I. A., Sevryukova V. A., Zubarev E. N., Kondratenko V. V. Osobennosti rosta nanorazmernyh sloev Mg₂Si v mnogoslujnyh rentgenovskih zerkalah Si/Mg₂Si // J. Nano- Electron. Phys. — 2016. — Т. 8, No. 2. — P. 02021-1–02021-6.
16. Svoystva, poluchenie i primenenie tugoplavkih soedinenij. Spravochnik / Pod red. T. Ya. Kosolapovoj. — M.: «Metallurgiya», 1986. — 928 p.
17. M'yurarka Sh. Silicidy dlya SBIS. — M.: «Mir», 1986. — 176 p.
18. <http://www.ukrrentgen.kharkiv.com/>

REFERENCES

1. Spiller E. Low-Loss Reflection Coatings Using Absorbing Materials // Appl. Phys. Lett. — 1972. — Vol. 20, No. 9. — P. 365–367.
2. Blohin M. A., Shvejser I. G. Rentgenospektral'nyj spravochnik. — M.: «Nauka», 1982. — 376 p.
3. Yongwei Dong. The x-ray timing and polarization satellite — 1, 2, 3: uncovering the mysteries of black holes and extreme physics in the universe // Proc. of SPIE. — 2014. — Vol. 9144. — P. 91443O-1–91443O-7.
4. David L. Windt. Reduction of stress and roughness by reactive sputtering in W/B₄C X-ray multilayer films // Proc. of SPIE. — 2007. — Vol. 6688. — P. 66880R-1–66880R-10.
5. Kristin K. Madsen, Fiona A. Harrison, Peter H. Mao, Finn E. Christensen, Carsten P. Jensen, Nicolai Brejnholt, Jason Koglin, Michael J. Pivovarov. Optimizations of Pt/SiC and W/Si multilayers for the Nuclear Spectroscopic Telescope Array // Proc. of SPIE. — 2009. —

УДК 621. 315. 593

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И МЕХАНИЗМ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ p -CdTe-SiO₂-Si С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ

Н. Жураев¹, М. Халилов¹, С. Отажонов², Н. Алимов¹

¹Ферганский филиал Ташкентского университета информационных технологий,

²Ферганский государственный университет

Поступила в редакцию 24.03.2017

Изучено фоточувствительность и механизм протекания тока в низкоразмерных гетероструктурах p -CdTe-SiO₂-Si с глубокими примесными уровнями. Обнаружена пикосекундная фотопроводимость, что свидетельствует о наличии большой концентрации поверхностных рекомбинационных центров в пленках CdTe.

Ключевые слова: пикосекундная фотопроводимость, полупроводниковая пленка, рекомбинация, генерация, фотонапряжение, фоточувствительность.

ФОТОЧУТЛИВІСТЬ І МЕХАНІЗМ ПРОТІКАННЯ СТРУМУ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ p -CdTe-SiO₂-Si З ГЛУБОКИМИ ДОМІШКОВИМИ РІВНЯМИ

Н. Жураєв, М. Халілов, С. Отажонов, Н. Алімов

Вивчено фоточувствительность і механізм протікання струму в низьковимірних гетероструктурах p -CdTe-SiO₂-Si з глибокими домішковими рівнями. Виявлена пікосекундна фотопровідність, що свідчить про наявність великої концентрації поверхневих рекомбінаційних центрів в плівках CdTe.

Ключові слова: пікосекундна фотопровідність, напівпровідникова плівка, рекомбінація, генерация, фотонапруга, фоточутливість.

PHOTOSENSITIVITY AND CURRENT FLOW MECHANISM IN p -CdTe-SiO₂-Si HETEROSTRUCTURES WITH DEEP IMPURITY LEVELS

N. Zhuraiev, M. Khalilov, S. Otazonov, N. Alimov

The photosensitivity and the current flow mechanism in low-dimensional p -CdTe-SiO₂-Si heterostructures with deep impurity levels are studied. A picosecond photoconductivity was detected, which indicates the presence of a large concentration of surface recombination centers in CdTe films.

Keywords: picosecond photoconductivity, semiconductor film, recombination, generation, photovoltage, photosensitivity.

Развитие микро- и нанoeлектроники, новые технологические возможности изготовления сложных полупроводниковых структур стимулируют дальнейшее изучение новых оптических и фотоэлектрических явлений в активных пленочных элементах.

В связи с этим в работе изучены фотопроводимости и механизм протекания тока в низкоразмерных структурах p -CdTe-SiO₂-Si с глубокими примесными уровнями. Поликристаллическая пленка CdTe выращивалась на поверхности гетероструктуры SiO₂-Si.

Измерялось пикосекундное фотонапряжение (ПФН) пленок, сопровождаемое с заметной пикосекундной фотопроводимостью (ПФП). Регистрация ПФН проводилась

в специальном осциллографе С7-19. Образцы возбуждались световым излучением второй гармоники пикосекундного лазера на основе Au-Nd²⁺с длиной первой гармоники $\lambda = 1,079$ мкм; длительность одиночного импульса τ составляла 19 пс. Обнаружена пикосекундная фотопроводимость в тонких пленках CdTe при $(6-8) \times 10^2$ Вт/см² в течение 1–3 минут при комнатной температуре. Образцы представляли собой полупроводник-тонкий диэлектрик-полупроводник (ПТДП) структуры высоколегированного поликристаллического теллурида кадмия p -типа проводимости ($p = 10^{17}$ см⁻³) — двуокись кремния-кремний, легированный бором. Толщина окисного слоя определенная

с помощью Оже-анализа, составляла $d = 0,46$ мкм. Технология изготовления структур описана в работе [1].

Результаты исследования фотопроводимости показывают, что осциллограмма фотосигнала после возбуждения пленки импульсом света длительностью 17 пс, свидетельствует что, во-первых, возгорание максимального ФН (или ФП) происходит, в течение 250–300 пс, во-вторых, основная часть ПФН (или ПФП) спадает за время, менее 100 пс, которое было близко к разрешающей способности регистрирующего прибора (см. рис. 1). Обращает на себя внимание относительно медленное установление максимального ПФН и быстрое спадание его основной части, а затем, относительно долговременный, почти периодически затухающий процесс релаксации ПФН. Такие малые времена релаксации ПФН ($\tau = 10^{-10}$ с) свидетельствуют о наличии большой концентрации рекомбинационных центров в исследованных пленках CdTe.

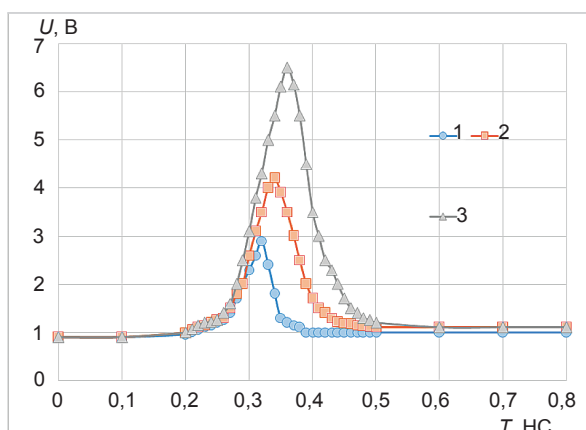


Рис. 1. Зависимость фототока ПТДП структуры $I_{\phi} = \Delta U/R_H$ (где — ΔU падение напряжения на сопротивлении нагрузки) от времени после включения освещения $R_H \geq 2$ кОм; U , В: 1–1,7; 2–3,5; 3–7,0

Если принять, что коэффициент рекомбинации γ равен $\sim 10^{-7}$ см³/с (что обычно свойственно для монокристаллов [2]), то из времени жизни $\tau = 10^{-10}$ с грубо оценим возможную концентрацию центров быстрой рекомбинации $N_{рек.} = (\tau\gamma)^{-1} \leq 10^{17}$ см⁻³.

Поскольку исследованная пленка состоит из мелких кристаллических зерен размерами $\sim 0,14$ мкм, то можно полагать, что примесными центрами, ответственными за обнаружение быстрой релаксации ПФП,

являются глубокие уровни, имеющиеся на поверхности кристаллита. Тогда находим возможную поверхностную концентрацию центров рекомбинации $N_s = N^{2/3} \approx 3 \times 10^{11}$ см⁻².

В эксперименте отсутствует долговременная релаксация ПФН, типичная для барьерной ФП, что указывает, по-видимому, на быстрый обмен носителя между поверхностными уровнями кристаллитов или на специальный канал (механизм) генерационно-рекомбинационных процессов в области «interfaisе».

Также проведены исследования в пленках CdTe термообработанных в вакууме в течение 1,5 + 2 часов, при $T = 350$ – 400 °К. Фоточувствительность в этих пленках увеличивалась до 20 А/В × Дж, а время релаксации было в порядке — (150–200) нс.

Для анализа пикосекундной фотопроводимости обратимся к энергетической диаграмме и эквивалентной схеме ПТДП структуры (см. рис. 2) и будем полагать, что генерация

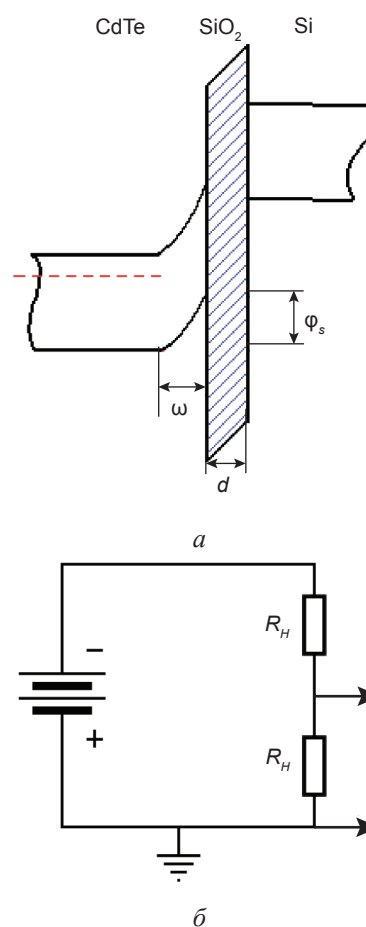


Рис. 2. *a* — энергетическая диаграмма ПТДП структуры, *б* — эквивалентная схема ПТДП структуры в режиме регистрации фотосигнала

неосновных носителей заряда, определяющих фототок, происходит только в CdTe. Справедливость этого допущения основана на том, что генерированные в поликристаллическом кремнии, носители заряда из-за малой толщины окисленного слоя и малого времени жизни носителей заряда в нем не дают существенного вклада в фототок. Поскольку толщина окисленного кремния, в рассматриваемой нами структуре $\approx 0,46$ мкм, то по нашим оценкам, первый вклад в общий поток незначителен (менее 25 %).

При включении импульса излучения фототок, обусловленный разделением носителей заряда в области пространственного заряда кремния, заряжает емкость этого слоя и протекая по внешней цепи, заряжает емкость слоя диэлектрика. При этом создается падение напряжения на сопротивлении нагрузки, которое и регистрируется как фотосигнал.

Отметим характерные особенности кинетики, наблюдаемой в эксперименте. Пик начального участка фронта нарастания увеличивается с увеличением напряжения на электроде. Продолжительность участка также зависит от величины напряжения и растет с его увеличением (см. рис. 1). Время быстрого спада фототока при $R_n \geq 2$ кОм пропорционально сопротивлению нагрузки, дальнейшая длительность периода, соответствующего протеканию сквозного тока через диэлектрик, зависит лишь от длительности импульса излучения.

Проверено исследование спектральной зависимости тока короткого замыкания специально нелегированных и легированных серебром и медью пленок CdTe и установлено, что фотопроводимость в примесной области определяется глубокими примесными уровнями.

Установленные оптические энергии ионизации глубоких уровней в пленках CdTe согласуются с данными, полученными для монокристаллов. Глубокий уровень, расположенный на 0,14–0,17 эВ выше валентной зоны, часто наблюдается в CdTe и считается, что он является комплексом, образованным из двухзарядной вакансии кадмия. Уровни энергии активации, которые равны 0,30–0,35 эВ относительно валентной зоны в CdTe, связываются с примесями Ag и Cu [1].

Полученные результаты указывают на то, что за фоточувствительность в области примесного поглощения в основном ответственны дефекты кристаллической решетки, создающие глубокие уровни, расположенные ниже зоны проводимости.

Таким образом, полупроводниковые пленки $p\text{-CdTe}$ с глубокими примесными уровнями, полученными на окисленных поверхностях кремния можно использовать как быстродействующий фоточувствительный фотодетектор для регистрации пикосекундных импульсов лазерного излучения в близкой ИК-области спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отажонов С. М. Фоточувствительность АФН-пленок в гетероструктуре из CdTe-SiO₂-Si под действием внешнего электрического поля // Физическая инженерия поверхности. — 2004. — Т. 2, № 1–2. — С. 28–31.
2. Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич В. И. Полупроводниковая электроника. Свойства материалов. Справочник. — К.: Наукова думка, 1975. — 704 с.
3. Отажонов С. М., Усмонов Я. Устройство для деформирования образцов при освещении монохроматическим светом // Патент ИДР. — РУз 2000450, 2002. — 5 с.
4. Каримов М., Султонов Ш. Д. // ФерПИ научно-технический журнал. — 2004. — № 2. — С. 20–23.
5. Боброва Е. А., Клевков Ю. В., Медведев С. А., Плотников А. Ф. Исследование глубоких электронных состояний в текстурированных поликристаллах $p\text{-CdTe}$ стехиометрического состава методом DLTS // ФТП. — 2002. — Т. 36, вып. 12. — С. 1426–1431.
6. Вайткус Ю. Ю., Расулов Р. Я., Отажонов С. М., Орипов У. // «Поверхность» Рентгеновские синхронные и нейтронные исследования АН России. — М.: «Наука». — 1999. — № 3. — С. 44–49.

REFERENCES

1. Otazhonov S. M. Fotochuvstvitel'nost' AFN-plenok v geterostrukture iz SdTe-SiO₂-Si pod dejstviem vneshnego elektricheskogo polya // Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. — 2004. — Vol. 2, No. 1–2. — P. 28–31.

2. Baranskij P. I., Klochkov V. P., Potykevich V. I. Poluprovodnikovaya elektronika. Svoystva materialov. Spravochnik. — K.: Naukova dumka, 1975. — 704 p.
3. Otazhonov S. M., Usmonov Ya. Ustrojstvo dlya deformirovaniya obrazcov pri osveschenii monohromaticheskim svetom // Patent IDP. — RUz 2000450, 2002. — 5 p.
4. Karimov M., Sulstonov Sh. D. // FerPI nauchno-tehnicheskij zhurnal. — 2004. — No. 2. — P. 20–23.
5. Bobrova E. A., Klevkov Yu. V., Medvedev S. A., Plotnikov A. F. Issledovanie glubokih elektronnyh sostoyanij v teksturirovannyh polikristallah *p*-CdTe stehiometricheskogo sostava metodom DLTS // FTP. — 2002. — Vol. 36, vyp. 12. — P. 1426–1431.
6. Vajtkus Yu. Yu., Rasulov R. Ya., Otazhonov S. M., Oripov U. // «Poverhnost'» Rentgenovskie sinhronnye i nejtronnye issledovaniya AN Rossii. — M.: «Nauka». — 1999. — No. 3. — P. 44–49.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ИСПЫТАНИЙ КИНЕТИЧЕСКИМ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ

С. В. Сейдаметов, С. В. Лоскутов, М. О. Щетинина
*Запорожский национальный технический университет,
Запорожье, Украина*

Поступила в редакцию 27.03.2017

Исследовано влияние электрического потенциала, который возникает при электрическом контакте двух металлических тел с разной работой выхода электрона, на процесс деформирования алюминия в условиях испытаний кинетическим индентированием. Показано, что приложение внешнего электрического потенциала к образцам из алюминия во время индентирования приводит к снижению деформирующего усилия до 19 %.

Ключевые слова: индентирование, контактное электрическое сопротивление, электрический потенциал.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ НА ПРОЦЕС ДЕФОРМУВАННЯ АЛЮМІНІЮ В УМОВАХ ВИПРОБУВАНЬ КІНЕТИЧНИМ ІНДЕНТУВАННЯМ

С. В. Сейдаметов, С. В. Лоскутов, М. О. Щетинина

Досліджено вплив електричного потенціалу, який виникає при електричному контакті двох металевих тіл з різною роботою виходу електрона, на процес деформування алюмінію в умовах випробувань кінетичним індентуванням. Показано, що подача зовнішнього електричного потенціалу до зразків з алюмінію призводить до зниження деформуючого зусилля до 19 %.

Ключові слова: індентування, контактний електричний опір, електричний потенціал.

THE INFLUENCE OF ELECTRICAL POTENTIAL ON DEFORMATION PROCESS OF ALUMINIUM AT TESTS BY KINETIC INDENTATION

S. V. Seidametov, S. V. Loskutov, M. O. Schetinina

The influence of an electrical potential which occurs at electrical contact between two metal bodies with different work function, on deformation of aluminum at tests by kinetic indentation was studied. It was shown that the application of an external electric potential to the samples of aluminum decreases the deforming force up to 19 %.

Keywords: indentation, contact electrical resistance, electrical potential.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из первых работ, в которой было обнаружено влияние электрического потенциала на пластическую деформацию металлов, является работа Кишкина С. Т. и Клыпина А. А. [1]. Авторами была установлена зависимость скорости ползучести металлов от изменения электрического потенциала. В работе [2] исследовали влияние на скорость ползучести алюминия электрического потенциала, подаваемого на образец, и потенциала, возникающего вследствие контактной разности потенциалов при подсоединении различных металлов с разной работой выхода электрона.

Было обнаружено влияние обоих типов электрического воздействия на изменение относительной скорости ползучести алюминия. Исследование влияния электрического потенциала на микротвердость образцов из алюминия, циркония и кремнистого железа представлено в работе [3]. Авторы работы отмечают возможность существенного изменения микротвердости (до 15 %) за счет так называемого электрокапиллярного эффекта. Поскольку механические свойства металлов во многом определяются состоянием поверхности, можно ожидать, что изменение плотности поверхностной энергии,

которая вызвана электрическим потенциалом, может приводить к изменению макропластических характеристик металлов. Представляется интересным провести исследования влияния электрического потенциала, который возникает при электрическом контакте двух металлических тел с различной работой выхода электрона, на процесс деформирования металлов в условиях испытаний кинетическим индентированием.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала для испытаний кинетическим индентированием был выбран технический алюминий. Использовали образцы с размерами $75 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$. Диаметр сферического индентора из стали марки ШХ15 составлял 12,7 mm. В качестве металла, который электрически соединялся с образцами из алюминия, была выбрана медь (табл. 1).

Исследование влияния электрического потенциала на процесс деформирования алюминия в условиях испытаний кинетическим индентированием проводилось методом измерения контактного электрического сопротивления на специально разработанной и изготовленной экспериментальной установке, функциональная схема которой приведена в работе [4]. Изменялись следующие параметры: контактное электрическое сопротивление R_k , нагрузка P на сферический индентор.

Схема подачи электрического потенциала на образец из алюминия при испытаниях кинетическим индентированием представлена на рис. 1. Электрический контакт между образцами во всех экспериментах осуществлялся медным проводом диаметром 0,5 mm и длиной 700 mm.

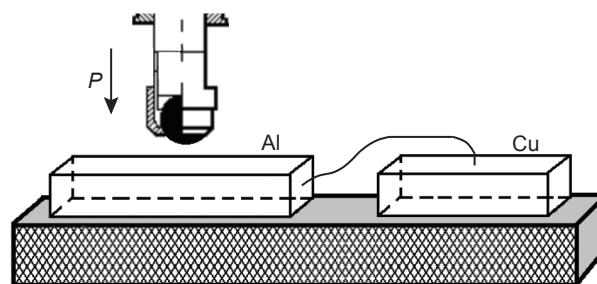


Рис. 1. Блок-схема узла экспериментальной установки

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование влияния электрического потенциала на процесс деформирования проводилось на основе анализа графиков зависимостей контактной проводимости $1/R_k$ от величины нагрузки P в процессе упруго-пластического деформирования контактного сопряжения «образец — сферический индентор». На рис. 2 представлена типичная кривая нагружения образцов из алюминия с периодической подачей внешнего электрического потенциала. Максимальная абсолютная погрешность, допущенная при измерениях контактной проводимости $1/R_k$, составляла $2 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$. Как видно из графика, подача внешнего электрического потенциала к образцу во время индентирования

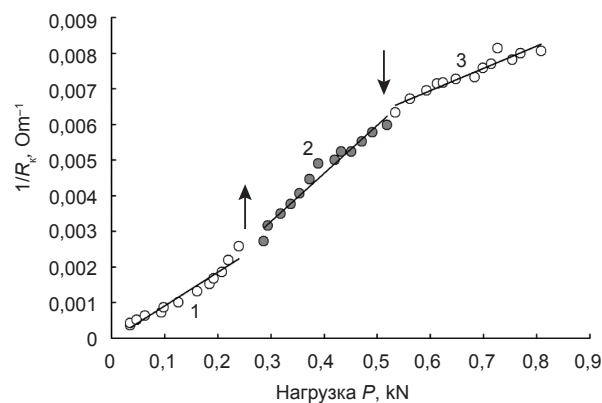


Рис. 2. Кривые нагружения алюминия с периодической подачей внешнего электрического потенциала. Участки 1, 3 — без потенциала; участок 2 — с потенциалом

Таблица 1

Линейные размеры и масса медных образцов

Номер медного образца	Форма	Масса m, g	Линейные размеры
1	Цилиндр	389	$D = 30 \text{ mm}, h = 88 \text{ mm}$
2	Диск	232	$D = 110 \text{ mm}, h = 3 \text{ mm}$
3	Параллелепипед	15	$a = 35 \text{ mm}, b = 10 \text{ mm}, c = 6 \text{ mm}$

приводит к изломам на кривой нагружения, что свидетельствует об изменении кинетики деформирования.

