

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ ім. Г. В. Курдюмова

**ПОЛОЦЬКИЙ Денис Юрійович**

УДК 538.975, 538.95

**Електронні, магнітні й оптичні властивості  
та мікроструктура гібридних гетеросистем TiN/Fe/C і AlN**

01.04.07 – фізика твердого тіла

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

КИЇВ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, м. Київ

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Короташ Ігор Васильович,**  
Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова  
НАН України,  
старший науковий співробітник  
відділу надпровідникової електроніки

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Таренков Володимир Юрійович,**  
Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна  
НАН України,  
старший науковий співробітник  
відділу високих тисків та перспективних технологій

кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Гуменюк-Сичевська Жанна Віталіївна,**  
Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова  
НАН України,  
старший науковий співробітник  
відділу фізики і технології низьковимірних систем

Захист відбудеться 13 жовтня 2020 р. о 14:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.168.02 Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України за адресою: 03142, Київ, бульвар Академіка Вернадського, 36.

З матеріалами дисертації можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України (03142, Київ, бульвар Академіка Вернадського, 36). Електронні версії матеріалів дисертації розміщено на вебсайті Інституту: [https://www.imp.kiev.ua/?lang=ukr&a=dissert\\_sovet&str=years2\\_2020](https://www.imp.kiev.ua/?lang=ukr&a=dissert_sovet&str=years2_2020).

Автореферат розіслано 4 вересня 2020 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.168.02  
д.ф.-м.н., с.н.с.



Т. М. Радченко

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Інформатизація суспільства вимагає створення нових поколінь систем обробки, зберігання та передачі гігантських масивів інформації. Для прогресу у цьому напрямі потрібно створити новітню елементну базу на основі досягнень нанoeлектроніки, розробити системи зберігання інформації великої місткості, розвинути електроніку на гнучких діелектричних підкладках. Важливе місце у прогресі суспільства займає й розробка систем телекомунікації, навігації та позиціонування на основі надчутливих кріогенних приймачів. Тому сьогодні особлива увага надається розвитку нанотехнологій — галузі, що спрямована на розуміння та маніпулювання матерією на нанометрових масштабах і на встановлення особливостей фізичних процесів, що виникають і проходять у нанорозмірних об'єктах, і вивченню природи цих процесів.

Створення пристроїв нанoeлектроніки потребує розробки принципово нових технологічних методів створення вихідних наноструктур з прецизійним контролем їх впорядкованості, просторового розташування та топології. Пошук та дослідження цих методів є предметом зусиль численних наукових лабораторій і промислових компаній.

Актуальним і перспективним для створення об'єктів нанофізики є розвиток нових іонно-плазмових технологій, які могли б дозволити маніпулювати властивостями як вихідних матеріалів на нанорівні, так і цілеспрямовано управляти властивостями створюваних нанооб'єктів на кожному із технологічних етапів. Для вирішення зазначених проблем в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України було створено принципово нове іонно-плазмове вакуумно-технологічне обладнання на основі геліконного реактора і плазмово-дугових прискорювачів. На його базі для створення об'єктів нанофізики були розроблені нові методи синтезу вуглецевих наноструктур, які можуть стати основою нового типу електроніки — вуглецевої мікро- і нанoeлектроніки. Зокрема, на основі вуглецевих наноструктур можуть бути реалізовані квантові 2D, 1D, 0D вимірні об'єкти, активні і пасивні базові елементи електронних схем, а також створена новітня радіаційно- і термостійка елементна база (перетин поглинання теплових нейтронів у C — 0,0035 барн, у Si — 0,171 барн).

Розвиток електроніки на гнучких підкладках (у тому числі на тонких полімерних плівках) потребує відповідних нових технологічних процесів [1]. Тому актуальним є розробка методів формування робочих шарів і гетероструктур на гнучких полімерних підкладках, які, в основному, являються термолабільними матеріалами, і для яких треба забезпечити ефективне відведення тепла, що розсіюється в електронних схемах.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.**

Робота виконувалась в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України і була частиною НДР за темами: «Установка для прецизійного іонно-плазмового формування вуглецевих нанотрубок в єдиному вакуумно-технологічному циклі» (ДР №0108U003096, 2008 р.); «Вакуумно-плазмовий модуль для технологічного комплексу виготовлення елементарної бази

наноелектроніки та мікроенергетики» (ДР №0109U005592, 2009 р.); «Розробка технології створення функціональних вуглецевих наноструктур на основі новітнього гібридного геліконно-дугового іонно-плазмового реактора» (ДР №0113U007251, 2012–2014 рр.; Спільний проект НАН України і УНТЦ); «Надпровідні і квантові властивості багатошарових гетероструктур на основі феромагнетиків та новітніх перспективних матеріалів» (ДР №012U001131, 2012–2016 рр.); «Квантовий транспорт в гібридних надпровідникових наноструктурах і іонно-плазмових конденсатах та їх електромагнітні властивості» (ДР №0117U002130, 2017-2021 рр).

**Мета й завдання дослідження.** Мета роботи — створення в геліконно-дугових іонно-плазмових процесах гібридних гетеросистем TiN/Fe, TiN/Fe/C та AlN, з'ясування особливостей їх електронних, магнітних й оптичних властивостей та мікроструктури; встановлення закономірностей і зв'язку між їх фізичними властивостями та мікро- і наноструктурою.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні наукові завдання.