Для количественной оценки вклада электрического потенциала были рассчитаны значения нагрузки, которые необходимо приложить к образцам на участках индентирования с потенциалом и без потенциала для того, чтобы получить одинаковое значение R_k , которое обратно пропорционально фактической площади контакта [5], рис. 3.

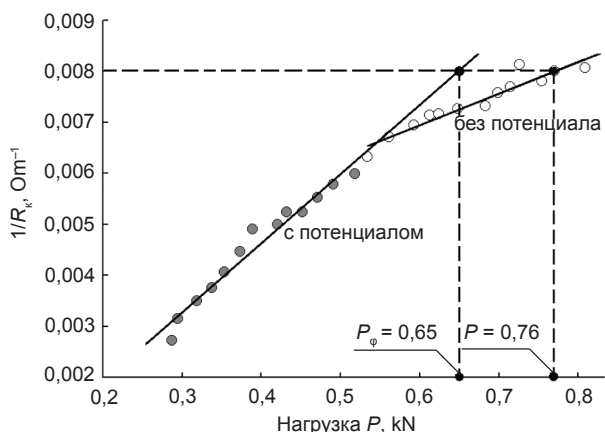


Рис. 3. Два типичных участка нагружения алюминия во внешнем электрическом поле (заштрихованные маркеры) и без поля (незаштрихованные маркеры) для количественной оценки вклада внешнего электрического потенциала

Анализируя графические характеристики кинетического индентирования, был сделан вывод, что электрический потенциал на контактом сопряжении, наведенный медными образцами, приводит к снижению деформирующего усилия на $\Delta P = 0,11, 0,14$ и $0,03$ kN соответственно (табл. 2).

Обнаруженные закономерности увеличения пластичности алюминия при подаче электрического потенциала можно объяснить следующим образом. При установлении электрического контакта между алюминием

и медью начнется обмен электронами, направление которого определяется значениями работы выхода электрона ϕ из металла. Значение ϕ для меди больше, чем для алюминия [7]. После выравнивания энергий Ферми в обоих металлах и установления термодинамического равновесия на поверхности алюминия возникнет избыточный положительный заряд, на поверхности меди — избыточный отрицательный. Энергетические уровни алюминия при этом опустятся, а меди поднимутся (рис. 4).

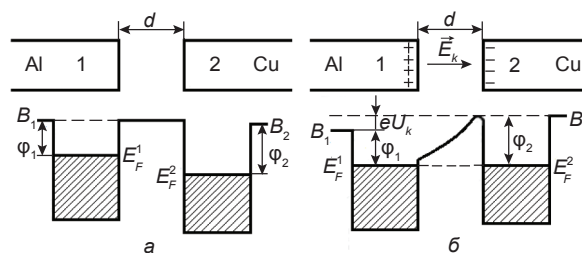


Рис. 4. Схема формирования контактной разности потенциалов; а — отсутствие и б — наличие электрического контакта между образцами

Как известно, работа выхода электрона из металла определяется разностью высоты потенциального барьера и энергии Ферми [8]. Таким образом, понижение уровня Ферми алюминия, вызванное подачей потенциала, приведет к понижению потенциального барьера для выхода на поверхность скользящих дислокаций. Предложенный механизм увеличения пластичности алюминия согласуется с результатами работ [3,6].

Влияние массы подключаемых медных образцов на процесс деформирования можно объяснить тем, что с увеличением массы образцов увеличивается площадь их поверхности. Чем больше площадь поверхности, тем больше ее емкость и тем больше свободных электронов от алюминия может перейти

Таблица 2

Влияние электрического потенциала на изменение деформирующего усилия

Номер медного образца	$\Delta P, \text{ kN}$	Относительное изменение деформирующего усилия $\epsilon, \%$
1	0,11	15
2	0,14	19
3	0,03	6

к меди. В соответствии с формулой для поверхностной энергии γ [9]:

$$\gamma = \frac{\varphi \cdot z}{1,885 \cdot 10^{-3} \cdot R^2},$$

(где z — число свободных электронов, R — атомный радиус), чем меньше свободных электронов у алюминия, тем меньше поверхностная энергия и, соответственно, потенциальный барьер для выхода дислокаций на поверхность.

ВЫВОДЫ

Исследовано влияние электрического потенциала, который возникает при электрическом контакте медных и алюминиевых образцов, на процесс деформирования алюминия в условиях испытаний кинетическим индентированием. Показано, что приложение внешнего электрического потенциала к образцам из алюминия во время индентирования приводит к снижению деформирующего усилия до 19 %. Увеличения пластичности алюминия при подаче электрического потенциала объясняется уменьшением плотности поверхностной энергии образцов, что приводит к снижению потенциального барьера для выхода на поверхность скользящих дислокаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кишкин С. Т., Клыпин А. А. Эффект электрического и магнитного воздействия на ползучесть металлов и сплавов // ДАН СССР. — 1973. — Т. 211, № 2. — С. 325–329.
2. Коновалов С. В., Данилов В. И., Зуев Л. Б., Филиппев Р. А., Громов В. Е. О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия // Физика твердого тела. — 2007. — Т. 49, № 8. — С. 1389–1391.
3. Зуев Л. В., Данилов В. И., Коновалов С. В., Филиппев Р. А., Громов В. Е. О влиянии контактной разности потенциалов и электрического потенциала на микротвердость металлов // Физика твердого тела. — 2009. — Т. 51, вып. 6. — С. 1077–1080.
4. Сейдаметов С. В., Лоскутов С. В., Щетинина М. О. Магнитопластический эффект в условиях испытаний на кинетическое индентирование // Металлофизика и новейшие

технологии. — 2015. — Т. 37, № 5. — С. 615–624.

5. Способ определения фактической площади касания сопряженных токопроводящих деталей: А. с. № 1430820 СССР, G01N3/56 / В. В. Левитин, С. В. Лоскутов. — 1973.
6. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Филиппев Р. А. О вариациях механических характеристик металлов при действии электрического потенциала // Металлы. — 2010. — № 4. — С. 39–45.
7. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов // Киев: Наукова думка, 1981. — 339 с.
8. Мамонова М. В., Прудников В. В., Прудникова И. А. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы // М.: Физматлит, 2011. — 400 с.
9. Мусохранов М. В., Антонюк Ф. И., Калмыков В. В. Определение значения поверхностной энергии через работу выхода электрона // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6.

REFERENCES

1. Kishkin S. T., Klypin A. A. Effekt elektricheskogo i magnitnogo vozdejstviya na polzuchest' metallov i splavov // DAN SSSR. — 1973. — Vol. 211, No. 2. — P. 325–329.
2. Konovalov S. V., Danilov V. I., Zuev L. B., Filip'ev R. A., Gromov V. E. O vliyaniy elektricheskogo potenciala na skorost' polzuchesti alyuminiya // Fizika tverdogo tela. — 2007. — Vol. 49, No. 8. — P. 1389–1391.
3. Zuev L. V., Danilov V. I., Konovalov S. V., Filip'ev R. A., Gromov V. E. O vliyaniy kontaktnoj raznosti potencialov i elektricheskogo potenciala na mikrotverdost' metallov // Fizika tverdogo tela. — 2009. — Vol. 51, vyp. 6. — P. 1077–1080.
4. Sejdametov S. V., Loskutov S. V., Schetinina M. O. Magnitoplasticheskiy effekt v usloviyah ispytaniy na kineticheskoe indentirovanie // Metallofizika i novejschie tehnologii. — 2015. — Vol. 37, No. 5. — P. 615–624.
5. Sposob opredeleniya fakticheskoy ploschadi kasaniya sopryazhennyh tokoprovodyaschih detalej: A. s. № 1430820 SSSR, G01N3/56 / V. V. Levitin, S. V. Loskutov. — 1973.
6. Zuev L. B., Danilov V. I., Filip'ev R. A.

- О вариациях механических характеристик металлов при действии электрического потенциала // *Metally*. — 2010. — No. 4. — P. 39–45.
7. Fomenko V. S. Emissionnye svoystva materialov // Kiev: Naukova dumka, 1981. — 339 p.
8. Mamonova M. V., Prudnikov V. V., Prudnikova I. A. Fizika poverhnosti. Teoreticheskie modeli i eksperimental'nye metody // M.: Fizmatlit, 2011. — 400 p.
9. Musohranov M. V., Antonyuk F. I., Kalmykov V. V. Opredelenie znacheniya poverhnostnoj energii cherez rabotu vyhoda elektrona // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. — 2014. — No. 6.

УДК 662.61.537.66.092

УДАРНО-ЗАЩИТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫМ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

**Н. И. Базалеев, С. Е. Донец, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко,
Ю. Ф. Лонин¹, А. Г. Пономарев¹, В. Т. Уваров¹**

*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины,
Харьков, Украина,*

*¹Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 27.03.2017

В работе рассмотрена возможность использования обработки конструкционных алюминиевых сплавов сильноточным релятивистским пучком электронов с целью улучшения их механических характеристик. Изучены особенности поверхностей излома области образцов, модифицированной излучением, установлены эффекты увеличения микротвердости, изотропной ориентации зерен. Сделаны предположения о перспективности такого вида обработки для формирования демпфирующих покрытий.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сильноточный релятивистский электронный пучок, облучение, модификация структуры.

УДАРНО-ЗАХИСНІ ПОВЕРХНІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, МОДИФІКОВАНИХ СИЛЬНОСТРУМОВИМ РЕЛЯТИВІСТСЬКИМ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ

**М. І. Базалєєв, С. Є. Донець, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко,
Ю. Ф. Лонін, А. Г. Пономарьов, В. Т. Уваров**

В роботі розглянута можливість застосування обробки конструкційних алюмінієвих сплавів потужнострумовим релятивістським пучком електронів з метою покращення їх механічних характеристик. Вивчено особливості поверхонь зламу області зразків, модифікованої випромінюванням, встановлені ефекти збільшення микротвердості, изотропної орієнтації зерен. Припускається перспективність такого виду обробки для формування демпфуючих покриттів.

Ключові слова: алюмінієві сплави, потужнострумовий релятивістський електронний пучок, опромінення, модифікація структури.

ALUMINUM ALLOYS SHOCK PROTECTIVE SURFACES MODIFIED BY HIGH CURRENT ELECTRON BEAM

**M. I. Bazaleev, S. E. Donets, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko,
Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, V. T. Uvarov**

The possibility of structural aluminum alloys processing by a high current relativistic electron beam in order to improve their mechanical characteristics is considered. The features of the fracture surfaces of the sample region modified by irradiation are studied. The effects of increasing the microhardness, and the isotropic orientation of the grains are established. Assumptions about the prospects of this type of treatment for the formation of damping coatings are made.

Keywords: aluminum alloys, high-current relativistic electron beam, irradiation, structure modification.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка принципов получения ударно-защитных поверхностей является одной из ключевых задач обеспечения безопасности, как здоровья людей, так и технических систем. Среди множества существующих

подходов к решению этой проблемы мы остановимся на рассмотрении технологии получения упрочненных поверхностей металлических пластин путем облучения их сильноточными релятивистскими электронными пучками (СРЭП).

Данная технология, как правило, представляет интерес с точки зрения придания модифицируемой поверхности требуемых эксплуатационных характеристик: микротвердость, стойкость к истиранию, коррозионная стойкость и др. Вместе с тем известно [1, 2], что механизм модифицирующего действия СРЭП заключается в радиационном, температурном и ударно-волновом воздействии. При этом глубина модифицированного слоя значительно превышает средний пробег электронов в материале. Кроме того, такой показатель, как значение микротвердости изменяется периодически по глубине пластины. Таким образом, разупрочненные прослойки могут демпфировать возможные внешние ударные воздействия [1, 3]. Также нами было установлено, что предварительная обработка алюминиевых сплавов СРЭП приводит к существенному улучшению показателей их сверхпластической деформации [4]. Еще более непредсказуемо изменяется распределение плотности дислокаций по объему облучаемого материала и их ориентация в пространстве [1]. Рассматривая приведенный перечень эффектов, возникающих при облучении металлических пластин СРЭП, с точки зрения возможности получения ударно защитных материалов, можно сказать, что они представляют определенные технологические перспективы. Понимая под обобщенным определением ударно-защитное свойство материала, его способность конвертировать кинетическую энергию ударяющего предмета в собственную внутреннюю энергию, а также в энергию собственных деформаций во всех направлениях, за исключением направления, в котором расположен защищаемый объект, приблизиться к реализации подобного требования возможно путем создания определенной анизотропии в ориентации зерен сплошного материала с изменением направления оси преимущественной ориентации на субмикронных пространственных периодах, создания хаотической пористости и плотности дислокаций. Одним из инструментов достижения указанных эффектов в пределах сплошного объема монолитного материала является облучения его СРЭП. Поскольку речь идет о хаотическом распределении характеристик

объекта уместно использовать аппарат фрактального анализа для количественной оценки их влияния на параметры деформации при приложенном усилии.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Поскольку, одним из требований к ударно-защитным материалам является их легкость и прочность, в качестве образцов были выбраны алюминиевые сплавы Д16 (91,9 % Al; 4,8 % Cu; 1,5 % Mg; 0,8 % Mn; примеси Fe и Si до 0,5 %) и АМг6 (92,197 % Al, 0,1 % Cu; 6 % Mg; 0,6 % Mn; 0,4 % Fe; 0,4 % Si; 0,2 % Zn; 0,1 % Ti; 0,003 % Be). К тому же алюминиевые сплавы сейчас рассматриваются как конструкционный материал для изготовления кузовов автомобилей, в том числе из соображений безопасности пассажиров при резком торможении.

Облучение проводили на импульсном электронном ускорителе ННЦ ХФТИ [5]: ТЕМП-А (ток — 2 кА, энергия электронов 0,3 МэВ, длительность импульса — 5 мкс).

Фрактографические исследования проводили с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-840.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Образцы облучаемых материалов готовили в виде, пригодном для последующих механических деформаций в различных режимах. Облучалась, только рабочая часть образцов. После облучения на поверхности наблюдались следы оплавления рис. 1.



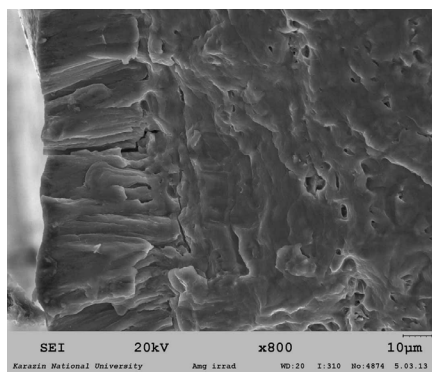
Рис. 1. Образцы алюминиевого сплава Амг6, обработанного СРЭП

На рис. 2 показана фрактограмма излома облученного сплава АМг6. На рис. 2а с левой стороны видна переплавленная пучком область мишени, для которой характерна вытянутость зерен перпендикулярно

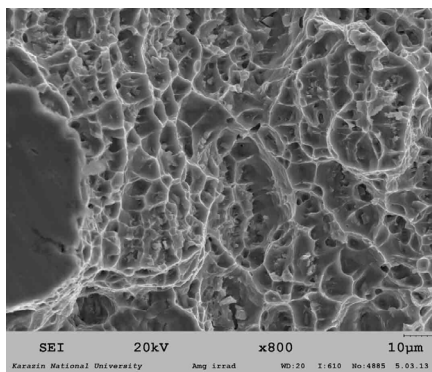
поверхности, на рис. 2б представлен фрагмент центральной части пластины с большим увеличением. Диаметр волокон составляет менее одного микрона. Микротвердость в этой области на 20 % выше, чем в глубине образца. Вытянутость волокон можно объяснить формированием волн сжатия-растяжения в объеме мишени. Далее следует область температурного воздействия и область ударно-волнового воздействия. В нашем случае параметры пучка таковы, что выполняется условие возникновения ударных волн согласно соотношению [1]

$$I \geq \frac{C_L^4 \rho R_0 \tau}{S} \quad (1)$$

где I — интенсивность пучка, C_L — продольная скорость звука в материале мишени, ρ — плотность, R_0 — пробег электронов в мишени, длительность импульса, S — площадь облучаемой поверхности, τ — длительность импульса. Наличие ударных волн приводит к возникновению демпфирующей области между переплавленным слоем и областью температурного и ударно-волнового воздействия.



а



б

Рис 2. Фрактограммы излома облученного сплава АМг6: а — переплавленная часть образца, б — центральная часть образца

Таким образом, в результате облучения, мы имеем на отрезке толщины сплошной пластины материал, который характеризуется различными механическими свойствами, с хаотичной закономерностью распределения упругих свойств в пространстве.

На дифрактограмме, приведенной на рис. 3, наблюдается снижение интенсивности пика (111) для облученного образца, что может объясняться перераспределением электронной структуры, в частности возможного изменения соотношения валентных и ковалентных связей, обусловленных смещением к поверхности легирующих элементов. Вероятно, также, что обеднение поверхностного слоя фазой Al_2O_3 , обусловлено перемещением при облучении переплавленного слоя и десорбцией растворенного кислорода.

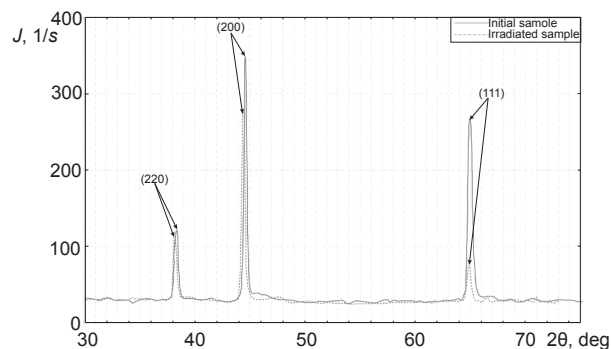


Рис. 3. Дифрактограмма сплава до и после облучения

Изменение ориентации зерен, распределений электронной структуры и элементного состава позволяет говорить об анизотропии механических свойств материала, возможном повышении его демпфирующих свойств [6], поскольку при подобной анизотропии происходит возникновение ротационных мод в процессе деформации.

Различия в структуре ударного излома алюминиевого сплава Д16 были описаны нами в работе [7]. Вместе с тем, данные приведенные в работе [6] касательно волнового характера движения дефектов на границе раздела сред с различной структурой, дают основания переосмыслить характер излома на рис. 4. Как видно на рис. 4а, излом облученной части мишени сопровождался выделением энергии внутренних напряжений, проявляющейся в виде ротаций мезомасштабного уровня, тогда как в необлученной части рис. 4б,

разрушение реализовалось как хрупкий межкристаллитный излом. С точки зрения поглощения внешней ударной энергии материалом, безусловно, предпочтительней явля-

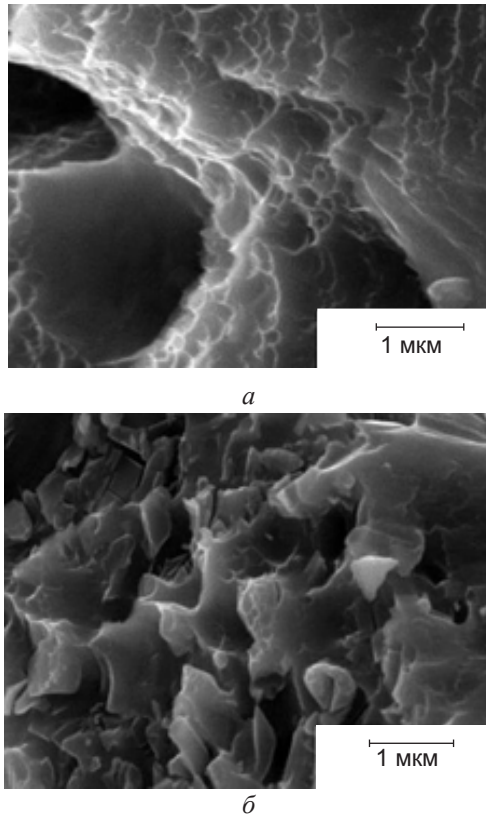


Рис. 4. Фрактограммы ударного излома сплава Д16: *а* — излом в облученной области, *б* — излом в необлученной области

ется реализация ротаций в области раздела.

Нелинейность поведения механических свойств алюминиевого сплава с модифицированным поверхностным слоем в условиях приложения ударной нагрузки будет следовать из модифицированного выражения Холла-Петча [8]

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 + F(d), \\ H &= H_0 + F(d),\end{aligned}\quad (2)$$

где σ — предел текучести, H — твердость, d — размер зерна.

Функциональная зависимость указывает на довольно неустановленную роль размера, формы и ориентации зерна, как ресурса для получения заданных свойств материала, причины нелинейности из отклонения в поведении материала. Непредсказуемость поведения сплавов с субмикроструктурными и наномасштабными размерами зерен обусловлена именно многообразием процессов на

границах зерен, которые являются участками как генерации и скопления, так и аннигиляции дислокаций [9]. Роль дислокационного взаимодействия при деформации материала описывается выражением для напряжения пластического течения [9, 11]

$$\tau = \tau_f + \alpha \mu b \rho^{1/2}, \quad (3)$$

где ρ — плотность дислокаций, τ_f — напряженность трения при взаимодействии движущихся дислокаций с решеточными дефектами, α — постоянная взаимодействия дислокаций друг с другом. В случае существенной анизотропии в ориентации зерен, как это происходит вследствие облучения, динамика изменения плотности дислокаций без учета состояния границ зерен описывается выражением [9, 10]

$$\frac{d\rho}{dt} = \left(\frac{\beta}{d} + \frac{1}{\lambda_m} + \frac{1}{\lambda_f} \right) u \rho - \left(h_a u \rho^2 + \frac{\rho}{t_d} \right), \quad (4)$$

где λ_m , λ_f — расстояния свободного пробега дислокаций между актами двойного поперечного скольжения, u — скорость перемещения дислокаций вдоль плоскости скольжения, h_a — характерное время аннигиляции дислокаций, зависящее от температуры и энергии дефектов упаковки. В правой части уравнения (4) приведена разность между многообразием механизмов рождения и аннигиляции дислокаций, более подробно описанная в [9], но которая подтверждает, что при преимущественной реализации того или иного механизма мы получим существенно различные значения для напряжения пластического течения. Отмечаемые нами выше эффекты увеличения микротвердости в модифицированной поверхностной области дают основание ожидать увеличения предела текучести [11].

ВЫВОДЫ

Модификация поверхностей алюминиевых сплавов материалов путем обработки сильноточными релятивистскими электронными пучками позволяет увеличивать значение микротвердости в поверхностной области, таким образом повышая значение напряжения трещинообразования,

долговечности под нагрузкой. Создание раз-
нонаправленности в ориентации зерен моди-
фицированной и основной области, позволяет
рассматривать сильноточный релятивистский
электронный пучок, как инструмент модифи-
кации механических свойств алюминиевых
сплавов. Работа выполнена при частичной
поддержке проекта НАН Украины № 62/17-н.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко В. И., Валяев А. Н., Погребняк А. Д. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // УФН. — 1999. — Т. 169, № 11. — С. 1243–1271.
2. Базалеев Н. И., Брюховецкий В. В., Клепиков В. Ф. и др. Формирование аморфизированного наплава при воздействии импульсного трубчатого пучка электронов на поверхность металлов // Вопросы атомной науки и техники. — 2005. — № 5(88). — С. 146–149.
3. Klepikov V. F., Kivshik V. F. Berezovsky S. V., et. al. The structure of the undersurface layer of alloys in the region of the relativistic tube-like electron beam and thermodynamic models // Problems of Atomic Science and Technology. — 2004. — No. 1(42). — P. 215–217.
4. Брюховецкий В. В., Литвиненко В. В., Клепиков В. Ф. и др. Влияние импульсного электронного облучения на параметры сверхпластичности дюралюмина // Физика и химия обработки материалов. — 2002. — № 4. — С. 33–38.
5. Уваров В. Т. и др. Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким к. п. д. Препринт ХФТИ 84–30. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. — 13 с.
6. Панин В. Е., Егорушкин В. Е. Солитоны кривизны как обобщенные волновые носители пластической деформации и разрушения // Физ. Мезомех. — 2013. — Т. 16, № 3. — С. 7–26.
7. Базалеев Н. И., Брюховецкий В. В., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В., Пономарев А. Г., Уваров В. В., Уваров В. Т. Формирование аморфизированного наплава при воздействии импульсного трубчатого пучка электронов на поверхность металлов // Вопросы атомной науки и техники. — 2005. —

№ 5(88). — С. 146–149.

8. Petch N. J. The cleavage strength of polycrystals // J. Iron Steel Instr. — 1953. — Vol. 174: 25–8.
9. Малыгин Г. А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов // Физика твердого тела. — 2007. — Т. 49, вып. 6. — С. 961–982.
10. Кайбышев О. А., Валиев Р. З. Границы зерен и свойства металлов. — М.: Металлургия, 1987. — 213 с.
11. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.

REFERENCES

1. Bojko V. I., Valyaev A. N., Pogrebnyak A. D. Modifikaciya metallicheskih materialov impul'snymi moschnymi puchkami chastic // UFN. — 1999. — Vol. 169, No. 11. — P. 1243–1271.
2. Bazaleev N. I., Bryuhoveckij V. V., Klepikov V. F. i dr. Formirovanie amorfizirovanogo naplava pri vozdejstvii impul'snogo trubchatogo puchka elektronov na poverhnost' metallov // Voprosy atomnoj nauki i tehnik. — 2005. — No. 5(88). — P. 146–149.
3. Klepikov V. F., Kivshik V. F. Berezovsky S. V., et. al. The structure of the undersurface layer of alloys in the region of the relativistic tube-like electron beam and thermodynamic models // Problems of Atomic Science and Technology. — 2004. — No. 1(42). — P. 215–217.
4. Bryuhoveckij V. V., Litvinenko V. V., Klepikov V. F. i dr. Vliyanie impul'snogo elektronno-go oblucheniya na parametry sverhplastichnosti dyuralyumina // Fizika i himiya obrabotki materialov. — 2002. — No. 4. — P. 33–38.
5. Uvarov V. T. i dr. Poluchenie sil'notochnyh puchkov mikrosekundnoj dlitel'nosti s vysokim k. p. d. Preprint HFTI 84–30. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. — 13 p.
6. Panin V. E., Egorushkin V. E. Solitony krivizny kak obobschennye volnovye nositeli plasticheskoy deformacii i razrusheniya // Fiz. Mezomeh. — 2013. — Vol. 16, No. 3. — P. 7–26.
7. Bazaleev N. I., Bryuhoveckij V. V., Klepikov V. F., Litvinenko V. V., Ponomarev A. G., Uvarov V. V., Uvarov V. T. Formirovanie

- amorfizirovannogo naplava pri vozdeystvii impul'snogo trubchatogo puchka elektronov na poverhnost' metallov // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. — 2005. — No. 5(88). — P. 146–149.
8. Petch N. J. The cleavage strength of polycrystals // J. Iron Steel Instr. — 1953. — Vol. 174: 25–8.
 9. Malygin G. A. Plastichnost' i prochnost' mikro- i nanokristallicheskih materialov // Fizika tverdogo tela. — 2007. — Vol. 49, vyp. 6. — P. 961–982.
 10. Kajbyshev O. A., Valiev R. Z. Granicy zeren i svojstva metallov. — M.: Metallurgiya, 1987. — 213 p.
 11. Markovec M. P. Opredelenie mehanicheskikh svojstv metallov po tverdosti. — M.: Mashinostroenie, 1979. — 191 p.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК TmS И ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

М. Г. Тетелашвили, З. У. Джабуа, А. В. Гигинеишвили

*Грузинский технический университет, департамент инженерной физики,
Тбилиси, Грузия*

Поступила в редакцию 03.05.2017

Разработана технология приготовления тонких кристаллических пленок TmS методом дискретного вакуумно-термического испарения предварительно синтезированного материала. При комнатной температуре измерены зависимости удельного электросопротивления и постоянной Холла от размеров характеризующих частиц приготовленных пленок. Показано, что электрические параметры пленок TmS сильно зависят от размеров характеризующих частиц.

Ключевые слова: пленка, напыление, удельное электросопротивление, постоянная Холла, характеризующая частица.

ПРИГОТУВАННЯ ТОНКИХ ПЛІВОК TmS ТА ЇХ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

М. Г. Тетелашвілі, З. У. Джабуа, А. В. Гігінеїшвілі

Розроблено технологію приготування тонких кристалічних плівок TmS методом дискретного вакуумно-термічного випаровування попередньо синтезованого матеріалу. При кімнатній температурі виміряні залежності питомого електроопору та постійної Холла від розмірів характеризуючих частинок приготованих плівок. Показано, що електричні параметри плівок TmS сильно залежать від розмірів характеризуючих частинок.

Ключові слова: плівка, нанесення, питомий електроопір, постійна Холла, характеризуючі частинки.

PREPARING OF TmS THIN FILMS AND THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES

M. G. Tetelashvili, Z. U. Dzhabua, A. V. Gigineishvili

The technology of preparation of thin crystal films of TmS by method discrete vacuum-thermal evaporation of previously synthesized material is developed. At the room temperature dependences of specific resistance and Hall's constant on the sizes of the characterizing particles of the prepared films are measured. It is shown that electric parameters of films of TmS strongly depend on the sizes of the characterizing particles.

Keywords: a film, a dusting, specific resistance, Hall's constant, the characterizing particle.

Моносольфиды редкоземельных элементов (РЗЭ) являются перспективными материалами для микроэлектроники. На их основе разработаны тензодатчики, термогенераторы, устройства для записи и хранения информации и т. д. [1–5] Но не все моносольфиды РЗЭ, особенно в виде тонких пленок, исследованы достаточно полно. К таким малоисследованным материалам относится моносольфид тулия.

Целью представленной работы являлась разработка технологии приготовления пленок моносольфида тулия и исследование их электрофизических свойств.

Пленки TmS были приготовлены методом дискретного вакуумно-термического

испарения предварительно синтезированного материала на различных подложках: монокристаллический кремний, ситалл, сапфир, кварц. Подложки имели форму прямоугольного параллелепипеда размерами $15 \times 8 \times 0,5$ мм. При напылении пленок вакуум в рабочей камере составлял $\sim 10^{-5}$ Па, температура испарителя равнялась ~ 2750 К, температура подложки варьировалась в области $720\text{--}1200 \pm 5$ К. Расстояние от испарителя до подложки составляло 70 мм. Скорость напыления составляла $\sim 68\text{--}75$ Å/с. Толщина пленок варьировалась в диапазоне 0,3–0,8 мкм. Многочисленные эксперименты показали, что оптимальным размером зерен напыляемого материала является 80–90 мкм.

Как показал рентгенодифракционный анализ при температурах подложки 720–910 К образуются однофазные поликристаллические пленки, только в отдельных случаях на рентгенодифрактограммах наблюдались дополнительные максимумы, соответствующие малым количествам Tm_2S_3 и они, по-видимому, носили случайный характер. В диапазоне температур 935–1120 К пленки являлись однофазными, а при более высоких температурах однофазность нарушается — в пленках наблюдается вторая фаза Tm_5S_7 . Таким образом, можно заключить, что оптимальной температурой подложки является 935–1120 К. Приготовленные пленки имели темно-желтый цвет.

Рентгеновский микронзондовый анализ показал, что пленки содержат 50,2 % Tm и 49,8 % S. Согласно снимкам поверхности пленок снятых во вторичных рентгеновских лучах, компоненты распределены равномерно.

Анализ рентгенодифрактограмм и соответствующих электронограмм показал, что приготовленные пленки имеют кубическую решетку типа NaCl с параметром решетки $a = 5,39 \pm 0,05 \text{ \AA}$, что хорошо согласуется с параметром решетки объемного кристалла TmS ($a = 5,417 \text{ \AA}$) [6].

Статистическая обработка снимков снятых электронным сканирующим микроскопом с поверхности пленок TmS приготовленных при температуре подложки 980 К, показала, что размер характеризующих частиц изменяется в пределах 18–57 нм, при этом ~70 % частиц имеют диаметр 32 нм.

Исследования показали, что параметр решетки пленок зависит от размера характеризующих частиц, в частности, с увеличением этого размера увеличивается параметр решетки, что, по-видимому, связано с влиянием сил поверхностных напряжений до и после конденсации пленки на подложке: частицам малых размеров соответствует большее давление, которое формируется внутри частиц под влиянием поверхностных сил. Эксперименты показали, что характерные размеры частиц зависят от температуры подложки в случае постоянных других технологических параметров (температура испарителя, состав испаряемого

вещества и размер зерен порошка, расстояние от испарителя до подложки). В частности, при снижении температуры подложки снижаются размеры характеризующих частиц. Например, при температуре подложки 930 К размеры характеризующих частиц равны ~18 нм, а при температуре подложки 1115 К — ~48 нм.

При комнатной температуре проведено измерение зависимости удельного электросопротивления и постоянной Холла от размеров характеризующих частиц. Все измерения проводили на одних и тех же однофазных пленках. Удельное электрическое сопротивление измеряли компенсационным методом, постоянную Холла — при постоянном магнитном поле напряженностью $16 \times 10^5 \text{ А/м}$. Точность измерения удельного сопротивления была не хуже 3–4 %, а постоянной Холла — 8–10 %. На рис. 1 показана зависимость удельного сопротивления от размера характеризующих частиц. Как видно, при увеличении размера характеризующих частиц удельное сопротивление возрастает. Нами также измерено зависимость температурного коэффициента сопротивления от размера зерна, который показал, что увеличения размера зерен температурный коэффициент сопротивления возрастает от $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ до $50 \cdot 10^{-4} \text{ К}$ (рис. 2). Что касается постоянной Холла, с увеличением размеров характеризующих частиц она уменьшается, как это видно из рис. 3. Постоянная Холла имеет отрицательный знак, что свидетельствует о том, что носителями заряда являются электроны. На основе экспериментальных данных рассчитана концентрация электронов при однозонном приближении (рис. 3). Как видно из рисунка с увеличением размеров

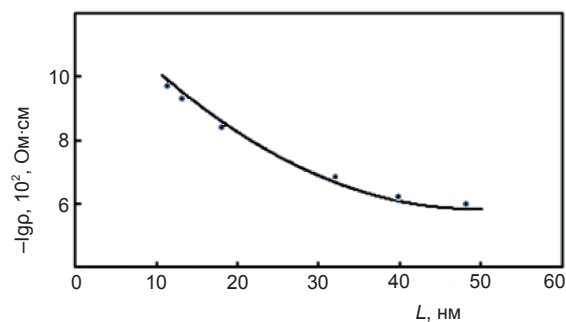


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления от размеров характеризующих частиц в пленках TmS

зерен концентрация электронов уменьшается, что, в свою очередь, повышает температурный коэффициент сопротивления.

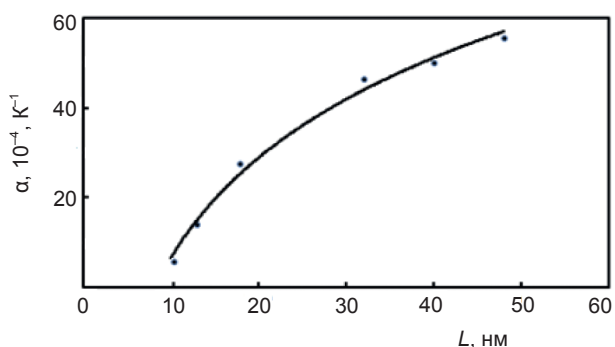


Рис. 2. Зависимость температурного коэффициента сопротивления от размеров характеризующих частиц в пленках TmS

Таким образом, измерения показывают, что электрофизические параметры тонких пленок моносulfида туллия сильно зависят от размеров зерен.

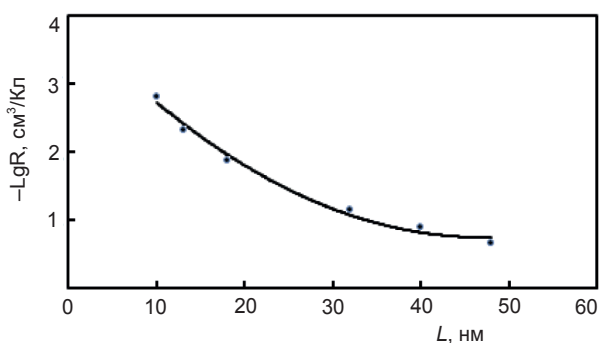


Рис. 3. Зависимость постоянной Холла от размеров характеризующих частиц в пленках TmS

Однозначное объяснение характера зависимости электрофизических параметров от размеров характеризующих частиц в пленках TmS пока невозможно и требует проведения дополнительных экспериментов.

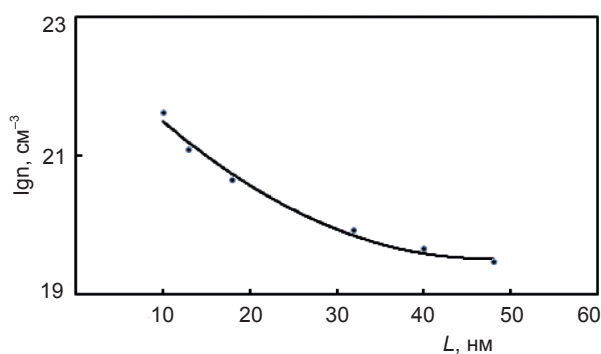


Рис. 4. Зависимость концентрации электронов от размеров характеризующих частиц в пленках TmS

ЛИТЕРАТУРА

1. Miodushevsky P. V. Potential application of SmS_x material in microelectronics // ICEP Proceedings. — 2001. — P. 336–339.
2. Parashar V., Pandey Shiv K., Pandey Avinash C. Low-temperature synthesis of quantum size gadolinium monosulfide (GdS) nanoparticles and their pathogen capture efficiency. — Chem. Com. — 2010. — Vol. 46. — P. 3143–3145.
3. Высоких А. С., Миодушевский П. В., Андреев П. О. Получение изделий из SmS для электроники // Вестник Тюменского государственного университета. Химия. — 2011. — № 5. — С. 179–185.
4. Jabua Z. U., Kupreishvili I. L., Giginishvili A. V. Preparation and electrical and optical properties of TbS films // Inorganic Materials. — 2014. — Vol. 50, No. 4. — P. 330–333.
5. Semei V., Cahay M., Thien Binh Vu. Patchwork field emission properties of lanthanum monosulfide thin films // J. Vac. Sci. Technol. — 2006. — Vol. 24, No. 5. — P. 2412–2416.
6. Ярембаш Е. И., Елисеев А. А. Халкогениды редкоземельных элементов. — М.: «Наука», 1975. — 258 с.

REFERENCES

1. Miodushevsky P. V. Potential application of SmS_x material in microelectronics // ICEP Proceedings. — 2001. — P. 336–339.
2. Parashar V., Pandey Shiv K., Pandey Avinash C. Low-temperature synthesis of quantum size gadolinium monosulfide (GdS) nanoparticles and their pathogen capture efficiency. — Chem. Com. — 2010. — Vol. 46. — P. 3143–3145.
3. Vysokih A. S., Miodushevskij P. V., Andreev P. O. Poluchenie izdelij iz SmS dlya elektroniki // Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Himiya. — 2011. — No. 5. — P. 179–185.
4. Jabua Z. U., Kupreishvili I. L., Giginishvili A. V. Preparation and electrical and optical properties of TbS films // Inorganic Materials. — 2014. — Vol. 50, No. 4. — P. 330–333.
5. Semei V., Cahay M., Thien Binh Vu. Patchwork field emission properties of lanthanum monosulfide thin films // J. Vac. Sci. Technol. — 2006. — Vol. 24, No. 5. — P. 2412–2416.
6. Yarembash E. I., Eliseev A. A. Halkogenidy redkozemel'nyh elementov. — M.: «Nauka», 1975. — 258 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ОГРАНИЧЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Х. Т. Йулдашев, Ш. С. Ахмедов, У. С. Рустамов, К. М. Эргашев

*Ферганский политехнический институт,
г. Фергана, Узбекистан*

Поступила в редакцию 15.05.2017

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований явления в плоской газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. Показана возможность ограничения фона, который является препятствием для повышения контрастности выходного изображения.

Ключевые слова: преобразователь изображений, полупроводниковый электрод, ионизационная камера, газоразрядный промежуток, полуизолирующий арсенид галлия, фотоприемник, вольтамперная характеристика, фототок, длительность импульса, импульсное напряжение.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОНОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА МОЖЛИВОСТІ ЙОГО ОБМЕЖЕННЯ В НАПІВПРОВІДНИКОВІЙ ІОНІЗАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

Х. Т. Йулдашев, Ш. С. Ахмедов, У. С. Рустамов, К. М. Ергашев

У статті наводяться результати експериментальних досліджень явища в плоскій газорозрядній комірці з напівпровідниковим електродом. Показана можливість обмеження фону, який є перешкодою для підвищення контрастності вихідного зображення.

Ключові слова: перетворювач зображень, напівпровідниковий електрод, іонізаційна камера, газорозрядний проміжок, напівізолюючий арсенід галію, фотоприймач, вольтамперна характеристика, фотострум, тривалість імпульсу, імпульсна напруга.

STUDY OF BACKGROUND RADIATION AND ITS POSSIBILITY LIMITATIONS IN THE SEMICONDUCTOR IONIZATION SYSTEM

Kh. T. Yuldashev, Sh. S. Akhmedov, U. S. Rustamov, K. M. Ergashev

Results of experimental exploration phenomenon in plane gas discharge cell with semiconductor electrode reduces in the article. Possibility of limitation of background, which appears the hindrance for raising of contrast gratuity representation was shown.