1. Вивчити фізико-технічні можливості іонно-плазмової системи гібридного геліконно-дугового іонно-плазмового реактора (ГГДПР).
2. На основі ГГДПР розробити фізичні засади формування іонно-плазмових конденсатів ряду матеріалів (TiN, AlN, Fe, C) на діелектричних підкладках, в тому числі AlN на термолабільних полімерних плівкових підкладках.
3. На основі розроблених геліконно-дугових іонно-плазмових процесів створити гібридні гетеросистеми TiN/Fe, TiN/Fe/C на кремнієвих підкладках та AlN на кремнієвих і гнучких полімерних підкладках.
4. Вивчити електронні, магнітні й оптичні властивості та мікроструктуру створених гібридних гетеросистем TiN/Fe, TiN/Fe/C і AlN та встановити закономірності і зв'язок між їх фізичними властивостями та мікро- і наноструктурою.

**Об'єкт дослідження:** гібридні гетеросистеми TiN/Fe, TiN/Fe/C на кремнієвих підкладках і наноструктуровані плівки AlN на кремнієвих і полімерних підкладках.

**Предмет дослідження:** Процеси формування, електронні, магнітні й оптичні властивості та мікроструктура гібридних гетеросистем TiN/Fe, TiN/Fe/C та AlN.

**Методи дослідження:** ІЧ-Фур'є-спектроскопія, атомно-силова мікроскопія; електронна мікроскопія; сквід-магнітометрія; дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ); рентгеноструктурний аналіз; дифракція відбитих електронів (метод Кікучі).

**Наукова новизна отриманих результатів, що виносяться на захист.**

1. Вперше виявлено явище високоенергетичного режиму геліконного розряду «Плазмова колона», при якому плазма високої густини розповсюджується із розрядної камери в технологічну зону (камеру обробки).

2. Вперше отримана регулярна структура нанорельєфу розміром 2–10 нм на плівці нітриду титану (TiN) на монокристалічному кремнію, на якій синтезовані магнітні монодоменні нанокластери заліза (Fe).

3. Вперше виявлено суперпарамагнітний ефект у наноструктурах TiN/Fe.

4. Вперше встановлено, що у наноструктурах TiN/Fe монодоменні нанокластери Fe мають істотно більшу магнітну анізотропію, ніж монокристалічне залізо.

5. Вперше встановлено, що наноструктурований вуглець, синтезований на кластерах заліза (наноструктура TiN/Fe/C), в декілька разів підвищує магнітну сприйнятливості порівняно із зразком без вуглецю (наноструктура TiN/Fe) і підвищує температуру суперпарамагнітної межі.

6. Вперше встановлено, що при кімнатних температурах ВАХ гетероструктур TiN/Fe/C демонструють виникнення станів з нульовим диференціальним опором і гігантською провідністю, що може бути обумовленим резонансно-перколяційним транспортом.

7. Вперше виявлено ефекти перемикання мемристорного типу у гетероструктурі TiN/Fe/C між високоомним і низькоомним станами.

8. Вперше синтезовані наноструктуровані плівки AlN на гнучких термолабільних полімерних підкладках тефлон і майлар.

9. Встановлено, що поверхня отриманих плівок AlN характеризується наявністю двох рельєфів: мікрорельєфа і нанорельєфа. Структура рельєфів залежить від робочих параметрів — тиску і часу нанесення.

10. В наноструктурованих плівках AlN, синтезованих на полімерних підкладках з тефлону та майлару, виявлено смугу залишкових променів, що приводить до ефективного блокування ІЧ-випромінювання.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі геліконно-дугових джерел плазмових потоків високої густини розроблено фізичні засади формування іонно-плазмових конденсатів для створення функціональних гібридних гетеросистем TiN/Fe, TiN/Fe/C та AlN.

Результати дослідження магнітних і релаксаційних явищ у наноструктурованих гетероструктурах TiN/Fe вказують на можливість суттєвого збільшення щільності магнітного запису за рахунок істотного зростання коефіцієнта анізотропії заліза в наноструктурованому стані. Синтез на поверхні наноструктурованого заліза вуглецевих наноструктур (TiN/Fe/C) дозволяє наблизитися до вирішення проблеми подолання суперпарамагнітної межі.

Виявлена асиметрична гістерезисна поведінка ВАХ гетероструктур TiN/Fe/C дозволяє реалізувати на їх основі нові пристрої для запису даних — мемристори.

Створені мультиспектральні ІЧ-фільтри на основі іонно-плазмових конденсатів AlN на гнучких полімерних підкладках з майлару і тефлону потрібні для надчутливих кріогенних приймальних систем новітніх систем передачі інформації, телекомунікацій, нової генерації систем навігації і позиціонування.