Keywords: image converter, semiconductor electrode, ionization chamber, gas-discharge gap, semi-insulating gallium arsenide, photodetector, volt-ampere characteristic, photocurrent, pulse duration, impulse voltage.

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковая фотографическая система ионизационного типа, в которой один из электродов — это пластина из высокоомного и фоточувствительного полупроводника, нашла в последние годы практическое применение. На ее основе созданы так называемые фотоионизационные системы, которые используются для скоростной ИК-фотографии [1–2], бессеребряной фотографии, как ИК-преобразователи изображений [3–4], как устройства для визуализации электрических и структурных дефектов в высокоомных полупроводниках, как источник равномерного по большой площади УФ-излучения,

как система, где образуются диссипативные структуры в газовой плазме [5].

Полупроводниковая ионизационная система [6] работает в двух режимах: ждущем и стробирующем. В ждущем режиме в основном используются высокоомные полупроводники с $\rho \geq 10^7$ Ом·см при постоянном токе. В стробирующем режиме применяются, в том числе и относительно низкоомные фотоприемники при импульсном режиме. Во втором случае темновой ток и тем самым фоновое излучение на выходном экране полупроводниковой ионизационной камеры значительно больше.

Исследование зависимостей среднего тока от различных величин (фототок, длительность импульса, импульсное напряжение, давление газа и т. д.) в системе представляет значительный интерес не только для понимания физического механизма явлений, но и имеет прикладное значение.

Проведенные в последнее время исследования вселяют надежду на то, что новый подход к плоской газоразрядной ячейке с полупроводниковым фоточувствительным электродом приведет к новому классу приборов. В наших следующих работах покажем, что изменение конфигурации и расположения элементов ячейки, а также применение новых фотоприемников позволяет создать уникальную фотографическую систему, а точнее современный вид приборов ночного видения.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований явления в плоской газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом. В рамках этой работы показаны возможности ограничения фона, который является препятствием для повышения контрастности выходного изображения, а в целом улучшения характеристик системы.

2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ

Принципиальная схема полупроводниковой ионизационной фотографической системы приведена на рис. 1. Светочувствительным фотоприемником (2) служит полупроводниковый арсенид галлия ($\rho \approx 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), на одну из поверхностей которого напылен полупрозрачный никелевый контакт (1). Внутренняя поверхность пластины отделена от поверхности регистрирующего слоя (4) газовым зазором (3).

Регистрирующий слой (4) располагается на прозрачном проводящем контрэлектроде (5), выполненном, например, из стеклянной пластинки, покрытой проводящей пленкой SnO_2 . При подключении к системе напряжения происходит пробой газового разряда, отличающийся тем, что в разрядной ячейке присутствует распределенное сопротивление полупроводника, способствующее демпфированию токовых неустойчивостей.

Сопротивление, полупроводника полностью определяет величину плотности тока по площади сечения и при освещении полупроводника может управлять величиной и распределением тока в газовом зазоре [7].

Для измерений использована обычная схема ионизационной системы с полупроводниковым фотоприемником из компенсированного арсенида галлия с темновым удельным сопротивлением $\rho = 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, обеспечивающим выходные импульсы напряжения длительностью 0,5–30 мкс, до 1,6 кВ. Измерения выполнены при двух значениях величины газоразрядного зазора — 40 мкм и 100 мкм — и давлении воздуха 0,2 атм.

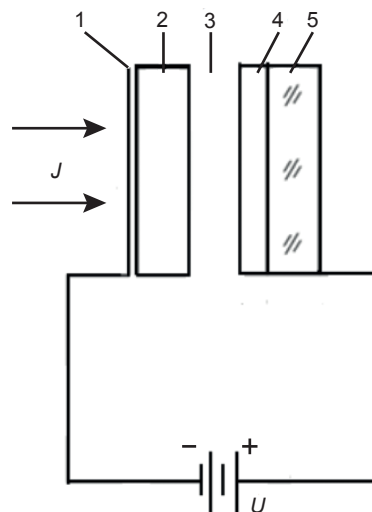


Рис. 1. Схематически — ионизационная система. 1 — полупрозрачный электрод, 2 — полупроводниковый фотоприемник, 3 — газоразрядный зазор, 4 — регистрирующий слой, 5 — прозрачный контрэлектрод

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

При подаче прямоугольного импульса напряжения на ячейку, состоящую из газоразрядного промежутка контактирующего, с одной стороны с полупроводниковым электродом, а с другой — с контрэлектродом, происходит пробой газа. Появление токовых импульсов характеризует наличие легко регистрируемого времени задержки θ относительно момента включения напряжения. Другая особенность токовых импульсов — наличие статистического разброса величины задержки пробоя χ относительно некоторого его значения.

На рис. 2 приведена схема осциллограмм последовательных импульсов тока, иллюстрирующая характер проявления статистического

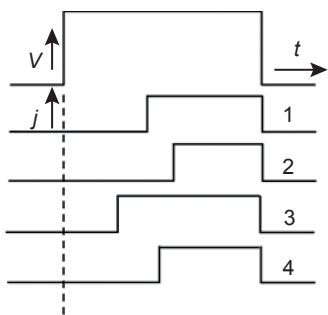


Рис. 2. Схема осциллограмм тока j пробоя при последовательно подаваемых импульсах напряжения V

разброса момента зажигания разряда. В полупроводниковой ионизационной камере сняты осциллограммы последовательных импульсов тока, иллюстрирующая характер проявления статистического разброса момента зажигания разряда.

Поскольку фотографическое действие на регистрирующую среду определяется величиной среднего количества электричества, нас интересовали не только значения заряда в каждом индивидуальном импульсе тока, но и средние значения заряда и тока за период. Поэтому первая экспериментальная задача состояла в определении среднего тока, усредненного для каждого момента времени по общему количеству импульсов за время экспонирования.

Способ получения кинетики среднего тока из денситометрирования осциллограмм схематически пояснен на рис. 3а, где

оптическая плотность на осциллограмме условно изображена линиями разной толщины, а плавная кривая на рис. 3б показывает полуценную кинетику среднего тока.

Расчет временной зависимости напряжения на газоразрядном зазоре $U(t)$ до пробоя может быть выполнен аналогично задаче о зарядке двухслойного конденсатора [8], один из слоев которого (полупроводник) имеет диэлектрическую проницаемость ϵ_1 , толщину d_1 и удельную проводимость σ_1 , а второй слой (газовый промежуток) — $\epsilon_2 = 1$, $\sigma_2 = 0$ и d_2 :

$$U(t) = \frac{U_0}{R \frac{1}{4\pi d_2} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right)} \times$$

$$\times \left[\begin{aligned} & \left(\frac{4\pi\sigma_1\tau_1 - 1}{\epsilon_1} \right) \exp(-t/\tau_1) - \\ & - \left(\frac{4\pi\sigma_1\tau_2 - 1}{\epsilon_1 d_1} \right) \exp(-t/\tau_2) - \frac{4\pi\sigma_1}{\epsilon_1} (\tau_1 - \tau_2) \end{aligned} \right], \quad (1)$$

где $\tau_1 = \frac{R \epsilon_1}{16\pi^2 d_1 d_2}$; $\tau_2 = \frac{d_1}{\sigma_1} \left(\frac{\epsilon_1}{4\pi d_1} + \frac{1}{4\pi d_2} \right)$.

U_0 — подаваемое напряжение; R — внутреннее сопротивление источника напряжения.

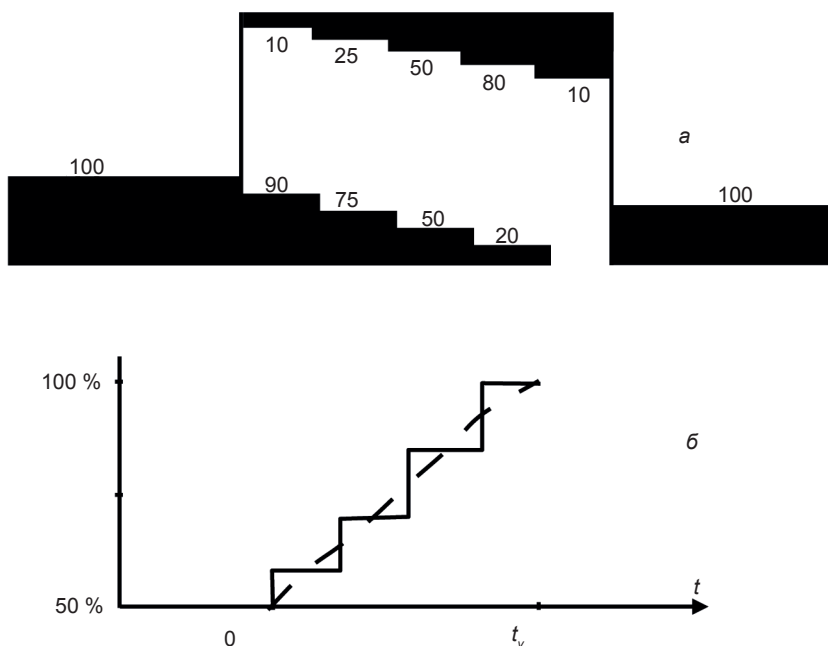


Рис. 3. а — схематически — распределение оптической плотности почернения на осциллограмме токового импульса, б — временная зависимость среднего тока, полученная из осциллограммы (а)

При пренебрежимо малой величине внутреннего сопротивления генератора поданное напряжение в начальный момент времени перераспределяется обратно пропорционально емкостям

$$\frac{U}{U_0 - U} = \frac{d_1}{\varepsilon_1 d_2} \quad (2)$$

Затем с постоянной времени τ_2 все напряжение переходит на разрядный зазор. Таким образом, пробой зазора происходит в условиях возрастающего на нем напряжения. Поскольку σ_1 зависит от освещения, величина задержки пробоя определяется временем $\tau_2 = f(\sigma_1)$. Другой определяющий задержку пробоя фактор — естественный статический разброс времени пробоя, являющийся единственной причиной задержки пробоя в ячейке с эквипотенциальными электродами.

Таким образом, общее время задержки определяется двумя составляющими: временем задержки емкости разрядного зазора через освещенный полупроводник и временем статистической задержки пробоя при данном напряжении в зазоре.

Для определения величины стационарного напряжения были сняты стационарные ВАХ (рис. 4), из которых следует, что значение напряжения пробоя составляет 500 В при длине зазора 100 мкм. Величина сопротивления при освещении меняется от 50 МОм до 790 кОм.

На рис 5а и 5б приведены зависимости среднего тока в импульсе от интенсивности света при разных значениях длительности импульса напряжения. Характерная

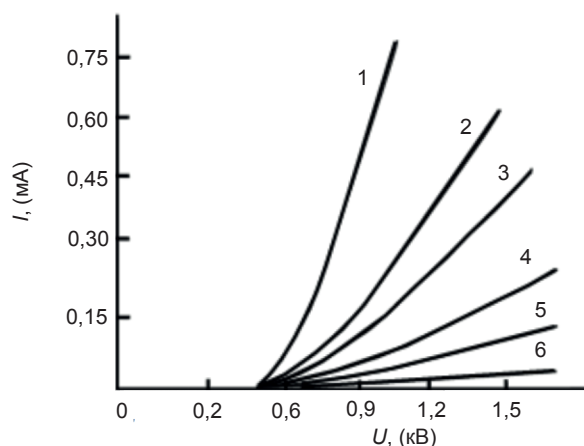
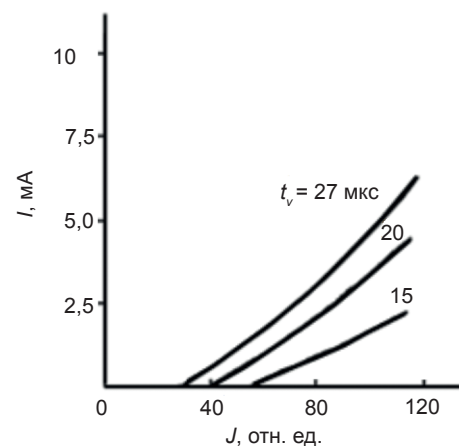
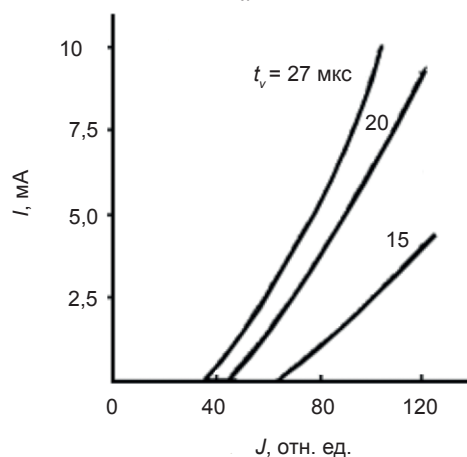


Рис. 4. Стационарные ВАХ системы при разных значениях освещенности полупроводника. Интенсивность освещения равна (в отн. ед.): 1 — 100 %, 2 — 72, 3 — 50, 4 — 25, 5 — 10, 6 — 0 %



а



б

Рис. 5. а — люксамперные характеристики системы при разных значениях длительности импульса напряжения при толщине зазора $d = 40$ мкм, б — то же при толщине зазора $d = 100$ мкм

особенность кривых — «пороговый» вид этих зависимостей, что является следствием эффекта задержки пробоя. При увеличении длительности импульса напряжения уменьшается пороговое значение интенсивности освещения, ниже которого ток проводимости в системе, а следовательно и свечение разряда, отсутствуют. Отметим также, что начиная с порогового значения, ток, а также прошедший заряд, резко возрастают с увеличением интенсивности света. Полученные «пороговые» зависимости среднего прошедшего количества электричества и величина среднего тока с регулированием величины порога представляют значительный интерес, являясь в принципе новым методом дискриминации фона. Подобная возможность динамической дискриминации фона, несомненно, реализуема в независимых газоразрядных ячейках с распределенным сопротивлением полупроводникового электрода

в полупроводниковой фотографической системе ионизационного типа.

Проведены исследования режима динамической дискриминации фона с фотографической регистрацией изображения при разных значениях задержки пробоя и разной освещенностью отдельных участков площади полупроводникового фоточувствительного электрода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показанная задержка пробоя в газоразрядной ячейке с полупроводниковым электродом при электрических и фотоэлектрических измерениях в целом подтверждает возможность реализации динамического ограничения фона на заданном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайдаров З., Хайдарова К. З., Йулдашев Х. Т. Высокочувствительная полупроводниковая ионизационная фотографическая камера для инфракрасного диапазона // Прикладная физика. — 2017. — № 1. — С. 65–69.
2. Йулдашев Х. Т., Хайдаров З., Касымов Ш. С. Кинетика пробоя в системе «полупроводник — газоразрядный промежуток» // Вестник СПбГУ. — 2017. — Сер. 4. — Т. 4 (62), вып. 1.
3. Йулдашев Х. Т., Ш. Ахмедов С., Хайдаров З. Исследование инфракрасной фотографической системы на основе кремния, легированного платиной // Журнал физики и инженерии поверхности. — 2017. — Т. 2, № 1. — С. 12–19.
4. Лодыгин А. Н., Астров Ю. А., Порцель Л. М., Берегулин Е. В. Динамика таунсендовского разряда в аргоне // ЖТФ. — 2015. — Т. 85(5). — С. 27–31.
5. Астров Ю. А., Лодыгин А. Н., Порцель Л. М. Гексагональные структуры тока в системе «полупроводник — газоразрядный промежуток» // ЖТФ. — 2011. — Т. 81(2). — С. 42–47.
6. Лебедева Н. Н., Орбух В. И., Боброва Е. Ю. О формировании низкоомного состояния газа над поверхностью полупроводникового электрода в предпробойном режиме // Azərbaycan millî elmlər akademiyasının xəbərləri fizika riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və

- astronomiya. — 2005. — № 5. — С. 111–115.
7. Лодыгин А. Н., Порцель Л. М., Астров Ю. А. Газовый разряд в аргоне и азоте при криогенной температуре в тонких зазорах // Письма в ЖТФ. — 2008. — Т. 34(14). — С. 61–66.
8. Sadiq Y., Aktas K., Acar S., Salamov B. G. Influence of the microstructure on the charge transport in semiconductor gas discharge electronic devices // Superlattices and Microstructures. — 2010. — Vol. 47. — P. 648–660.

REFERENCES

1. Hajdarov Z., Hajdarova K. Z., Juldashv H. T. Vysokochuvstvitel'naya poluprovodnikovaya ionizacionnaya fotograficheskaya kamera dlya infrakrasnogo diapazona // Prikladnaya fizika. — 2017. — No. 1. — P. 65–69.
2. Juldashv H. T., Hajdarov Z., Kasymov Sh. S. Kinetika proboya v sisteme «poluprovodnik — gazorazryadnyj promezhutok» // Vestnik SPbGU. — 2017. — Ser. 4. — Vol. 4 (62), vyp. 1.
3. Juldashv H. T., Sh. Ahmedov S., Hajdarov Z. Issledovanie infrakrasnoj fotograficheskoy sistemy na osnove kremniya, legirovannogo platinoj // Zhurnal fiziki i inzhenerii poverhnosti. — 2017. — Vol. 2, No. 1. — P. 12–19.
4. Lodygin A. N., Astrov Yu. A., Porcel' L. M., Beregulin E. V. Dinamika taunsendovskogo razryada v argone // ZhTF. — 2015. — Vol. 85(5). — P. 27–31.
5. Astrov Yu. A., Lodygin A. N., Porcel' L. M. Geksagonal'nye struktury toka v sisteme «poluprovodnik — gazorazryadnyj promezhutok» // ZhTF. — 2011. — Vol. 81(2). — P. 42–47.
6. Lebedeva N. N., Orbuh V. I., Bobrova E. Yu. O formirovani nizzkoomnogo sostoyaniya gaza nad poverhnost'yu poluprovodnikovogo elektroda v predprobajnom rezhime // Azərbaycan millî elmlər akademiyasının xəbərləri fizika riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya. — 2005. — No. 5. — P. 111–115.
7. Lodygin A. N., Porcel' L. M., Astrov Yu. A. Gazovyy razryad v argone i azote pri kriogennoj temperature v tonkih zazorah // Pis'ma v ZhTF. — 2008. — Vol. 34(14). — P. 61–66.
8. Sadiq Y., Aktas K., Acar S., Salamov B. G. Influence of the microstructure on the charge transport in semiconductor gas discharge electronic devices // Superlattices and Microstructures. — 2010. — Vol. 47. — P. 648–660.

УДК: 537.226.8

АНТРАЦЕН МІЖ ШАРАМИ НЕОРГАНІЧНОГО НАПІВПРОВІДНИКА: ВІДГУК НА ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ І ОСВІТЛЕННЯ

І. І. Григорчак¹, Ф. О. Іващишин¹, Ю. О. Кулик², О. І. Григорчак²

¹Національний університет «Львівська політехніка»,
Львів, Україна,

²Львівський національний університет імені Івана Франка,
Львів, Україна,

Надійшла до редакції 30.05.2017

Представлені результати дослідження властивостей клатратів матриць GaSe та InSe з «гостьовим» антраценом (C₁₄H₁₀) та їх зміни у зовнішніх електричному та світловій хвилі полях. Встановлені закономірності трансформації спектру рентгенівської дифракції вихідних матриць при впровадженні антрацену. На основі частотних залежностей питомого комплексного імпедансу встановлені особливості струмопроходження перпендикулярно до нанопрошарків. Імпедансні дослідження відгуку сформованих клатратів на зовнішні електричне та світлової хвилі поля виявили від'ємний фотодіелектричний ефект і неординарну (осциляційну) поведінку реальної складової комплексного імпедансу, ініційовану постійним електричним полем. Вивчено відмінності властивостей наноструктур InSe<C₁₄H₁₀> при їх фотоелектретизаційному синтезі та синтезі за звичайних умов.

Ключові слова: клатрати, селенід галія, селенід індія, антрацен, наногібриди, інкапсуляція, імпедансна спектроскопія, фотодіелектричний ефект, фотоелектрети.

АНТРАЦЕН МЕЖДУ СЛОЯМИ НЕОРГАНИЧЕСКОГО ПОЛУПРОВОДНИКА: ОТКЛИК НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

И. И. Григорчак, Ф. О. Иващишин, Ю. О. Кулик, О. И. Григорчак

Представлены результаты исследований свойств клатратов матриц GaSe и InSe с «гостевым» антраценом (C₁₄H₁₀) и их изменения во внешних электрическом поле и поле световой волны. Установлены закономерности трансформации спектра рентгеновской дифракции исходных матриц при внедрении антрацена. На основе частотных зависимостей удельного комплексного импеданса установлены особенности прохождения тока перпендикулярно нанослоям. Импедансные исследования отклика сформированных клатратов на внешние электрическое поле и поле световой волны обнаружили отрицательный фотодиелектрический эффект и неординарное (осциляционное) поведение реальной составляющей комплексного импеданса, инициированное постоянным электрическим полем. Изучены различия свойств наноструктур InSe<C₁₄H₁₀> при их фотоелектретизационном синтезе и синтезе в обычных условиях.

Ключевые слова: клатраты, селенид галлия, селенид индия, антрацен, наногібриди, інкапсуляція, імпедансна спектроскопія, фотодіелектричний ефект, фотоелектрети.

ANTHRACENE BETWEEN LAYERS OF INORGANIC SEMICONDUCTOR: RESPONSE ON ELECTRIC FIELD AND ILLUMINATION

F. O. Ivashchyshyn, I. I. Grygorchak, Yu. O. Kulyk, O. I. Hryhorchak

Properties of Anthracene C₁₄H₁₀-guest clathrates with GaSe and InSe matrixes and their behavior at applied electric field and under illumination were investigated. The mechanism of X-ray diffraction spectra transformation for initial matrixes with Anthracene intercalation was determined. Features of current flow perpendicular to nanolayers were estimated with use of frequency dependent complex specific impedance technique. Impedance investigations of synthesized clathrate's response on external electric field and illumination showed negative photodielectric effect and unusual oscillation behavior of real component of complex impedance under electrostatic field. Differences of InSe<C₁₄H₁₀> nanostructure's properties at photoelectretisation synthesis and at normal conditions were investigated.

Keywords: clathrate, gallium selenide, indium selenide, anthracene, nanohybrid, intercalation, encapsulation, impedance spectroscopy, photodielectric effect, photoelectret.

ВСТУП

Антрацен ($C_{14}H_{10}$) є добре відомим фотоелектретом, властивості якого в макроструктурованому стані досить повно вивчені. Натомість, зміни механізмів фотоелектретної поляризації при переході до наноструктурованого стану, як і «гостьового» контенту в напівпровідникових клатратах, на сьогодні практично не вивчалися. На фоні отриманих знань в зазначеному контексті про сегнетоелектрики [1,2], надпровідники [3], суперіони [4], феромагнетики [5,6] та рідкокристалічні фази [7, 8] прогалина щодо електретної чи фотоелектретної поведінки в наностані з напівпровідниковою матричною ізоляцією стимулює до її заповнення. Останньому і присвячена дана робота.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В експериментах базовим об'єктом (матеріалом-«господарем») служили шаруваті напівпровідники селенід галія (GaSe) та селенід індія (InSe). Вирощені методом Бріджмена-Стокбаргера монокристали володіли яскраво вираженою шаруватою структурою і *p*- та *n*-типом провідності, відповідно. Ширина забороненої зони (за оптичними даними) складала 2,02 еВ для першого виду монокристалів та 1,22 еВ — для другого. Як добре відомо [9, 10], вони характеризуються наявністю так званих «гостьових» позицій — орієнтованих перпендикулярно до кристалографічної осі *C* областей дій слабких ван-дер-ваальсових сил.

Для формування клатратів була застосована тристадійна схема інтеркаляційного дизайну, описана нами в [11]. З метою реалізації фотоелектретного стану «гостьового» контенту синтез клатрату $InSe<C_{14}H_{10}>$ відбувався також і за наступними етапами:

- інкапсуляція антрацену в розширені ван-дер-ваальсові області селеніду індія;
- переведення міжшарового антрацену у розплавлений стан;
- охолодження його в електричному полі напруженістю 120 В/см з одночасним освітленням інтегральним світлом перпендикулярно до нанопрошарків.

Рентгенівські дифракційні спектри отримували на дифрактометрі в $CuK\alpha$

випромінюванні, монохроматизованому відбиванням від площин (200) монокристалу LiF, встановленому на первинному пучку, в симетричному варіанті $\theta-2\theta$ сканування.

Імпедансні виміри проводилися в напрямку кристалографічної осі *C* в діапазоні частот 10^{-3} – 10^6 Гц за допомогою вимірювального комплексу «AUTOLAB» фірми «ECO CHEMIE» (Голандія), укомплектованого комп'ютерними програмами FRA-2 та GPES. Видалення сумнівних точок проводилося фільтром Дирихле [12, 13]. Частотні залежності комплексного імпедансу *Z* аналізувалися графоаналітичним методом в середовищі програмного пакету ZView 2.3 (Scribner Associates). Похибки апроксимації не перевищували 4 %. Адекватність побудованих імпедансних моделей пакету експериментальних даних була підтверджена повністю випадковим характером частотних залежностей залишкових різниць першого порядку [12, 13]. Досліджувані зразки також освітлювалися видимим світлом за допомогою імітатора сонячного випромінювання потужністю 65 Вт, чи до них прикладалося постійне електричне поле перпендикулярно до нанопрошарків напруженістю 5–30 В/см.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Порівняльний аналіз рентгенодифрактограм вихідної матриці GaSe та клатрату на її основі $GaSe<C_{14}H_{10}>$ наведений на рис. 1. Видно, що інтеркаляція зразка антраценом призводить до формування складного профілю кривої дифракційного відбивання (004). Він задовільно описується суперпозицією п'ятьох

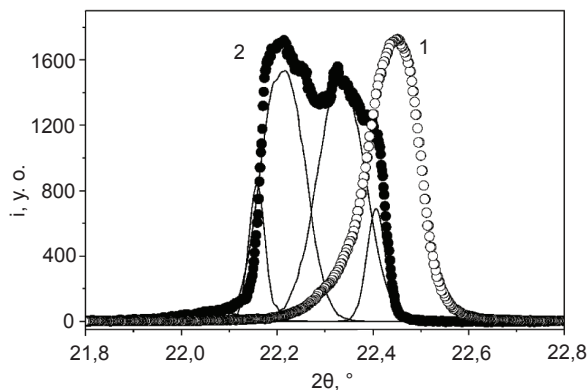


Рис. 1. Рентгенодифрактограми вихідної матриці GaSe (1), та клатрату $GaSe<C_{14}H_{10}>$ (2). Суцільні лінії — апроксимація рентгенодифрактограми клатрату $GaSe<C_{14}H_{10}>$

гаусових піків, що відповідають розсіянню рентгенівських променів від структурних ділянок з різними значеннями міжплощинних відстаней відбивання. Порівняння з кривою дифракційного відбивання вихідного зразка (крива 1) показує, що кутове положення 5-го максимуму ($2\theta \approx 22,40^\circ$) достатньо близьке до положення максимуму вихідного зразка ($2\theta \approx 22,44^\circ$). Це свідчить про те, що його поява зумовлена дифракцією променів від неінтеркальованих шарів селеніду галію. Іншими словами, ці результати підтверджують структурну організацію отримуваних клатратів у вигляді нерозширених пакетів вихідної матриці, що чергуються з розширеними областями ван-дер-ваальсових зв'язків з гостьовим контентом (описану нами в [14]) у відповідності до механізму стадійного упорядкування в таких матрицях [15].

Кристалічна матриця GaSe після трикратного розширення зберегла свою фоточутливість на рівні $\frac{\rho_{\text{осв.}}}{\rho_{\text{темп.}}} = 3 \cdot 10^{-2}$. Це цілком закономірний результат, адже розширення вихідної матриці можна трактувати як збільшення потенціального бар'єру між пакетами, який з однаковою ймовірністю долають електрони із зони провідності GaSe незалежно від того, чи вони з'явилися там завдяки фотостимуляції чи мали інше походження. Це, звичайно, справедливо за умови, що збільшення концентрації електронів у зоні провідності при освітленні не веде до помітної зміни характеру розподілу, що описує їхню поведінку. Після інкапсуляції антрацену (15 мас. %) фоточутливість зростає більш, як на порядок. Можна спробувати пов'язати таку поведінку з електронним спектром поглинання антрацену, який має піки при довжинах хвиль: 374,5 нм, 251,9 нм, 221,2 нм, 186,2 нм [16], однак інтегральне біле світло, яким освітлювався зразок, містить занадто малу частку світла з такими довжинами хвиль, щоб викликати суттєву зміну провідності. Тому згадане збільшення фоточутливості скоріш за все пов'язане із фотостимульованим тунелюванням із зони провідності GaSe через потенціальний бар'єр, утворений антраценом.

При вже згаданій інкапсуляції антрацену (15 мас. %) реальна складова питомого комплексного імпедансу ($\text{Re}Z$) зростає

в 3 рази у низькочастотній області (10^{-3} –1 Гц) і спадає у високочастотній (1 – 10^6 Гц), набуваючи яскраво вираженого осциляційного характеру в частотному інтервалі 1–100 Гц. Така деформація середньочастотної ділянки $\text{Re}Z(\omega)$ сигналізує про появу у сформованому клатраті індуктивного відгуку [17], пов'язаного, як правило, з захопленням і утримуванням носіїв струму на рівнях прилипання впродовж часу, співмірного з півперіодом вимірювального синусоїдального сигналу [18].

Це підтверджується трансформацією діаграми Найквіста, наведеної на рис. 2. Бачимо, що для розширеної матриці графік імпедансу має, загалом, дводуговий характер, що в свою чергу відображає енергетичні бар'єри для струмопроходження в нерозширених пакетах атомних площин Se-Ga-Ga-Se та міжпакетного перенесення заряду. Для GaSe< $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ > частотна дисперсія суттєво зростає: додається середньо частотна дуга у індуктивному квадранті комплексної площини, середньо частотна, але уже в I квадранті та ще одна дуга, низькочастотна, у IV — індуктивному квадранті. Третя з перелічених «додаткових» дуг відображає зазначений ефект «від'ємної ємності», віднесений до носіїв струму; цей ефект значною мірою може бути зумовлений виникненням квазі-двовимірних трикутних потенціальних ям на межах поділу напівпровідника і діелектрика [19] (у нашому випадку GaSe і антрацену), що у свою чергу спричиняє захоплення

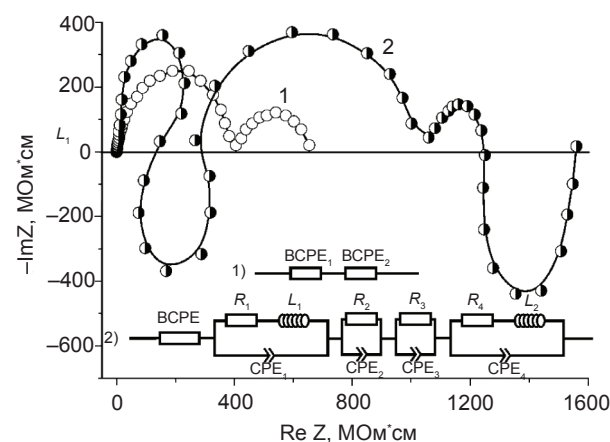


Рис. 2. Діаграми Найквіста, побудовані для напрямку, перпендикулярного до атомних площин розширеного GaSe до (1) і після впровадження антрацену (2), виміряні в темряві. На вставці відповідні еквівалентні електричні схеми

електронів на енергетичні рівні згаданих потенціальних ям з утворення зв'язаних станів і виникнення індуктивного відгуку, який ми пов'язуємо з «від'ємною ємністю». Друга дуга відображає струмопроходження через нанопрошарки антрацену. Перша, на відміну від третьої, зумовлена поляризаційними (можливо — електретними) ефектами. Певним підтвердженням сказаного можуть служити діаграми Найквіста, побудовані для випадку вимірювання при освітленні. Дійсно, середньочастотна дуга зникає (пасткові центри спустошені освітленням), а низько-частотна зберігається. Комп'ютерна параметрична ідентифікація відповідних заступних схем (вставки до рис. 2) дала змогу визначити значення індуктивностей: $L_1 = 7,6 \cdot 10^5$ Гн, $L_2 = 9,8 \cdot 10^8$ Гн, що майже на один та чотири порядки, відповідно, вищі від аналогічного параметру для сонячних елементів [18].

Слід зауважити, що при побудові імпедансних моделей був використаний елемент сталої фази СРЕ ємнісного типу [12] з огляду на те, що центри середньочастотних релаксаційних дуг лежать нижче осі реальної складової комплексного імпедансу, відображаючи тим самим, частотну розподіленість часів релаксації. Її природа для нерозширеної матриці може бути пов'язана з певною неоднорідністю акцепторних домішок уздовж кристалографічної осі C і/чи деякою нееквідистантністю розширених вандер-ваальсових областей, а для клатрату ще і з можливим випадковим характером розташування гостьового антрацену, що узгоджується з рентгенівськими даними на рис. 1. Водночас, з огляду на нанообмеженість геометрії нерозширених пакетів вихідної матриці з пастковими центрами в околі рівня Фермі для моделювання струмопроходження у них застосований елемент ВСРЕ [13], з показником фазового відхилення $n \sim 0,75$. Значення останнього вказує на суттєву локалізацію носіїв струму, спричинену гостьовим контентом.

Поляризаційні властивості синтезованих клатратів аналізувалися в частотному інтервалі, в якому тангенс кута електричних втрат мав значення менші від одиниці. Це діапазон 10^2 – 10^6 Гц. Для цього частотного інтервалу діелектрична проникність

розширеного селеніду галію суттєво зростає (рис. 3) після впровадження антрацену, демонструючи немонотонний аномальний (зростаючий зі збільшенням частоти) характер частотної дисперсії. Останній, як відомо [20], пов'язаний з вкладом у поляризацію дипольних моментів, що виникають при перескоковому перенесенні заряду за участю локалізованих станів поблизу рівня Фермі. Водночас, варто зазначити неспівпадіння частотних положень максимумів діелектричної проникності $\text{GaSe} < \text{C}_{14}\text{H}_{10} >$ ($4 \cdot 10^5$ Гц) і тангенса кута електричних втрат ($8 \cdot 10^4$ Гц). Більше того, для зазначених частот ϵ і $\text{tg}\delta$ демонструють обернену тенденцію змін. Неординарним також є факт від'ємного фотодіелектричного ефекту — зменшення ϵ $\text{GaSe} < \text{C}_{14}\text{H}_{10} >$ при освітленні (вставка до рис. 3).

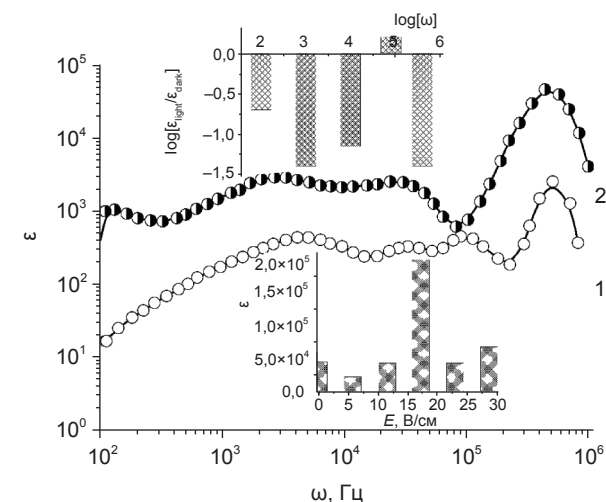


Рис. 3. Частотні залежності діелектричної проникності розширеного GaSe до (1) і після впровадження антрацену (2), виміряні в темряві. На вставках: зміна діелектричної проникності для різних частот при освітленні (зверху) та на частоті $2,3 \cdot 10^5$ Гц для різних значень прикладеної напруги (внизу)

Накладання при вимірюванні електричного поля зміщення напруженістю 5,7; 11,5; 17,1; 22,9; 28,6 В/см, загалом, зменшує $\text{Re}Z$, викликаючи одночасно її немонотонну частотну поведінку (рис. 4). Перший із зазначених ефектів логічно пов'язати із захопленням в електричному полі рівня Фермі валентною зоною, що веде до росту концентрації носіїв струму. Внесок від росту рухливості можна було б пояснити збільшенням ролі резонансного тунелювання; крім того, цей механізм передбачає можливість існування осциляцій

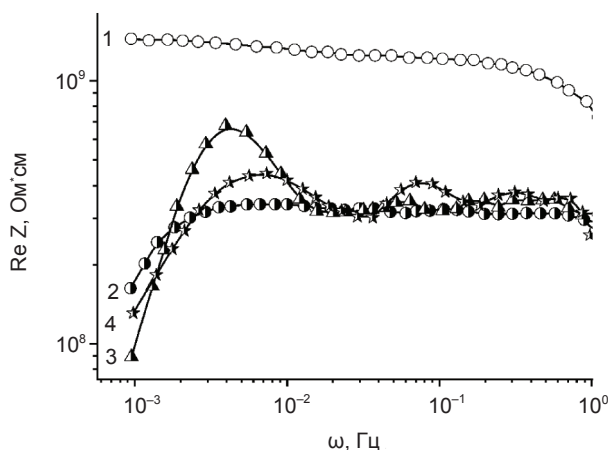


Рис. 4. Частотні залежності дійсної складової питомого комплексного імпедансу $\text{GaSe}\langle\text{C}_{14}\text{H}_{10}\rangle$ при напружено-стях електричного поля зміщення 0 (1); 5,7 В/см (2); 17,1 В/см (3); 28,6 В/см (4)

дійсної складової питомого комплексного імпедансу, як це було показано у низці теоретичних досліджень струмопроходження через нестаціонарний тунельний перехід у зовнішніх фізичних полях [21, 22]. Однак теоретичні висновки, зроблені у цих роботах, є застосовними лише при частотах, що суттєво перевищують область, яку ми розглядаємо. Тому для пояснення осциляцій дійсної частини імпедансу в низькочастотній області потрібно шукати іншу фізичну причину, зокрема слід більш детально розглянути вплив на зонну структуру досліджуваної системи впровадження «гостьового» антрацену. У роботі [23] було проведено теоретичне дослідження спектру інтеркальованих пакетно-впорядкованих шаруватих структур за допомогою моделі типу періодичної моделі Андерсона. В результаті було показано, що впровадження інтекаланта з одним електронним рівнем приводить до псевдощілини у спектрі і збільшення пов'язаного з нею локального мінімуму густини станів. Ширина псевдощілини і значення локального мінімуму залежать від концентрації впровадженого інтеркаланта і значення енергії домішкового рівня. Продовживши наші міркування на випадок інтеркаланта з декількома електронними рівнями, можемо прийти до висновку, що таких щілин може виникнути декілька, причому різної ширини. Тому цілком природньо припустити, що мінімуми реальної складової імпедансу в низькочастотній області пов'язані з частото-стимульованими переходами між домішковими підзонами

і основною зоною. А оскільки щілини є енергетично вузькими, то і частоти цих переходів є малими.

За цих умов зменшується і діелектрична проникність в частотному інтервалі 10^2 – 10^6 Гц. Як видно із вставки до рис. 5, залежність діелектричної проникності від напруги зміщення є немонотонною функцією, підтверджуючи, тим самим, суттєвий вклад електронної підсистеми у поляризаційні процеси. Однак видається, що найбільш неординарним виявленим ефектом є поєднання колосального значення діелектричної проникності і низького значення (<1) тангенса кута електричних втрат (рис. 5) у інфранизькочастотному діапазоні 10^{-3} – $4,5 \cdot 10^{-3}$ Гц при напруженості електричного поля зміщення 11,5 В/см, що є перспективним для створення квантових акумуляторів.

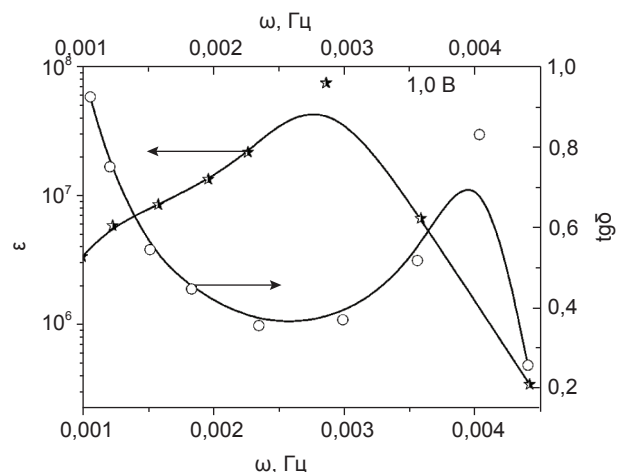


Рис. 5. Інфранизькочастотні залежності діелектричної проникності і тангенса кута електричних втрат $\text{GaSe}\langle\text{C}_{14}\text{H}_{10}\rangle$ при напруженості електричного поля зміщення 11,5 В/см

Внаслідок інкапсуляції антрацену в розширену матрицю n -типу провідності InSe ReZ зростає майже аналогічно до GaSe . Це означає, що гостьовий антрацен зумовлює падіння рухливості поперек нанопрошарків, яке превалює над зміною концентрації вільних носіїв. Індуктивний відгук, який проявляється при освітленні, засвідчує ефект від'ємної фотоємності, який слід зв'язати з захопленням і утримуванням інжектованих носіїв у фотоіндукованих центрах прилипання.

Накладання електричного поля зміщення перпендикулярно до нанопрошарків $\text{InSe}\langle\text{C}_{14}\text{H}_{10}\rangle$, як і для попередньої структури,

викликає зменшення ReZ і ImZ та їх сильні осциляції у низькочастотному діапазоні (рис. 6). Цікаво, що зазначені осциляції зникають при високих частотах, а їхня амплітуда зростає з підвищенням напруги зміщення. Водночас, останнє призводить до зсуву у високочастотну область максимуму залежності $ImZ(\omega)$, що відповідає зміщення в дану область ділянок дисперсійного спаду $ReZ(\omega)$. Це означає що прикладена напруга зміщення зменшує ефективний час релаксації, який характеризує максимум в розподілі τ .