**Особистий внесок здобувача.** Всі експериментальні зразки для досліджень було одержано дисертантом особисто. Дисертант безпосередньо розробив технологічні методи створення зразків, модернізував іонно-плазмовий реактор і плазмові джерела. Здобувач брав активну участь в аналізі та

теоретичній інтерпретації одержаних результатів, формуванні висновків і написанні статей.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися й обговорювалися на 12 конференціях: 4-та Міжнародна наукова конференція «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур», 6–8 жовтня 2010 р., Харків, Україна; 6 и 8 Международные научно-технические конференции «Vacuum equipment materials and technology» (13–15 апреля 2011 г. и 16–18 апреля 2013 г.), Москва, РФ; «Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу», 24–25 вересня 2013 р., Київ, Україна; IV International Scientific Conference «Nanoscale Systems: structure, properties, technology» NANSYS-2013, 19–22 November 2013, Kiev, Ukraine; XXI Щорічна наукова конференція ІЯД НАН України, 27–31 січня 2014 р., Київ, Україна; X International Conference «Electronics and Applied Physics», 22–25 October 2014, Kyiv, Ukraine; Ukrainian–German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology, 21–25 September 2015, Kiev, Ukraine; International research and practice conference «Nanotechnology and Nanomaterials NANO-2015», 26–29 August 2015, Lviv, Ukraine; The 14th International Conference on Functional and Nanostructured Materials FNMA'17 & The 7th International Conference on Physics of Disordered Systems PDS'17, 25–29 September 2017, Ivano-Frankivsk, Ukraine; IEEE 8th International Conference on «Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018)», 9–14 September 2018, Zatoka, Odesa region; FMIE-2019 «Functional Materials for Innovative Energy», 13–15 May 2019, Kyiv, Ukraine; XIth International Scientific and Practical Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT), 16–18 September 2019, Lviv, Ukraine.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 26 наукових праць, серед яких 13 статей у вітчизняних та закордонних наукових фахових журналах, 1 розділ у колективній монографії та 12 праць і тез конференцій.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертація складається з анотації, вступу, оглядового розділу, трьох оригінальних розділів і загальних висновків. Робота викладена на 202 сторінках і містить 16 таблиці, 96 рисунки і список літератури вітчизняних і закордонних авторів зі 158 найменувань.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ**

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, висвітлено її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і основні завдання дослідження, об'єкт і предмет дослідження, показано наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, описано структуру і об'єм дисертації.

**Розділ 1** присвячено огляду наукових праць з іонно-плазмових методів у технології отримання тонких плівок. Розглянуто магнетронний метод, плазмово-дуговий метод та розвиток катодно-дугових джерел, метод хімічного осадження з газової фази активованої високочастотною плазмою (PECVD), показана перспективність геліконного джерела плазми для отримання наноструктурованих плівок для потреб мікро- і наноелектроніки.

У **розділі 2** розглянуто будову та фізичні принципи роботи гібридного геліконно-дугового іонно-плазмового реактора (ГГДПР) (рис. 1). Розрядна

плазмова камера ГГДПР складається з трьох технологічних модулів: розрядної камери геліконного джерела, дрейфової камери, камери оброблення. Описано методи досліджень. Представлено результати дослідження характеристик розробленого геліконного джерела плазми та плазово-дугового пришвидшувача. Зокрема, представлено дослідження впливу магнітного поля на виникнення геліконного розряду та просторовий розподіл поглинання ВЧ-потужності. Показано, що за відсутності магнітного поля введення ВЧ-потужності у плазму відбувається поблизу антени у тонкому поверхневому шарі (скін-шарі) товщиною 1–1,5 см, а з накладенням магнітного поля ВЧ-потужність поглинається в об'ємі плазми через збудження геліконних хвиль та поширення їх углиб плазми (рис. 2). Вивчено залежність опору навантаження плазми від її густини за різних значень тиску робочого газу та магнітних полів. Обговорено 2 режими роботи геліконного джерела — відомий режим об'ємного розряду та виявлений новий режим «плазмова колона» (рис. 3). Густина плазми в режимі «плазмова колона» в технологічній зоні в 2,5 рази перевищує густину плазми об'ємного розряду.

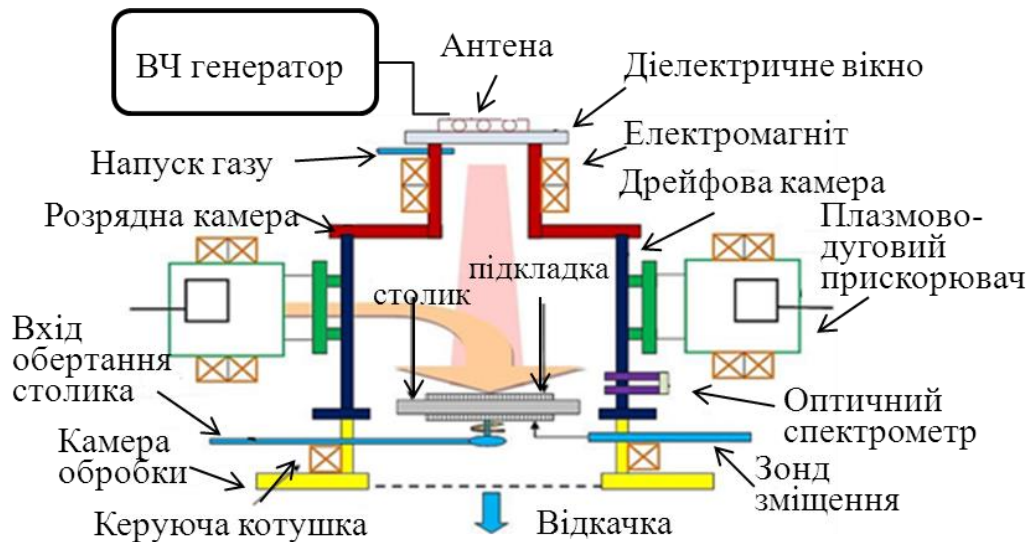


Рис. 1 Схема гібридного геліконно-дугового іонно-плазового реактора.