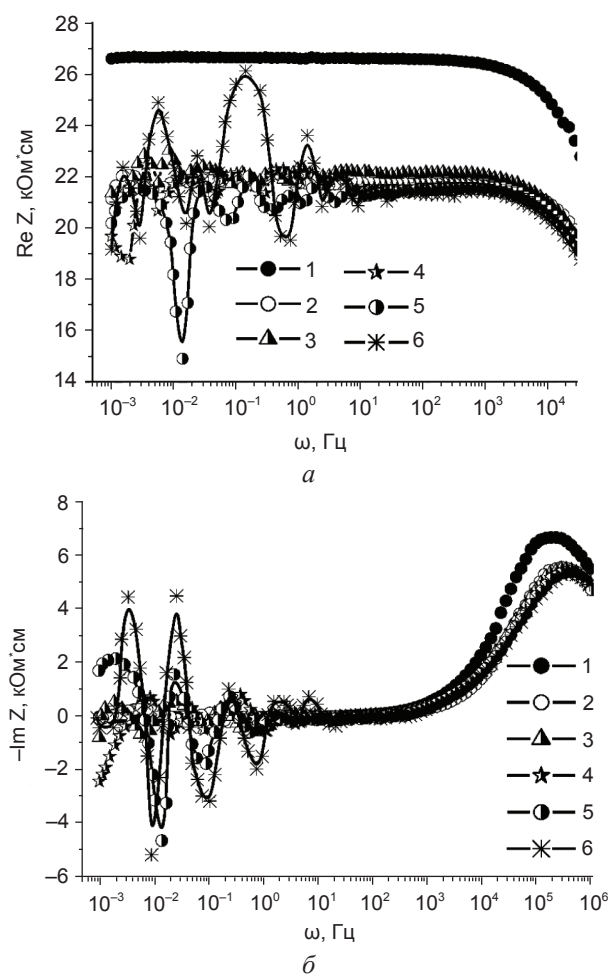


Рис. 6. Частотні залежності дійсної (а) та уявної (б) складових питомого комплексного імпедансу $InSe<C_{14}H_{10}>$ при напруженостях електричного поля зміщення 0(1); 5,7 В/см (2); 11,5 В/см (3); 17,1 В/см (4); 22,9 В/см (5) та 28,6 В/см (6)

В результаті застосування фотоелектретизаційної методики синтезу наноструктур $InSe<C_{14}H_{10}>$ ріст ReZ і ImZ сягає десятикратного значення, що в 2,5 рази є вищим, ніж при синтезі за нормальних умов, а fotocутливість $\left(\frac{\rho_{осв.}}{\rho_{темп.}}\right)$ спадає (порівняно з вихід-

ною розширеною матрицею) від 0,58 до 0,7 з одночасним сильним зростанням низькочастотних осциляцій (рис. 7). Ці осциляції добре відображаються на діаграмах Найквіста у вигляді переходу низькочастотної вітки у IV-індуктивний квадрант. Цікаво, зауважити, що «коливання» ReZ і ImZ відбуваються у протифазі, і які виникають у фотоелектретизованих клатратах перпендикулярно до нанопрошарків при освітленні. Механізм виникнення зазначених «коливань» в цьому разі напевне пов'язаний з особливостями зміннострумового проходження бар'єрних областей просторового заряду, що екранує електретну поляризацію, під час якого освітлення спричиняє фотоіндуковану перезарядку яка і забезпечує умови осциляцій $ReZ(\omega)$ і $ImZ(\omega)$.

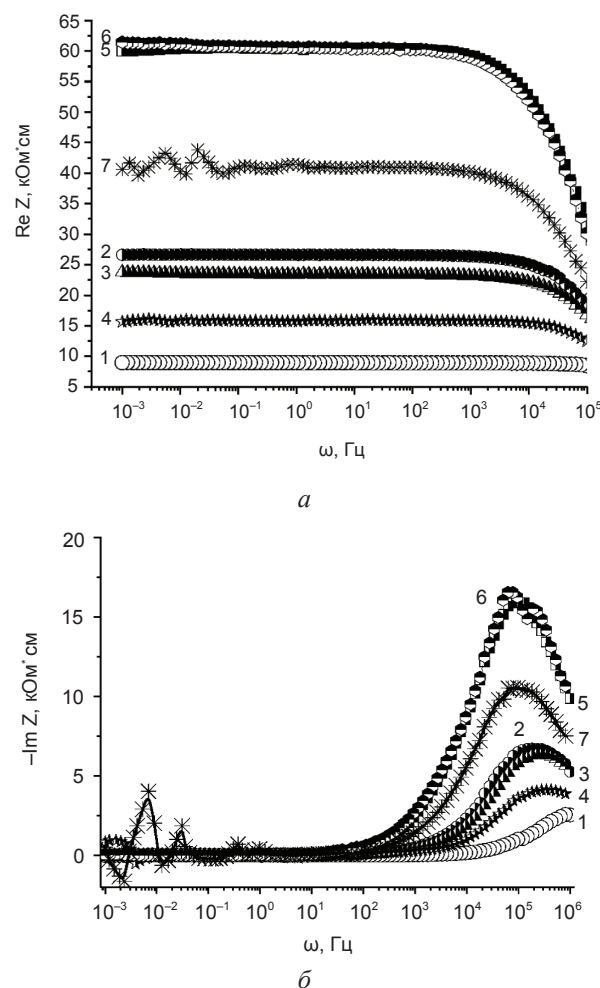


Рис. 7. Частотні залежності дійсної (а) та уявної (б) складових питомого комплексного імпедансу розширеного $InSe$ до (1) і після впровадження антрацену за нормальних умов (2-4) та після фотоелектретизації «in-situ» (5-7), виміряні в темряві (2,5), в магнітному полі (3, 6) та при освітленні (4, 7)

Аналіз частотних залежностей ReZ для вихідної розширеної матриці InSe і її антраценових клатратів, синтезованих за різних умов, на основі теорії Аустіна-Мотта [24] дав змогу визначити параметри домішкового спектру, які зведені в табл. 1.

Їх порівняння, насамперед, підтверджує те, що превалюючим вкладом в ріст дійсної складової питомого комплексного імпедансу є падіння рухливості, оскільки зменшення концентрації делокалізованих носіїв не є адекватним величині зменшення провідності. По-друге, видно, що фотоелектретизація суттєвим чином міняє розкид пасткових центрів, спричиняючи, таким чином, більш проблематичним виконання умов резонансного тунелювання за кімнатних температур.

набуваючи яскраво вираженого осциляційного характеру, демонструючи появу індуктивного відгуку.

3. Для цього частотного інтервалу $10^2 - 10^6$ Гц (в якому тангенс кута електричних втрат є меншим від 1) діелектрична проникність розширеного селеніду галію суттєво зростає після впровадження антрацену, демонструючи немонотонний аномальний (зростаючий зі збільшенням частоти) характер частотної дисперсії та від'ємний фотодіелектричний ефект.

4. Накладання при вимірюванні електричного поля зміщення напруженістю 5,7; 11,5; 17,1; 22,9; 28,6 В/см перпендикулярно до нанопрошарків GaSe<C₁₄H₁₀>, загалом, зменшує ReZ, викликаючи одночасно її немонотонну частотну поведінку. За цих умов

Таблиця 1

Параметри домішкового енергетичного спектру

Структура	Густина станів на рівні Фермі, 10^{44} Дж ⁻¹ м ⁻³	Віддаль стрибка, нм	Розкид пасткових центрів в околі рівня Фермі, 10^{-23} Дж	Реальна концентрація пасткових центрів, 10^{22} м ⁻³
Розширена матриця GaSe	3,8	23,3	9,8	3,8
InSe<C ₁₄ H ₁₀ >, синтезований за нормальних умов	2,5	22,4	17,3	4,3
InSe<C ₁₄ H ₁₀ >, синтезований в умовах фото-електретизації	1,9	21,7	24,0	4,7

ВИСНОВКИ

1. Інтеркаляція GaSe антраценом призводить до формування складного профілю кривої дифракційного відбивання (004), який задовільно описується суперпозицією п'ятиох гаусових піків, що відповідають розсіянню рентгенівських променів від структурних ділянок з різними значеннями міжплощинних відстаней відбивання.

2. Після інкапсуляції антрацену (15 мас. %) у трикратно розширений *p*-GaSe фоточутливість його зростає більш, як на порядок, а реальна складова питомого комплексного імпедансу (ReZ) зростає в 3 рази у низькочастотній області ($10^{-3} - 1$ Гц),

зменшується і діелектрична проникність. При цьому, виявлений ефект поєднання колосального значення діелектричної проникності ($10^6 - 10^8$) і низького значення (<1) тангенса кута електричних втрат у інфранизькочастотному діапазоні $10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-3}$ Гц при напруженості електричного поля зміщення 11,5 В/см є перспективним для створення квантових акумуляторів.

5. Внаслідок інкапсуляції антрацену в розширену матрицю *n*-типу провідності InSe ReZ зростає майже аналогічно до GaSe, що означає превалювання падіння рухливості поперек нанопрошарків над зміною концентрації вільних носіїв. Накладання

електричного поля зміщення перпендикулярно до нанопрошарків $\text{InSe}\langle\text{C}_{14}\text{H}_{10}\rangle$, як і для попередньої структури, викликає зменшення $\text{Re}Z$ і $\text{Im}Z$ та їх сильні осциляції у низькочастотному діапазоні, амплітуда яких зростає з підвищенням напруги зміщення. Водночас, останнє призводить до зсуву у високочастотну область максимуму залежності $\text{Im}Z(\omega)$, тобто до зменшення ефективного часу релаксації.

6. В результаті застосування фотоелектретизаційної методики синтезу наноструктур $\text{InSe}\langle\text{C}_{14}\text{H}_{10}\rangle$ ріст $\text{Re}Z$ і $\text{Im}Z$ сягає десятикратного значення, що в 2,5 рази є вищим, ніж при синтезі за нормальних умов, а фоточутливість $\left(\frac{\rho_{\text{осв.}}}{\rho_{\text{темп.}}}\right)$ спадає від 0,58 до 0,7

з одночасним сильним зростанням низькочастотних осциляцій. При цьому «коливання» $\text{Re}Z$ і $\text{Im}Z$ відбуваються у протифазі, і які виникають у фотоелектретизованих клатратах перпендикулярно до нанопрошарків при освітленні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Барышников С. В. Диэлектрические исследования нанопористых пленок оксида алюминия, заполненных сегнетовой солью / С. В. Барышников, Е. В. Чарная, Е. В. Стукова, А. Ю. Милинский, Cheng Tien // Физика твердого тела. — 2010. — Т. 52. — Вып. 7. — С. 1347–1350.
2. Бищанюк Т. Н. Полупроводниковые клатраты с периодически модулированной топологией гостевого сегнетоэлектрического жидкого кристалла в термическом, магнитном и световой волны полях / Т. Н. Бищанюк, И. И. Григорчак, А. В. Фечан, Ф. О. Иващишин // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84. — Вып. 7. — С. 139–142.
3. Панова Г. Х. Сопротивление и магнитная восприимчивость сверхпроводящего свинца, внедренного в нанометровые поры стекла / Г. Х. Панова, А. А. Никонов, А. А. Набережнов, А. В. Фокин // Физика твердого тела. — 2009. — Т. 51. — Вып. 51. — С. 2098–2101.
4. Барышников С. В. Диэлектрические и ЯМР-исследования суперионного проводника AgI внедренного в мезопористые силикатные матрицы / С. В. Барышников, Cheng Tien, Е. В. Чарная, М. К. Lee, D. Michel, W. Bohlmann, Н. П. Андриянова // Физика твердого тела. — 2008. — Т. 50. — Вып. 7. — С. 1290–1294.
5. Данишевский А. М. Характеристики магнетизма в нанопористом углероде с кластерами палладия / А. М. Данишевский, Т. Л. Макарова, А. А. Ситникова, Б. Д. Шанина // Физика твердого тела. — 2011. — Т. 53. — Вып. 5. — С. 956–963.
6. Ивичева С. Н. Свойства 3D-композитов на основе опаловых матриц и магнитных наночастиц / С. Н. Ивичева, Ю. Ф. Каргин, Е. А. Овченков, Ю. А. Кокшаров, Г. Ю. Юрков // Физика твердого тела. — 2011. — Т. 53. — Вып. 6. — С. 1053–1058.
7. Иващишин Ф. О. Интеркалатные гетероструктурированные наногибриды конфигурации полупроводник-нематик: формирование, свойства, применение / Ф. О. Иващишин, И. И. Григорчак // Физика твердого тела. — 2010. — Т. 52. — Вып. 10. — С. 1891–1896.
8. Ivashchyshyn Fedir Influence of Magnetic Field and Lighting during the Creation Process of Nanohybrid Semiconductor-Nematic Structures on Their Impedance and Photo Response / Fedir Ivashchyshyn, Ivan Grygorchak, Olena Sudakova, Igor Bordun and Miroslav Micov // J. Mater. Sci. Technol. — 2011. — Vol. 27(11). — P. 973–978.
9. Chevy A. Large InSe monocrystals grown a non-stoichiometric melt / A. Chevy, A. Kuhn, M. S. Martin // J. Cryst. Growth. — 1977. — Vol. 38, No. 1. — P. 118–122.
10. Silbernagel B. G. Preparation and crystal growth of materials with layered structures. Physic and chemistry of materials with layered structure / Silbernagel B. G. (ed. by R. M. A. Lieth. Dordrech, Boston: Reidel) // Acta Crystallographica, Section B. — 1978. — Vol. 34, No. 11. — P. 3498.
11. Bishchaniuk T. M. Electronic Processes and Energy Storage in Inorganic/Organic Nanohybrids / T. M. Bishchaniuk, O. V. Balaban, R. Ya. Shvets, I. I. Grygorchak, A. V. Fechan, B. A. Lukyanets, F. O. Ivashchyshyn // Mol. Cryst. Liq. Cryst. — 2014. — Vol. 589(1). — P. 132–140.
12. Стойнов З. Б. Электрохимический импеданс / З. Б. Стойнов, Б. М. Графов, Б. Савова-Стойнова, В. В. Елкин. — М.: Наука,

1991. — 336 с.
13. Impedance spectroscopy. Theory, experiment and application / Ed. Barsoukov E. and Macdonald J. R. // Wiley interscience (Canada), 2005. — 585 p.
 14. Grygorchak Ivan. Intercalated Nanostructure Consisting of Inorganic Receptor and Organic Ambipolar Semiconductor / Ivan Grygorchak, Fedir Ivashchysyn, Pavlo Stakhira, Renji R. Reghu, Vladyslav Cherpak, and Juozas Vidas Grazulevicius // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. — 2013. — Vol. 8. — P. 1–5.
 15. Grigorchak I. I. On some physical properties of InSe and GaSe semiconducting crystals intercalated by ferroelectrics / I. I. Grigorchak, V. V. Netyaga, Z. D. Kovalyuk // J. Phys.: Condens. Mater. — 1997. — Vol. 9. — P. L191–L195.
 16. Birks J. B. Photophysics of aromatic molecules / Birks J. B. // Wiley-Interscience (London), 1970. — 704 p.
 17. Pokladok N. T. GaSe<FeCl₃> nanostructures with magnetoordered gest arrangement in temperature and electromagnetic field / N. T. Pokladok, I. I. Grygorchak, O. I. Grygorchak, F. O. Ivashchysyn, P. Yo. Stachira // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. — 2010. — Vol. 1(7), No. 4. — P. 69–78.
 18. Mora-Sero I. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forwards Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells / I. Mora-Sero, J. Bisquert // Nano Letters. — 2006. — Vol. 6, No. 4. — P. 640–650.
 19. Долгополов В. Т. Целочисленный квантовый эффект Холла и сопряженные с ним явления / В. Т. Долгополов // УФН. — 2014. — Т. 184, № 2. — С. 113–136.
 20. Жуковский П. В. Диэлектрические свойства соединений Cd_{1-x}Fe_xSe / П. В. Жуковский, Я. Партыка, П. Венгерэк, Ю. Шостак, Ю. Сидоренко, А. Родзик // Физ. и техн. полупроводн. — 2000. — Т. 34, № 10. — С. 1174–1177.
 21. Абдулкадыров Д. В. Туннелирование электронов через нестационарный потенциальный барьер / Д. В. Абдулкадыров, Н. Н. Белецкий // Радиофизика и электроника. — 2008. — Т. 13, № 2. — С. 218–226.
 22. Абдулкадыров Д. В. Гигантское изменение магнитоимпеданса магнитного туннельного перехода переменным напряжением смещения / Д. В. Абдулкадыров, Н. Н. Белецкий // Физика твердого тела. — 2011. — Т. 53. — Вып. 5. — С. 936–943.
 23. Стасюк І. В. Опис інтеркальованих шаруватих структур в підході періодичної моделі Андерсона / І. В. Стасюк, О. В. Величко // Львів (Препр. / НАН України. Інститут фізики конденсованих систем; ICMP-14-07U). — 2014. — 11 с.
 24. Austin I. G. Polarons in crystalline and non-crystalline materials / I. G. Austin, N. F. Mott // Advances in Physics. — 1969. — Vol. 18(71). — P. 41–102.

REFERENCES

1. Baryshnikov S. V. Dielectric studies of nanoporous alumina films filled with the Rochelle salt / S. V. Baryshnikov, E. V. Charnaya, E. V. Stukova, A. Yu. Milinskiy, Cheng Tien // Physics of the Solid State. — 2010. — Vol. 52(7). — P. 1444–1447.
2. Bishchaniuk T. M. Semiconductor clathrates with a periodically modulated topology of a host ferroelectric liquid crystal in thermal, magnetic, and light-wave fields / T. M. Bishchaniuk, I. I. Grygorchak, A. V. Fechan, F. O. Ivashchysyn // Technical Physics. — 2014. — Vol. 59(7). — P. 1085–1087.
3. Panova G. Kh. Resistance and magnetic susceptibility of superconducting lead embedded in nanopores of glass / G. Kh. Panova, A. A. Nikonov, A. A. Naberezhnov, A. V. Fokin // Physics of the Solid State. — 2009. — Vol. 51, No. 11. — P. 2225–2228.
4. Baryshnikov S. V. Dielectric and NMR Studies of the superionic conductor AgI embedded in mesoporous silicate matrices / S. V. Baryshnikov, Cheng Tien, E. V. Charnaya, M. K. Lee, D. Michel, W. Böhlmann, N. P. Andriyanova // Physics of the Solid State. — 2008. — Vol. 50(7). — P. 1342–1346.
5. Danishevskii A. M. Characteristics of magnetism in nanoporous carbon with palladium clusters / A. M. Danishevskii, T. L. Makarova, A. A. Sitnikova, B. D. Shanina // Physics of the Solid State. — 2011. — Vol. 53(5). — P. 1017–1024.
6. Ivicheva S. N. Properties of three-dimensional composites based on opal matrices and magnetic nanoparticles / S. N. Ivicheva, Yu. F. Kargin, E. A. Ovchenkov, Yu. A. Koksharov,

- G. Yu. Yurkov // *Physics of the Solid State*. — 2011. — Vol. 53, No. 6. — P. 1114–1120.
7. Ivashchishin F. O. Intercalated heterostructured nano-hybrids of the semiconductor-nematic configuration: Preparation, properties, and applications / F. O. Ivashchishin, I. I. Grygorchak // *Physics of the Solid State* — 2010. — Vol. 52(10). — P. 2026–2030.
 8. Ivashchyshyn Fedir Influence of Magnetic Field and Lighting during the Creation Process of Nano-hybrid Semiconductor-Nematic Structures on Their Impedance and Photo Response / Fedir Ivashchyshyn, Ivan Grygorchak, Olena Sudakova, Igor Bordun and Miroslav Micov // *J. Mater. Sci. Technol.* — 2011. — Vol. 27(11). — P. 973–978.
 9. Chevy A. Large InSe monocrystals grown a non-stoichiometric melt / A. Chevy, A. Kuhn, M. S. Martin // *J. Cryst. Growth*. — 1977. — Vol. 38, No. 1. — P. 118–122.
 10. Silbernagel B. G. Preparation and crystal growth of materials with layered structures. Physic and chemistry of materials with layered structure / Silbernagel B. G. (ed. by R. M. A. Lieth. Dordrech, Boston: Reidel) // *Acta Crystallographica, Section B*. — 1978. — Vol. 34, No. 11. — 3498 p.
 11. Bishchaniuk T. M. Electronic Processes and Energy Storage in Inorganic / Organic Nano-hybrids / T. M. Bishchaniuk, O. V. Balaban, R. Ya. Shvets, I. I. Grygorchak, A. V. Fechan, B. A. Lukyanets, F. O. Ivashchyshyn // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* — 2014. — Vol. 589(1). — P. 132–140.
 12. Stojnov Z. B. Elektrohimičeskij impedans / Z. B. Stojnov, B. M. Grafov, B. Savova-Stojnova, V. V. Elkin // *M.: Nauka*. — 1991. — 336 p.
 13. Impedance spectroscopy. Theory, experiment and application / Ed. E. Barsoukov and J. R. Macdonald // *Wiley interscience (Canada)*. — 2005. — 585 p.
 14. Grygorchak Ivan. Intercalated Nanostructure Consisting of Inorganic Receptor and Organic Ambipolar Semiconductor / Ivan Grygorchak, Fedir Ivashchyshyn, Pavlo Stakhira, Renji R. Reghu, Vladyslav Cherpak, and Juozas Vidas Grazulevicius // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. — 2013. — Vol. 8. — P. 1–5.
 15. Grigorčak I. I. On some physical properties of InSe and GaSe semiconducting crystals intercalated by ferroelectrics / I. I. Grigorčak, V. V. Netyaga, Z. D. Kovalyuk // *J. Phys.: Condens. Mater.* — 1997. — Vol. 9. — P. L191–L195.
 16. Birks J. B. Photophysics of aromatic molecules / J. B. Birks // *Wiley-Interscience (London)*. — 1970. — 704 p.
 17. Pokladok N. T. GaSe<FeCl₃> nanostructures with magnetoordered gest arrangement in temperature and electromagnetic field / N. T. Pokladok, I. I. Grygorchak, O. I. Grygorchak, F. O. Ivashchyshyn, P. Yo. Stachira // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. — 2010. — Vol. 1(7), No. 4. — P. 69–78.
 18. Mora-Sero I. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forwards Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells / I. Mora-Sero, J. Bisquert // *Nano Letters*. — 2006. — Vol. 6, No. 4. — P. 640–650.
 19. Dolgopopolov V. T. Integer quantum Hall effect and related phenomena / V. T. Dolgopopolov // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. — 2014. — Vol. 184(2). — P. 113–136.
 20. Zukowski P. V. Dielectric Properties of Cd_{1-x}F_{ex}Se Compounds / P. V. Zukowski, J. Partyka, P. Wagierek, Yu. Shostak, Yu. Sidorenko, A. Rodzik // *Semiconductors*. — 2000. — Vol. 34. — P. 1124–1127.
 21. Abdulkadyrov D. V. Electron Tunneling Through a Non-Stationary Potential Barrier / D. V. Abdulkadyrov, N. N. Beletskii // *Telecommunications and Radio Engineering*. — 2009. — Vol. 68(11). — P. 983–998.
 22. Abdulkadyrov D. V. Giant change in the magnetoimpedance of the magnetic tunnel junction by an AC bias voltage / D. V. Abdulkadyrov, N. N. Beletskii // *Physics of the Solid State*. — 2011. — Vol. 53(5). — P. 997–1004.
 23. Stasyuk I. V. Description of intercalated layered structures in the approach of the periodic Anderson model / I. V. Stasyuk, O. V. Velychko // *Lviv (Preprint / Institute for Condensed Matter Physics of Nat. Acad. of Sci. of Ukraine; ICMP-14-07U)*. — 2014. — 11 p.
 24. Austin I. G. Polarons in crystalline and non-crystalline materials / I. G. Austin, N. F. Mott // *Advances in Physics*. — 1969. — Vol. 18(71). — P. 41–102.