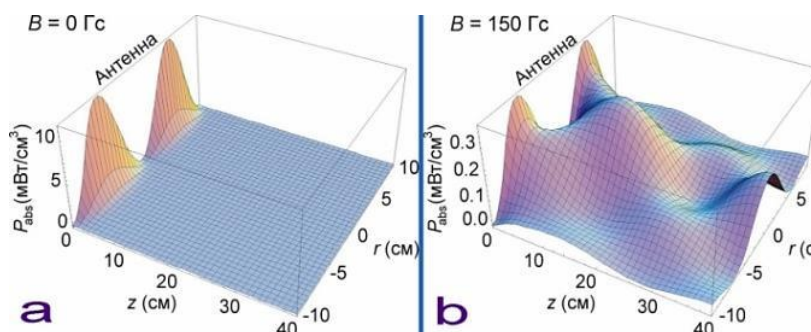


Рис. 2 Профілі поглинання ВЧ потужності в об'ємі плазми без магнітного поля (ICP-розряд) (а) і при магнітному полі 150 Гс (геліконний розряд) (б) при тиску аргону 50 мТорр.

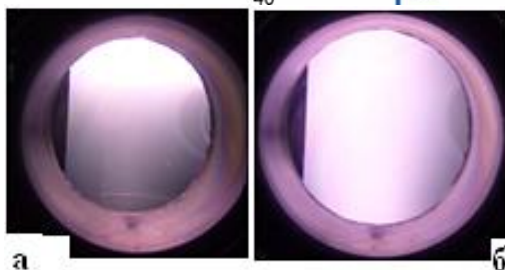


Рис. 3 Об'ємний геліконний розряд (а) і новий геліконний розряд «плазмова колона» (б).

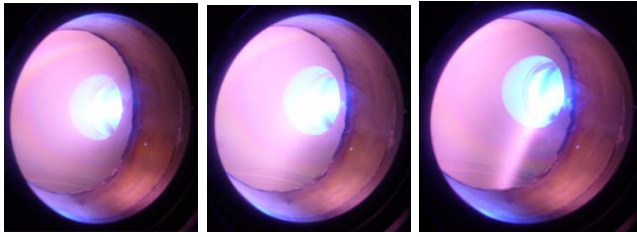


Рис. 4 Керування плазмовим потоком плазмово-дугового прискорювача (ПДП).

Без повороту    Поворот  $70^\circ$     Поворот  $90^\circ$

Виявлено ефекти керування в просторі плазмовим потоком плазмово-дугового прискорювача (ПДП) (рис. 4). При цьому відбувається ефективна сепарація від мікрокрапельної фази, що дозволяє отримувати високоякісні плівки. ПДП дозволяє одержувати багатокомпонентні плівки потрібного складу.

У розділі 3 представлено результати створення та вивчення фізичних властивостей гібридних наноструктур, що містять вуглець, які можуть стати основою нового типу електроніки — вуглецевої мікро- і наноелектроніки. Для цього, на перших етапах, необхідно створити *просторово* регульоване середовище, яке б задавало початкову *просторову* структуру (архітектуру) базових наноструктур. Для цього був використаний потужний технологічний інструмент: вакуумно-технологічний комплекс на основі ГГДПР. Роботи були спрямовані на синтез гібридних гетеросистем TiN/Fe/C на підкладках монокристалічного кремнію (Si), в яких наноструктурований вуглець (C) в режимі PECVD синтезований на каталітичних центрах — кластерах заліза (Fe). Початковий рельєф базової структурованої поверхні створювався обробкою поверхні монокристалічного Si і формуванням буферного прошарку TiN у геліконній плазмі надвисокої густини ( $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) у різних технологічних режимах.

На рис. 5 представлено дані СТМ поверхні TiN із впорядкованою регулярною структурою із кроком  $\approx 12 \text{ нм}$  і висотою  $\approx 5 \text{ нм}$ . На верхівках («горбах») структурованої поверхні були сформовані кластери Fe, які використані як каталітичні центри для формування вуглецевих наноструктур.