УДК: 621.311.171

ДИЕЛЕКТРИЧНИЙ ТЕПЛОПРОВІДНИЙ КОНТАКТ ДЛЯ ТЕПЛООБМІННИКА ФОТОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Р. В. Зайцев

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Надійшла до редакції 07.06.2017

У роботі запропоновано теплопровідний діелектричний контакт для сонячних елементів фотоенергетичної установки на основі плівкової структури $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Cr}/\text{Cu}$. Визначено оптимальні режими отримання зазначених шарів, ключовим з яких є отримання бар'єрного бездефектного шару оксиду алюмінію. Проведено експериментальну апробацію зазначеної структури, котра підтвердила можливість використання таких шарів для створення сонячної батареї на основі елементів із структурою $\text{InGaP}/\text{InGaAs}/\text{Ge}$ для гібридної фотоенергетичної установки з охолодженням.

Ключові слова: теплопровідний діелектричний контакт, сонячний елемент, фотоенергетична установка.

ДИЕЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЙ КОНТАКТ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКА ФОТОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Р. В. Зайцев

В работе предложен теплопроводящий диэлектрический контакт для солнечных элементов фотоэнергетических установок на основе пленочной структуры $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Cr}/\text{Cu}$. Определены оптимальные режимы получения указанных слоев, ключевым из которых является получение барьерного бездефектного слоя оксида алюминия. Проведена экспериментальная апробация указанной структуры, которая подтвердила возможность использования таких слоев для создания солнечной батареи на основе элементов со структурой $\text{InGaP}/\text{InGaAs}/\text{Ge}$ для гибридной фотоэнергетической установки с охлаждением.

Ключевые слова: теплопроводящий диэлектрический контакт, солнечный элемент, фотоэнергетическая установка.

DIELECTRIC THERMAL CONDUCTING CONTACT FOR HEAT EXCHANGER OF PHOTOENERGY SYSTEM

R. V. Zaitsev

The paper suggests conductive dielectric contact for photoenergy system solar cells based on $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Cr}/\text{Cu}$ film structures. The optimum mode of receive these layers, the key of which is to obtain defect-free aluminum oxide barrier layer, has been obtain. An experimental testing of these structures confirmed the possibility of such layers to create a solar cell based on the elements of the $\text{InGaP}/\text{InGaAs}/\text{Ge}$ structure for hybrid photoenergy system with cooling.

Keywords: conductive dielectric contact, solar cell, photoenergy system.

ВСТУП

Світові тенденції розвитку енергетичного ринку та пов'язаного з цим зростання споживання природних енергетичних ресурсів переконливо показують необхідність пошуку додаткових джерел енергії, які змогли б компенсувати нестачу наявних ресурсів, а в ідеалі – повністю замінити їх. Як свідчить практичний досвід США, Японії, Німеччини, один із шляхів розв'язання цієї задачі пов'язаний з перетворенням сонячної енергії в електричну енергію за допомогою напівпровідникових сонячних елементів (СЕ).

Найбільш розповсюдженим типом СЕ є приладові структури на основі моно- та полікристалічного кремнію товщиною до 200 мкм. Основною проблемою їх широкомасштабного використання є висока ціна електричної енергії, яку вони виробляють, що обумовлено високою матеріало- та енергоємністю технологічного процесу виготовлення. Для зниження ціни СЕ перспективним є використання систем, які працюють в умовах концентрованого сонячного випромінювання. Використання дзеркал дозволяє в сотні разів знизити витрати на СЕ. Проте застосування

ФЕП на основі кремнію традиційної конструкції при концентрованому сонячному випромінненні призводить до зниження ККД на порядок [1, 2]. В той же час використання багатоперехідних кремнієвих СЕ з вертикальними діодними комірками з підвищенням інтенсивності сонячного опромінення демонструє підвищення ККД [3, 4].

Розроблена раніше [5] фотоенергетична установка на основі багатоперехідних кремнієвих СЕ з вертикальними діодними комірками, яка має систему позиціонування та управління, що дозволяє збільшити кількість світлової енергії, що надходить на поверхню енергетичної установки, має багато переваг. Така фотоенергетична установка буде виробляти не тільки електричну енергію, а й теплу воду. Але поряд із цим на етапі впровадження виявилися суттєві недоліки щодо промислового виробництва таких установок, пов'язані з обмеженими обсягами виробництва багатоперехідних кремнієвих СЕ.

Разом з тим в даний час відбулося різке зростання обсягів виробництва і, як наслідок, істотне зниження вартості багатоперехідних СЕ на основі структури InGaP/InGaAs/Ge, обумовлене включенням в виробничий цикл численних підприємств КНР. Вони відрізняються стабільною роботою в умовах концентрованого випромінювання і, головне, мають робочу температуру, що досягає 70 градусів. Останнє істотно знижує вимоги до системи охолодження, дозволяючи спростити і здешевити її конструкцію. Важливою особливістю конструкції подібних СЕ є виконання металізації тильного і фронтального струмозмінювальних електродів з срібла, що дозволяє легко здійснювати комутацію СЕ, а також їх фіксацію на радіаторній пластині фотоенергетичного модуля методом пайки низькотемпературним припоєм.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У зв'язку з вищевикладеним, перспективним видається заміна в конструкції фотоенергетичного модуля сонячної батареї на основі кремнієвих СЕ батареєю з відповідним чином скомутованими СЕ на основі структури InGaP/InGaAs/Ge. Проведені роботи спрямовані на одночасну реалізацію в рамках запропонованого конструктивного рішення

електричного міжз'єднання окремих СЕ у батареї і ефективного теплового контакту СЕ до радіаторної пластини фотоенергетичного модуля.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В якості діелектричного теплопровідного шару був обраний шар Al_2O_3 , зважаючи на легкість його отримання шляхом електрохімічного анодування алюмінію і його високу механічну та діелектричну міцність. Проведені на тестових пластинах алюмінію експерименти дозволили визначити оптимальний спосіб отримання діелектричного шару Al_2O_3 , до складу якого входять такі основні стадії [6]:

1. Промивка у дистильованій воді.
2. Хімічне знежирення у водному розчині:
 - карбонат натрію Na_2CO_3 (технічний, ГОСТ 5100-85) — 50 г/л;
 - тринатрійфосфат $Na_3PO_4 \cdot H_2O$ (технічний, ГОСТ 201-76) — 50 г/л;
 - сульфонол $C_nH_{2n+1}C_6H_4NaO_3S$ (ТУ 075 10508.135-98) — 0,5 г/л.
 Знежирення при температурі розчину 60–65 °С протягом 60 с.
3. Промивка у дистильованій воді.
4. Хімічне травлення та поліровка алюмінієвої пластини у водному розчині гідрооксиду натрію NaOH (ЧДА, ГОСТ 4328-77) 80 г/л.

Травлення при температурі розчину 60–60 °С протягом 6 хвилин.
5. Промивка у дистильованій воді.
6. Анодування у 20 % водному розчині сірчаної кислоти H_2SO_4 (ЧДА, ГОСТ 4204-77) при температурі 2–5 °С протягом 30 хв при густині струму 20, 200 або 500 мА/см².
7. Промивка у дистильованій воді.
8. Зарощування пор у шарі Al_2O_3 шляхом кип'ятіння у воді при температурі 98–100 °С протягом 30 хв.

За викладеним вище способом було отримано шість серій зразків, що відрізнялися умовами отримання: зразки серій № 1 та № 2 отримані при густині струму анодування 20 мА/см², зразки серій № 3 та № 4 — 200 мА/см², зразки серій № 5 та № 6 — 500 мА/см². Зразки серій № 2, № 4 та № 6 додатково піддавалися кип'ятінню для зарощування пор [6].

Як зазначалося раніше [7], внаслідок великої різноманітності поліморфних і гідратних форм оксиду алюмінію анодний Al_2O_3 має змінний склад. Експериментальні дані свідчать про те, що анодний Al_2O_3 являє собою рентгеноаморфну тверду речовину, що складається з гідратованого оксиду алюмінію $Al_2O_3 \cdot (H_2O)_n$, де $n = 0-3$, розвинена внутрішня поверхня якого адсорбує аніони і катіони використаного електроліту.

Для дослідження та вибору оптимального режиму осадження були проведені рентгендифрактометричний аналіз та мікроскопія досліджуваних зразків серій № 1–6 за допомогою растрового тунельного мікроскопу PEM-106 (збільшення у 100–10000 разів) та металографічного мікроскопу Sigeta MM-700 (збільшення у 10–100 разів).

На рис. 1 наведено мікроскопічні знімки, отримані за допомогою мікроскопу Sigeta MM-700, характерні досліджуваним серіям зразків.

На рис. 2 наведено мікроскопічні знімки зразків із зарощеними порами, отримані за допомогою растрового електронного мікроскопу PEM-106.

На рис. 3 наведено рентгендифрактограму шару Al_2O_3 , характерну для серій досліджуваних зразків із зарощеними порами.

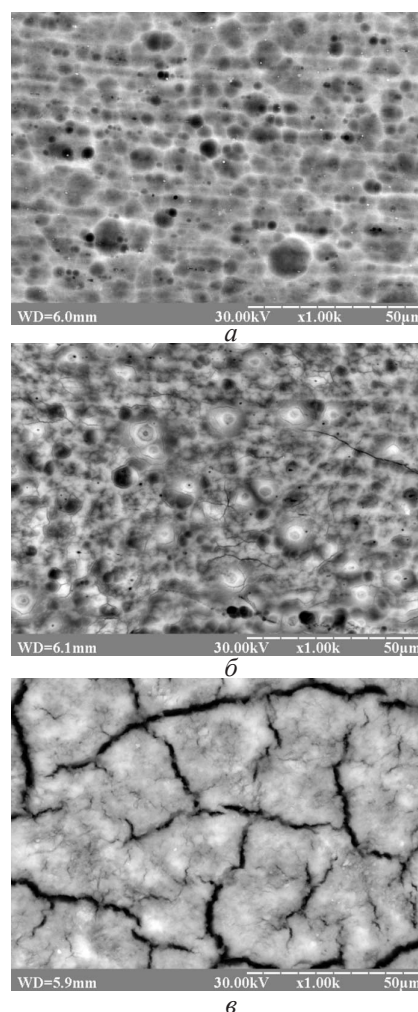


Рис. 2. Мікроскопічні знімки зразків серій № 2, № 4 та № 6 (а–в), отримані за допомогою растрового електронного мікроскопу PEM-106 при збільшенні у 1000 разів

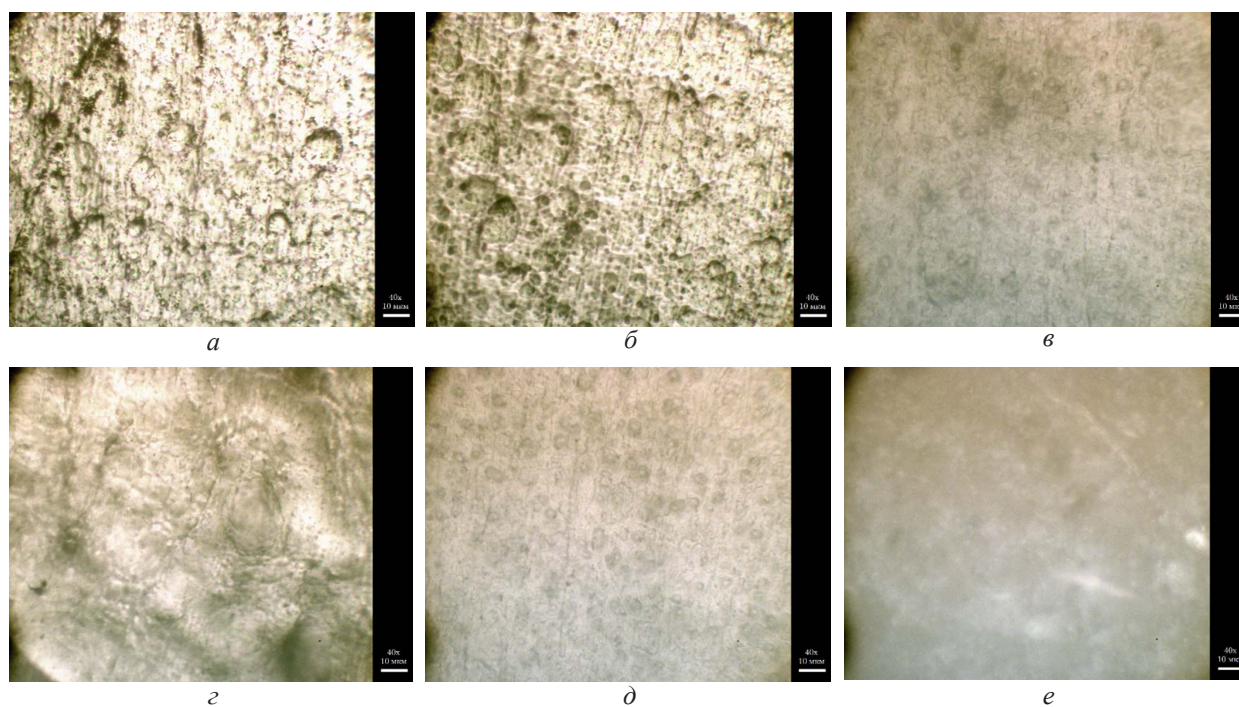


Рис. 1. Мікроскопічні знімки зразків серії № 1–6 (а–е), отримані за допомогою мікроскопу Sigeta MM-700 при збільшенні у 40 разів

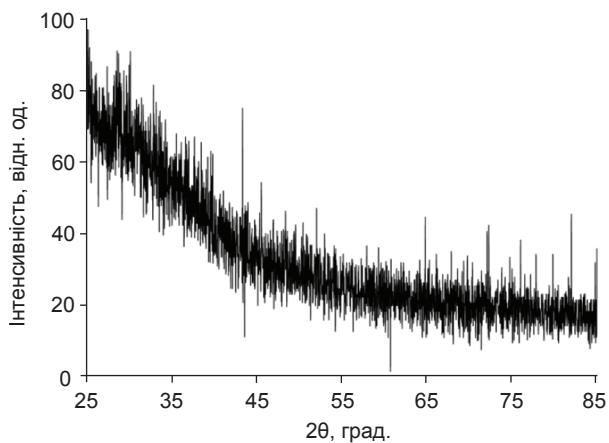


Рис. 3. Характерна рентгендифрактограма шару Al_2O_3 для серій досліджуваних зразків із зарощеними порами

Аналіз наведеної рентгендифрактограми свідчить про відсутність кристалічної фази, а вся плівка являє собою рентгеноаморфну тверду речовину. Дослідження мікроскопічних знімків дозволяє зробити висновок, що найбільшу товщину діелектричного шару можна отримати при збільшенні густини струму в електрохімічній комірці до 500 mA/cm^2 . Однак при таких струмах на мікроскопічних знімках (рис. 2) спостерігаються тріщини від $0,5$ до 5 мкм , що призводить до втрати діелектричних властивостей шару. Тому оптимальним є режим отримання бар'єрного шару при густині струму не більше $20\text{--}40 \text{ mA/cm}^2$ (зразки серії № 2).

Подальше дослідження електричного опору отриманих шарів Al_2O_3 зразків серії № 2 показало, що електричний опір таких шарів складає не менше 1 кОм . Зазначене може бути обумовлене недостатністю герметизації пор при кип'ятінні, через які відбувається шунтування шару.

Шляхом аналізу літературних джерел було запропоновано використання оксиду цинку для герметизації пор у шарі Al_2O_3 . Для реалізації зазначеного рішення було сформовано структуру $Al/Al_2O_3/ZnO$. В роботі шари ZnO осаджувалися методом неактивного магнетронного розпилення на постійному струмі в вакуумній установці ВУП-5М. Мішень для розпорошення представляє собою спресовану механічну суміш дрібнодисперсійного порошку ZnO напівпровідникової чистоти. В якості пристрою, що розпилює, використовувався магнетрон з діаметром 40 мм та магнітною індукцією $0,1 \text{ Тл}$. Довжина

розрядного проміжку, що є зазором між магнетроном і підкладкою, складала 70 мм . Питома потужність магнетрону складала $0,2 \text{ Вт/см}^2$. Температура підкладки варіювалась від $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Вихідний залишковий тиск у вакуумній камері, який створювався дифузійним насосом, складав $3 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$, робочий тиск аргонно-повітряної суміші в процесі розпилення варіювався в діапазоні значень $(2,1\text{--}2,6) \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$ за рахунок зміни швидкості натікання аргону в вакуумну камеру, газування та натікання повітря.

Мікроскопічний аналіз поверхні зразків з причини малої товщини шару ZnO не виявив змін у морфології поверхні шару відносно зображених на рисунках 1 та 2.

Дослідження електричного опору отриманих шарів Al_2O_3/ZnO на поверхні алюмінію показало, що електричний опір таких шарів складає більше 2 кОм . Зазначений електричний опір є достатнім для ефективного монтажу СЕ на поверхні радіаторної пластини без суттєвих втрат енергії, що ними виробляється.

Площадки контактної металізації поверх діелектричного шару формувалися термовакуумним напиленням металічних плівок через виготовлену з нержавіючої сталі маску з відповідною геометрією для розміщення СЕ. Серія експериментів, проведених на тестових пластинах, які були покриті діелектричним шаром, показали, що оптимальним варіантом створення металізації є використання двошарової системи, яка складається з шару хрому завтовшки $0,15 \text{ мкм}$, який забезпечує високу адгезію металічної плівки до діелектричного покриття та шару міді, завтовшки близько 2 мкм , який забезпечує можливість пайки зразків СЕ до такої металізації (рис. 4). Напилення відбувалось в установці ВУП-4 при вакуумі $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, підкладка перед напиленням прогрівалася до $110 \text{ }^\circ\text{C}$, час напилення з вольфрамових випаровувачів становив 30 с для хрому та 360 с для міді.

Дослідження можливостей пайки до сформованих плівкових шарів здійснювалось шляхом прогріву пластини з нанесеною металізацією електропідією до температури $150 \text{ }^\circ\text{C}$ з наступним лужінням металізації низькотемпературним малооловянистим

припоєм (рис. 5а) і пайкою до такої поверхні комутаційних провідників і тестових зразків СЕ (рис. 5б).