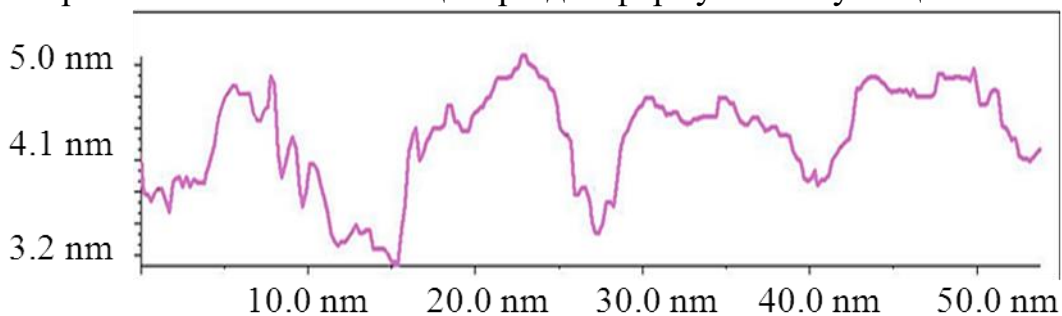


Рис. 5 Наноструктура поверхні TiN на Si–Si/TiN (дані СТМ).

Магнітні властивості гетероструктур TiN/Fe на Si (3.4) досліджені на сквід-магнетометрі MPMS-XL5. На (рис. 6) представлені результати вимірів температурної залежності магнітного моменту  $m$  плівкових гетероструктур TiN/Fe в інтервалі температур від 5 до 300 К для орієнтацій магнітного поля уздовж  $H_{\parallel}$  і перпендикулярно  $H_{\perp}$  площині підкладки при двох їх значеннях



$H_1 = 100$  Е і  $H_2 = 1$  кЕ в режимі ZFC (охолодження в нульовому полі до  $T = 5$  К) і FC (охолодження в полі). З рис. 6 видно, що зразок має досить сильну магнітну анізотропію, а також демонструє релаксаційні явища, пов'язані з блокуванням магнітного моменту наночастинки при температурі  $T_B = 42,2$  К. При цьому магнітна анізотропія слабо впливає на температуру блокування  $T_B$ . Подібна поведінка магнітного моменту характерна для суперпарамагнетизму, який може проявлятися в однодоменних частинках [2]. За розрахунками розмір частинки, при якому їй енергетично не вигідно створювати багатодоменну структуру, для класичних феромагнетиків Fe, Ni, Co становить  $\approx 10$  нм [3].

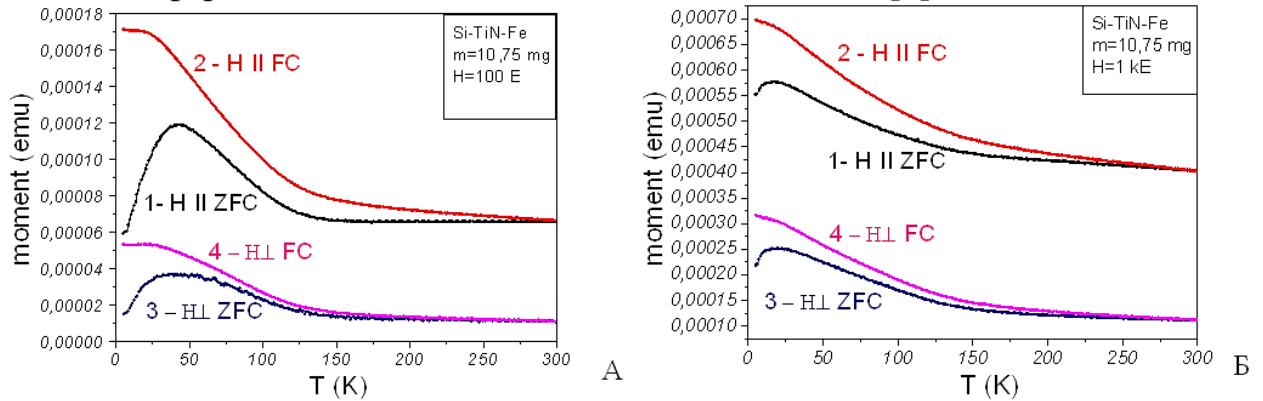


Рис. 6 Температурні залежності магнітного моменту  $m$  гетероструктури TiN/Fe. Магнітне поле ( $H_1 = 100$  Е (А) і  $H_2 = 1$  кЕ (Б)) – паралельне  $H_{||}$  (криві 1 і 2) і перпендикулярне  $H_{\perp}$  (криві 3 і 4) площині кремнієвої підкладки.

За законом Кюрі–Вейсса і законом наближення до насичення за експериментальними даними були розраховані параметри магнітних нанокластерів Fe сферичної форми (табл. 1).

Таблиця 1. Параметри магнітних монодоменних нанокластерів Fe, визначені за експериментальними температурними і польовими залежностями магнітного моменту гетероструктури TiN/Fe.

$H$ , кЕ	$H_{  }$ площині плівки				$H_{\perp}$ площині плівки			
	$C$ , $10^{-4} \cdot \text{емо} \cdot \text{К}$	$\theta_i$ , К	$M_{cl.}$ , $10^{-16} \cdot \text{емо}$	$R_{cl.}$ , Å	$C$ , $10^{-4} \cdot \text{емо} \cdot \text{К}$	$\theta_i$ , К	$M_{cl.}$ , $10^{-16} \cdot \text{емо}$	$R_{cl.}$ , Å
0,1	7,5	-840	1,2	25	0,6	-254	0,1	11,1
1	4,9	-924	0,76	21,8	0,8	-418	0,13	12,2

На кривій оберненої магнітної сприйнятливості (рис. 6) спостерігається злам при температурі  $T \approx 150$  К, що може бути пов'язано зі структурними змінами плівки і виникненням суперпарамагнетизму. Із табл. 1 видно, що мають місце магнітострикційні явища в кластерах Fe, оскільки зі збільшенням магнітного поля істотно змінюється парамагнітна температура  $\theta_i$  і константа Кюрі  $C_i$ , особливо коли поле перпендикулярне площині плівки. Особливо зазначимо близькість розрахованих значень розмірів нанокластерів  $R_{cl}$  (табл. 1) з розмірами наноструктури TiN на підкладці Si, отриманими у СТМ (рис. 5).

Використовуючи експериментальні дані для коерцитивної сили  $H_{C||}$  і

температури блокування  $T_B$ , були проаналізовані анізотропні властивості магнітних частинок Fe. Зокрема, при температурі  $T$  поле коерцитивності виражається через температуру блокування  $T_B$ :

$$H_{coerr}(T) = H_{coerr}(0) \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_B}} \right) k, \quad (1)$$

де  $H_{coerr}(0) = 2K/m$  — коерцитивна сила за нульової температури, коефіцієнт  $k = 0,5$  враховує хаотичний розподіл магнітних моментів для нерівноважної намагніченості. Підставляючи в (1)  $H_{coerr}(T) = H_{C\parallel}$ , при  $T = 5$  К для  $T_B = 42,2$  К одержуємо величину константи анізотропії магнітних кластерів Fe  $K_{cl} = 1,1 \cdot 10^6$  ерг/см<sup>3</sup>, яка істотно більша константи анізотропії для монокристалічного заліза  $K_{Fe} = 4,6 \cdot 10^5$  ерг/см<sup>3</sup>. Така властивість характерна для нанокристалічного стану, коли зі зменшенням розміру магнітного кластера відношення поверхні до об'єму зростає, що, у свою чергу, приводить до росту анізотропії наночастинки [4].

Зазначимо, що електронні пристрої, створені на основі цього суперпарамагнітного матеріалу, зможуть працювати лише за температур нижче 150 К, оскільки при вищих температурах магнітний момент під дією теплових флуктуацій випадково і спонтанно змінює свій напрямок. Ця властивість має назву *суперпарамагнітної межі*.

Структури TiN/Fe/C були створені синтезом вуглецевих наноструктур на нанокластерах заліза PECVD-методом осадження C з газової фази в ГГДПР в єдиному вакуумному циклі. На рис. 7 представлені температурні залежності магнітного моменту  $m$  гетероструктури TiN/Fe/C, які демонструють сильну анізотропію і паулівський характер поведінки магнітного моменту. На залежностях не спостерігаються особливості, які пов'язані із наявністю суперпарамагнітної межі. Також спостерігаємо підвищення температури блокування  $T_B$  до  $\approx 180$ –270 К для  $H = 100$  Е і до  $\approx 90$ –120 К для  $H = 1$  кЕ.

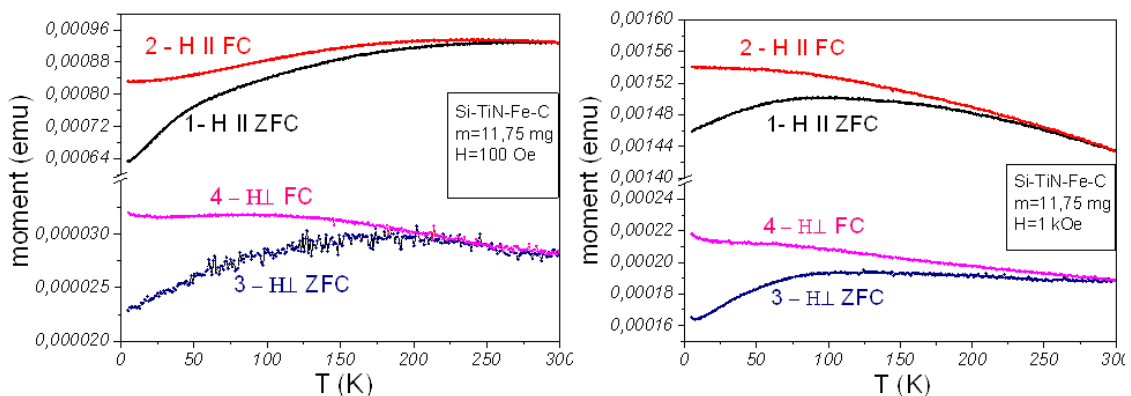


Рис. 7 Температурні залежності магнітного моменту  $m$  гетероструктури TiN/Fe/C. Магнітне поле ( $H = 100$  Е (А) і  $H = 1$  кЕ (Б)) — паралельне (криві 1 і 2) і перпендикулярне (криві 3 і 4) площині кремнієвої підкладки.