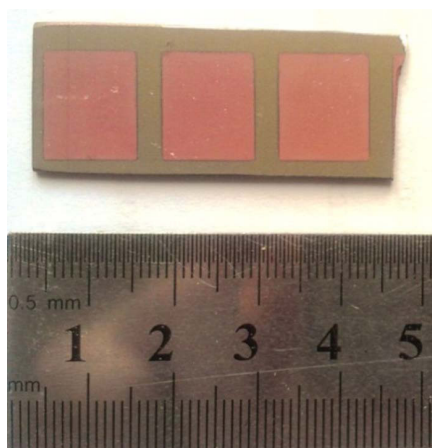


Рис. 4. Фрагмент тестової пластини алюмінію після нанесення двошарової Cr/Cu контактної металізації на поверхню діелектричного шару $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$

Проведені експерименти з пайки до нанесених шарів показали, що при мінімізації часу витримки плівкових шарів міді на повітрі суттєвого окислення не відбувається і можлива ефективна низькотемпературна пайка таких шарів з використанням нейтральних флюсів, наприклад канифолі.

Дослідження вихідних параметрів тестових зразків СЕ на основі структури InGaP/InGaAs/Ge до і після пайки не виявило суттєвого впливу даного технічного процесу на параметри таких пристроїв.

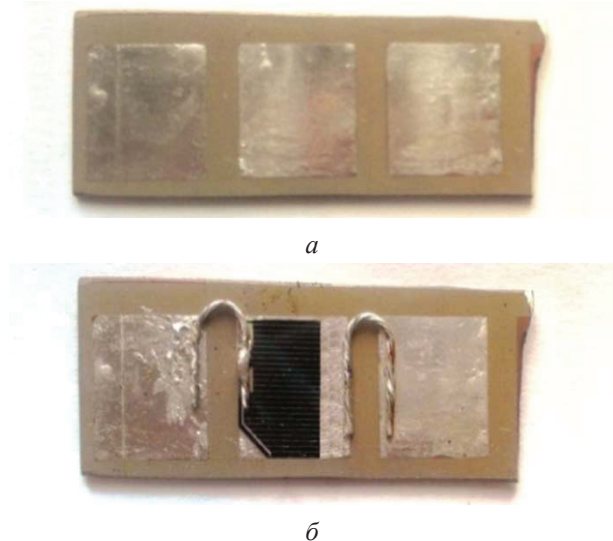


Рис. 5. Металізація, покрита низькотемпературним припоєм (а) та металізація після припайки фрагмента тестового СЕ на основі структури InGaP/InGaAs/Ge і комутаційних провідників (б)

ВИСНОВОК

У роботі запропоновано теплопровідний діелектричний контакт для сонячних елементів фотоенергетичної установки на основі плівкової структури $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Cr}/\text{Cu}$. Визначено оптимальні режими отримання зазначених шарів, ключовим з яких є отримання бар'єрного бездефектного шару оксиду алюмінію. Проведено експериментальну апробацію зазначеної структури, яка підтвердила можливість використання таких шарів для створення сонячної батареї на основі елементів із структурою InGaP/InGaAs/Ge для гібридної фотоенергетичної установки з охолодженням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jones A. D. A thermal model for photovoltaic systems / A. D. Jones, C. P. Underwood // Solar Energy. — 2001. — Vol. 70, Issue 4. — P. 349–359.
2. Tuomiranta A. Validation of thermal models for photovoltaic cells under hot desert climates / A. Tuomiranta, P. Marpu, S. Munawwar, H. Ghedira // Energy Procedia. — 2014. — Vol. 57. — P. 136–143.
3. Розроблення фотоенергетичної установки на основі багатоперехідних кремнієвих сонячних елементів з вертикальними діодними комірками. Звіт про НДР (заключний; № держреєстрації 0111U007628) / Керівник Є. Сокол. — Харків: НТУ «ХП», 2012.
4. Стребков Д. С. Матричные солнечные элементы: Монография в 3-х томах. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2009. — Т. 1. — 120 с.
5. Сокол Е. И. Физико-технические особенности и предельные практические возможности фотоэнергетического модуля нового поколения на территории Украины / Е. И. Сокол, В. Р. Копач, Р. В. Зайцев и др. // Відновлювана енергетика. — 2011. — № 2(25). — С. 18–28.
6. Мельников П. С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1991 — 384 с.
7. Напольский К. С. Синтез пространственно упорядоченных металл-оксидных нанокмполитов на основе пористого Al_2O_3 / Под ред. А. Р. Кауля. — М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2008. — 211 с.

REFERENCES

1. Jones A. D. A thermal model for photovoltaic systems / A. D. Jones, C. P. Underwood // *Solar Energy*. — 2001. — Vol. 70, Issue 4. — P. 349–359.
2. Tuomiranta A. Validation of thermal models for photovoltaic cells under hot desert climates / A. Tuomiranta, P. Marpu, S. Munawwar, H. Ghedira // *Energy Procedia*. — 2014. — Vol. 57. — P. 136–143.
3. Rozroblennya fotoenergetichnoï ustanovki na osnovi bagatoperehidnih kremnievih sonyachnih elementiv z vertikal'nimi diodnimi komirkami. Zvit pro NDR (zaklyuchnij; № derzhreestraciï 0111U007628) / Kerivnik Є. Sokol. — Harkiv: NTU «HPI», 2012.
4. Strebkov D. S. Matrichnye solnechnye elementy: Monografiya v 3-h tomah. — M.: GNU VIESH, 2009. — Vol. 1. — 120 p.
5. Sokol E. I. Fiziko-tehnicheskie osobennosti i predel'nye prakticheskie vozmozhnosti foto`energeticheskogo modulya novogo pokoleniya na territorii Ukrainy / E. I. Sokol, V.R. Kopach, R. V. Zajcev i dr. // *Vidnovlyuvana energetika*. — 2011. — No. 2(25). — P. 18–28.
6. Mel'nikov P. S. Spravochnik po gal'vanopokrytyam v mashinostroenii. — M.: Mashinostroenie, 1991 — 384 p.
7. Napol'skij K. S. Sintez prostranstvenno uporyadochennyh metall-oksidnyh nanokompozitov na osnove poristogo Al_2O_3 / Pod red. A. R. Kaulya. — M.: Moskovskij gosudarstvennyj universitet im. M. V. Lomonosova, 2008. — 211 p.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ РУКОПИСІВ

У поданій роботі чітко і послідовно викладаються оригінальні, отримані автором (авторами) результати, що раніше не публікувалися. Рукопис не має перебувати на розгляді до публікації в іншому видавництві.

1. Роздрукований рукопис, з підписами всіх авторів, надається в 1 прим. однію із мов: українською, російською або англійською. Електронний варіант рукопису подається на магнітному або оптичному носії, або (що зручніше) надсилається по E-mail.
2. До рукопису додаються такі документи: направлення від установи, де виконана робота; заява на ім'я головного редактора з відомостями про авторів; експертний висновок про можливість опублікування роботи у відкритій пресі (для громадян України); зовнішня рецензія, підписана доктором наук.
3. Послідовність розміщення матеріалу до рукопису: індекс за універсальною десятиковою класифікацією (УДК), назва статті, ініціали та прізвище автора(ів), повна поштова адреса установи, у яких виконана робота, анотація, ключові слова, текст, перелік посилань, набір ілюстрацій, підписи до рисунків та таблиць.
4. Назва статті, ініціали та прізвище автора (авторів), анотація та ключові слова подаються українською (для громадян України), російською (для громадян СНД) та англійською (для всіх авторів) мовами. Обсяг анотації не перевищує 100 слів.
5. Текст рукопису бажано структурувати розділами: Вступ, де коротко формується передісторія проблеми та мета даного дослідження. Основна частина публікації, містить постановку задачі, експериментальний і/або теоретичний опис досліджень. Висновок, у якому викладено результати досліджень, висновки, перспективи розвитку досліджень і можливі застосування.
6. Повний обсяг оглядової статті не повинен перевищувати 60-ти сторінок, оригінальної статті — 20 сторінок, короткого повідомлення — 5-ти сторінок.
7. Всі фізичні величини подаються в одиницях системи СІ.
8. Вимоги до оформлення рукопису. Параметри сторінки: формат сторінки — А4 (210 × 297 мм). Поля: праворуч — 10 мм, інші — 20 мм. Шрифт Times New Roman, міжрядковий інтервал — полуторний. Назва статті, — прописними, кегль 14 pt. Автори, текст рукопису, формули, — 12 pt, анотація, перелік посилань, — 11 pt, підписи до рисунків і таблиць — 10.
9. Електронна версія рукопису подається у форматі Microsoft Word (версії не вище MS Word 2003). Для запису формул слід використовувати вбудований редактор Microsoft

Equation 3.0 з параметрами: основний математичний символ — 12 pt, індекс, над- і підіндекси — 6 pt. Формат змінних у тексті та формулах мають бути ідентичними (бажано курсивом, грецькі символи — прямі).

10. Електронний варіант ілюстрацій подається в окремих файлах в одному із наступних форматів: tif, cdr (CorelDraw 11) чорно-білі або з градацією сірого, пронумеровані та поймаєні прізвищем першого автора.
11. Ілюстрації до рукопису (рисунки, фото, таблиці), що якоїсь причини не можуть бути надані в електронному вигляді, мають бути акуратно виконані на білому папері або подані у вигляді якісних фотографій. Їхні розміри не повинні перевищувати формат А4. На зворотному боці кожної ілюстрації вказується її порядковий номер, підпис до рисунку і прізвище першого автора.
12. Перелік посилань подається мовою оригіналу, складається в порядку посилання в тексті й відповідно до вимог ВАК України для бібліографічного опису (див. додаток).
13. Автори повідомляють про себе такі відомості: прізвище, ім'я, по-батькові, службову та домашню адреси, телефон, факс, E-mail, вказують, з ким із авторів бажано вести спілкування.

Рукописи направляються за адресою:

Науковий фізико-технологічний центр МОН та НАН України, майдан Свободи, 6, м. Харків, 61022, а/с 4499, Україна.

E-mail: journal_pse@ukr.net

Додаток

1. Зыков А. В., Качанов Ю. А., Фареник В. И. Генерация потока ионов из пучкового фокуса // Письма в ЖТФ. — 1986. — Т. 12, вып. 10. — С. 593–596.
2. Zykov A. V., Dudin S. V., Farenik V. I. Low Energy Intense Ion Beams Space Charge Neutralization // Review of Scientific Instruments. — 1994. — Vol. 65, No. 4. — P. 1451–1453.
3. Егоренков В. Д., Лисовский В. А., Красников О. Б., Фареник В. И. Влияние растущих полимерных пленок на ВАХ ВЧЕ-разряда в технологических газах // Материалы IV международной конференции по физике и технологии тонких пленок. — Ивано-Франковск. — 1993. — 154 с.
4. Вербицкий В. Г. Ионные нанотехнологии в электронике. — К.: «МП Леся», 2002. — 376 с.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

В предоставляемой работе четко и последовательно излагаются оригинальные, неопубликованные ранее результаты, полученные автором (авторами). Рукопись не должна находиться на рассмотрении к публикации в другом издательстве.

1. Распечатанная рукопись, с подписями всех авторов, представляется в 1 экз. на одном из следующих языков: украинском, русском или английском. Электронный вариант рукописи предоставляется на магнитном или оптическом носителе, либо (что предпочтительнее) направляется по E-mail.
2. К рукописи прилагаются следующие документы: направление от учреждения, где выполнена работа, заявление на имя главного редактора со сведениями об авторах, экспертное заключение о возможности опубликования работы в открытой печати (для граждан Украины), внешняя рецензия, подписанная доктором наук.
3. Последовательность размещения материала статьи: индекс по универсальной десятичной классификации (УДК), название статьи, инициалы и фамилия автора(ов), полные почтовые адреса учреждений, в которых выполнена работа, аннотация, ключевые слова, текст, список цитируемой литературы, набор иллюстраций, подписи к рисункам и таблицам.
4. Название статьи, инициалы и фамилия автора(ов), аннотации и ключевые слова подаются на трех языках: украинском (для граждан Украины), русском (для граждан СНГ) и английском (для всех авторов) языках. Объем аннотации не превышает 100 слов.
5. Текст рукописи желательно структурировать разделами: Введение, кратко формулирующее предисторию проблемы и цель данного исследования. Основная часть публикации, содержащая постановку задачи, экспериментальное и/или теоретическое описание исследований. Заключение, в котором приводятся результаты исследований, выводы, перспективы развития исследований и их возможные применения.
6. Полный объем обзорной статьи не должен превышать 60 страниц, оригинальной статьи — 20 страниц, краткого сообщения — 5 страниц.
7. Все физические величины следует представлять в единицах системы СИ.
8. Требования к оформлению рукописи. Параметры страницы рукописи: формат страницы: А4 (210 × 297 мм). Поля: справа — 10 мм, остальные — 20 мм. Шрифт Times New Roman, межстрочный интервал — полуторный. Название статьи — прописными, кегль — 14 pt. Авторы, текст рукописи, формулы — 12 pt, аннотация список литературы — 11 pt, подписи к рисункам и таблицам — 10 pt.
9. Электронная версия рукописи представляется в формате Microsoft Word (версия не выше MS Word 2003). Для записи формул следует использовать встроенный редактор Microsoft Equation 3.0 с параметрами: основной математический символ — 12 pt, индекс, над- и подиндексы — 6 pt. Формат переменных в тексте и формулах должен быть идентичным (желательно курсивом, греческие символы — прямые).
10. Электронный вариант иллюстраций предоставляется в отдельных файлах в одном из следующих форматов: tif, cdr (CorelDraw 11) черно-белые с градацией серого, поименованные фамилией первого автора.
11. Иллюстрации к рукописи (рисунки, фото, таблицы), по какой-либо причине не предоставляемые в электронном виде, должны быть аккуратно выполнены на белой бумаге или представлены в виде качественных фотографий. Их размеры не должны превышать формат А4. На оборотной стороне каждой иллюстрации указывается ее порядковый номер, подрисовочная надпись и фамилия первого автора.
12. Перечень ссылок подается языком оригинала, составляется в порядке упоминания в тексте и в соответствии с требованиями ВАК Украины на библиографическое описание (см. приложение).
13. Авторы сообщают о себе следующие сведения: фамилию, имя, отчество, служебный и домашний адреса, телефон, факс, E-mail, указывают с кем из авторов предпочтительно вести переписку.
Рукописи направляются по адресу:
Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины, пл. Свободы, 6, г. Харьков, 61022, п/я 4499, Украина.
E-mail: journal_pse@ukr.net

Приложение

1. Зыков А. В., Качанов Ю. А., Фареник В. И. Генерация потока ионов из пучкового фокуса // Письма в ЖТФ. — 1986. — Т. 12, вып. 10. — С. 593–596.
2. Zuykov A. V., Dudin S. V., Farenik V. I. Low Energy Intense Ion Beams Space Charge Neutralization // Review of Scientific Instruments. — 1994. — Vol. 65, No. 4. — P. 1451–1453.
3. Егоренков В. Д., Лисовский В. А., Красников О. Б., Фареник В. И. Влияние растущих полимерных пленок на ВАХ ВЧЕ-разряда в технологических газах // Материалы IV международной конференции по физике и технологии тонких пленок. — Ивано-Франковск. — 1993. — 154 с.
4. Вербицкий В. Г. Ионные нанотехнологии в электронике. — К.: «МП Леся», 2002. — 376 с.

INFORMATION FOR AUTHORS

The paper should clearly represent original, unpublished earlier results obtained by the author (authors). The manuscript must not be considered elsewhere for publication.

Only for the citizens of Ukraine the article should have a direction from the institution, where the work was made, and sanction to its open publication.

The journal publishes reviews, original articles and brief reports. The length of the review article should not in general exceed 60000 words, original article — 15000 words and brief report — 5000 words.

The paper is signed by all the authors. The authors inform about: surname, name, patronymic, office and home addresses, tel./fax, E-mail and indicate the corresponding author.

The manuscript is represented in two hard copies in one of three languages: Ukrainian, Russian or English. It is desirable to prepare the manuscript in English and its electronic version on diskette or to send it by E-mail.

The paper copies should be prepared with sesquialteral line spacing and wide margins, on numbered sheets. The format of page is A4 (210 × 297 mm). The font is Times New Roman. Structure of the paper. Classification codes (UDS or PACS). Article title. Authors. Affiliations. Abstract. Main text. Acknowledgements. Appendices. References. Figures. Figure captions. Tables.

Abstract. Abstract is represented in two languages: English and the paper language. Abstract is submitted in Ukrainian for the citizens of Ukraine. The length of Abstract does not exceed 100 words.

Main text. It is desirable to divide the Main text in the following sections: 1) Introduction. 2) Main part (Theoretical methods. Experimental details. Results. Discussion. 3) Conclusion.

References. References should be numbered consecutively (in square brackets) through out the text and listed by number in the reference list. Listed references should be complete in all details including article titles. Please refer to the first issue of the journal or see: <http://www.univer.kharkov.ua>, Appendix for examples.

Illustration. Illustrations are submitted in two copies. Illustrations should be prepared on white paper or can be photographs. The line drawing should be prepared in black Indian ink. The photographs should be originals with somewhat more contrast than is required in the printer version. The size of illustrations should not exceed the A4 format.

Electronic version. The electronic version of the article is represented in the format of Microsoft Word. It is desirable to use the editor

of Microsoft Equation 3.0 for printing mathematical equations and formulae. The electronic form of the illustrations is represented in graphics files: tif, cdr — 1 bit, for the microphotographs — 8 bit with a grey gradation named by the surname of the author on a diskette or via e-mail. The size of one e-mail file should not exceed 1 MB. The electronic form of illustration (in graphic files) should be kept separately from the text files. The graphic files must be prepared with resolution 300 dpi and above.

Please write to the Publisher for details.

The paper should be sent to the Publisher, Editorial office, Scientific Center of Physics and Technology, MES and NAS Ukraine, 6 Svobody sq, Kharkiv, 61022, Ukraine. E-mail: journal_pse@ukr.net

Appendix

1. Zykov A. V., Dudin S. V., Farenik V. I. Low Energy Intense Ion Beams Space Charge Neutralization // Review of Scientific Instruments. — 1994. — Vol. 65, No. 4. — P. 1451–1453.
2. Baglin V., Bojko J., Grobner O., Henrist B., Hilleret N., Scheuerlein C., Taborelli M. The secondary electron yield of technical materials and its variation with surface treatment // 7th European Particle Accelerator Conference. — Vienna (Austria). — 2000. — 217 p.
3. Raizer Y. P., Shneider M. N., Yatsenko N. A. Radio-Frequency Capacitive Discharges. — CRC Press: Boca Raton, 1995. — 300 p.

Тематичні напрямки:

- фізика поверхні — модифікації, покриття, плівки, приповерхні і перехідні шари різних видів, як результат впливу плазми, корпускулярно-фотонних потоків і випромінювання;
- взаємодія різноманітних видів випромінювання з поверхнями металів, напівпровідників, діелектриків;
- фізика і техніка низькотемпературної плазми;
- фізика і техніка лазерів;
- фізичні властивості плівок і покриттів;
- нанофізика, мікро- і нанотехнології, мікро- і наноелектроніка;
- фізичні та технічні аспекти сучасних технологій обробки поверхні, діагностики і контролю технологічних процесів.

Тематические направления:

- физика поверхности — модификации, покрытия, пленки, приповерхностные и переходные слои различных видов, как результат воздействия плазмы, корпускулярно-фотонных потоков и излучения;
- взаимодействие разнообразных видов излучения с поверхностями металлов, полупроводников, диэлектриков;
- физика и техника низкотемпературной плазмы;
- физика и техника лазеров;
- физические свойства пленок и покрытий;
- нанофизика, микро- и нанотехнологии, микро- и наноэлектроника;
- физические и технические аспекты современных технологий обработки поверхности, диагностики и контроля технологических процессов.

Topic directions:

- surface physics — modification, coating, film, near-surface and transient layers of different kinds, as outcome of influencing of plasma, corpuscular-photon flows and radiation;
- interaction of miscellaneous kinds of radiation with surfaces of metals, semiconductors, dielectrics;
- physics and engineering of low-temperature plasma;
- physics and engineering of lasers;
- physical characteristics of films and coatings;
- nanophysics, micro and nanoelectronics, micro and nanotechnologies;
- physical and engineering aspects of modern technologies of surfacing, diagnostic and control of technological processes.

Наукове видання

Журнал фізики та інженерії поверхні
Том 2, № 1, 2017

Українською, російською та англійською мовами

Комп'ютерне верстання Пхалагова Н. А., Дудіна Н. Г.
Макет обкладинки Дончик І. М.

Підписано до друку 29.03.2017 р. Формат 60 × 84/8. Папір офсетний. Друк ризографічний.
Ум. друк. арк. 4,2. Обл-вид. арк. 4,7. Наклад 100 пр. Зам. №

61022, м. Харків, майдан Свободи, 6.
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
Науковий фізико-технологічний центр МОН і НАН України

Надруковано: ХНУ імені В. Н. Каразіна,
61022, Харків, майдан Свободи, 4.
Видавництво
Тел. 705-24-32
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13. 01. 09

2017

Журнал физики
и инженерии
поверхности

Журнал физики
и инженерии
поверхности

Том 2, № 1

Vol. 2, No. 1

Journal of
Surface Physics
and Engineering