Було проведено оцінку внеску вуглецевих наноструктур у величину магнітної сприйнятливості. На рис. 8 представлені температурні залежності рівноважних (FC) магнітних сприйнятливостей для гетероструктур TiN/Fe/C (криві 1 і 2) і TiN/Fe (криві 3 і 4) у магнітних полях  $H_{\parallel} = 0,1$  і 1 кЕ в площині

плівки (крапки — експеримент, лінії — сплайн-інтерполяція). З рис. 8 видно, що зі збільшенням величини магнітного поля магнітна сприйнятливості всіх зразків істотно зменшується. При цьому внесок наноструктурованого вуглецю у величину магнітної сприйнятливості структури є визначальним.

Густина електронних станів окремих вуглецевих нанотрубок на рівні Фермі низька, тому спінова магнітна сприйнятливості вуглецевих наноструктур повинна бути низькою  $\sim 10^{-8}$  емо/г. У нашому випадку різниця мас плівок TiN/Fe і TiN/Fe/C  $\approx 10^{-3}$  г, тобто масова магнітна сприйнятливості для розглянутої системи наноструктур буде порядку  $10^{-3}$  емо/г, що на 5 порядків вище, ніж для звичайних вуглецевих нанотрубок. Можна припустити, що проходить колективізація електронів кластерів заліза із електронами вуглецевих наноструктур. Колективізовані електрони заліза взаємодіють з вуглецевою підсистемою, істотно збільшуючи густину електронних станів на рівні Фермі, що приводить до значного зростання магнітної сприйнятливості гетероструктури TiN/Fe/C у порівнянні з величиною сприйнятливості для TiN/Fe (без вуглецю). Отримані результати підтверджують можливість істотного збільшення коефіцієнта анізотропії заліза в наноструктурованому стані для збільшення щільності магнітного запису. Використання вуглецевих наноструктур дозволяє наблизитися до вирішення проблеми подолання суперпарамагнітної межі.

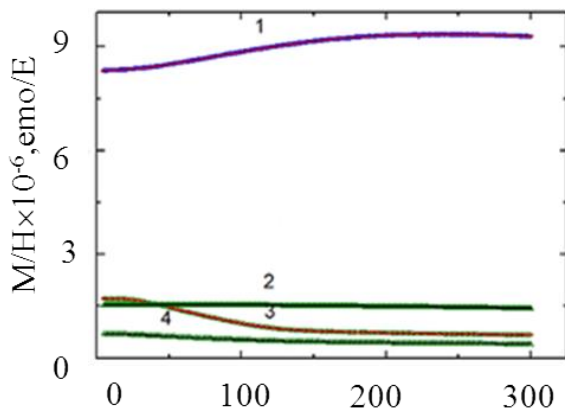


Рис. 8 Температурні залежності рівноважних (FC) магнітних сприйнятливостей для гетероструктур TiN/Fe/C (криві 1 і 2) і TiN/Fe (криві 3 і 4) в магнітних полях  $H = 0,1$  (криві 1 і 3) і  $1$  кЕ (криві 2 і 4).

Як показав наш експеримент, зміщення суперпарамагнітної межі до більш високих температур можна досягти при синтезі на острівцях заліза вуглецевих наноструктур, що було здійснено PECVD-методом осадженням вуглецю з газової фази в ГГДПР в єдиному вакуумному циклі.

У підрозділі 3.4 наведено результати дослідження ВАХ наноструктур TiN/Fe/C. Виявлено, що в залежності від режиму отримання зразків, форма кривих на ВАХ може бути як лінійною (омічною), так і іншого виду. Якщо на фінальній стадії отримання наноструктури TiN/Fe/C, після завершення процесу PECVD, зразок оброблявся в плазмі геліконного розряду в режимі «Плазмова колона», його ВАХ при кімнатних температурах демонстрували виникнення при різних напругах (в діапазоні кількох мілівольт) станів з диференціальним опором близьким до нуля (рис. 9). Важливою особливістю цих стани є те, що можуть спостерігатися ВАХ приблизно з нульовим диференціальним опором при напрузі зміщення  $V = 0$ . В цьому стані отримуємо «гігантську» провідність

зразка, яка приблизно на два порядки більша, ніж у міді. Струм при цьому міг досягати 100 мА, а його густина —  $1,3 \cdot 10^4$  А/см<sup>2</sup>.

Виникнення гігантської провідності може бути інтерпретоване в рамках тунельної моделі [5]. Для системи двох бар'єрів, між якими знаходиться провідний проміжок шириною  $d$ , амплітуда ймовірності проходження через проміжок  $s = \exp(ikd)$  (тут  $k$  — хвильове число електрона) [6]. Якщо структура неоднорідна і в різних ділянках двобар'єрного переходу товщина  $d$  змінюється в широких межах, так що добуток  $kd$  змінюється від нуля до  $\pi$ , то одержимо ймовірність проходження двобар'єрного переходу як функцію  $kd$ . Моделювання показує, що в більшості випадків ймовірність проходження мала, але є такі добутки  $kd$  (тобто є такі ділянки), де ймовірність проходження через два бар'єри стає рівною чи близькою до одиниці. Це і є резонансне тунелювання.

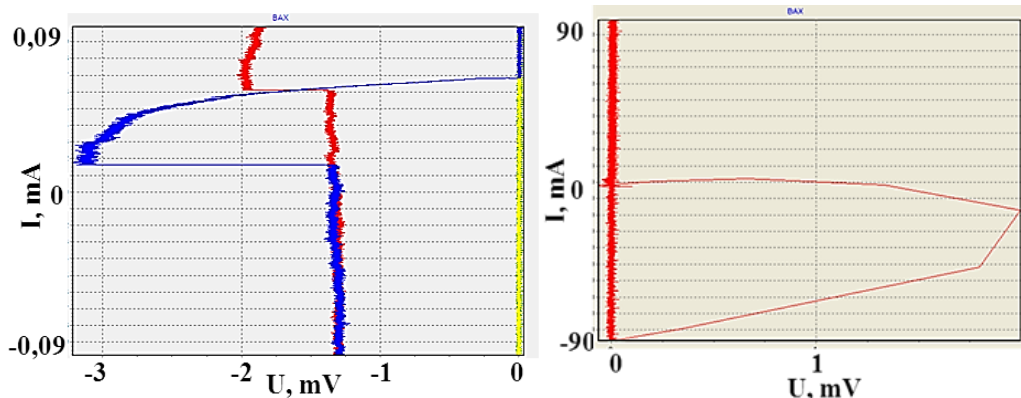


Рис. 9 Стани з нульовим диференціальним опором на ВАХ наноструктур TiN/Fe/C за кімнатної температури.

Звичайно, ділянки, де реалізується резонансне тунелювання, займають дуже малу площу двобар'єрної структури, але весь струм йде фактично через них. Шляхи через приблизно однакові бар'єри, розділені приблизно однаковими проміжками, названі квантовими резонансно-перколяційними траєкторіями [7]. Якщо квантові резонансно-перколяційні траєкторії безперервні, то на ВАХ структури спостерігається стан з гігантською провідністю. Коли ці траєкторії перериваються, на ВАХ структур спостерігаються так звані ефекти електронної нестійкості, що приводять до перемикання структури під дією двополярної струмової розгортки між високоомним і низькоомним станами. На рис. 10 показані такі ефекти перемикання на ВАХ експериментальної структури TiN/Fe/C при кімнатній температурі між високоомним ( $1,3 \cdot 10^{-2}$  Ом) і низькоомним ( $3 \cdot 10^{-4}$  Ом) станами.

Повторні струмові інжекції призвели до зменшення величини гістерезису і росту провідності, що призвело до формування в структурі стану з гігантською провідністю ( $R < 10^{-5}$  Ом при кімнатній температурі) і відсутністю гістерезису (жовта ВАХ). Тобто проведені дослідження вказують як на можливість реалізації наднизьких значень опору для вуглецевих наноструктур, так і можливість реалізації мемристорної поведінки ВАХ.

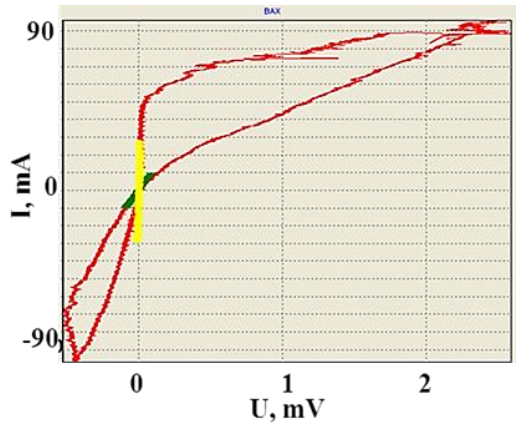


Рис. 10 ВАХ наноструктур TiN/Fe/C при кімнатній температурі, які демонструють мемристорний ефект із переключенням між високоомним ( $1,3 \cdot 10^{-2}$  Ом) і низькоомним ( $3 \cdot 10^{-4}$  Ом) станами.

**Розділ 4** присвячено створенню у ГГДПР і дослідженню мультиспектральних фільтрів (МСФ) на основі композицій іонно-плазмових конденсатів AlN на гнучких термолабільних полімерних плівкових підкладках. Такі МСФ необхідні для надчутливих кріогенних приймальних систем новітніх систем передачі інформації, телекомунікацій, нової генерації систем навігації і позиціонування (зокрема, Very Long Baseline Interferometry [8]). В цих приймальних системах для збереження і покращання інформативності корисного сигналу мікрохвильового діапазону необхідне суттєве придушення мультиспектральних завад, зокрема захист високочутливих низькотемпературних детекторів (робоча температура 10–15 K) від зовнішнього теплового (ІЧ) випромінювання, термоударів і фонового вторинного випромінювання вхідних вікон кріостатів («тепла» частина перебуває при температурі докілька  $\approx 300$  K). Для цього сьогодні, як ІЧ фільтри, використовуються фторопластові плівки (товщина 40–150 мкм), що мають низьку теплопровідність. В процесі роботи ці фторопластові плівки нагріваються і стають джерелом вторинного теплового випромінювання на детектори, що не дозволяє ефективно знизити теплові шуми кріогенних приймачів. Ця проблема вирішена нами шляхом створення на термолабільних (з низькою температурою плавлення) полімерних підкладках із фторопласту і майлару селективних діелектричних покриттів з високою теплопровідністю. Для цього покриття був вибраний нітрид алюмінію (AlN), що, по-перше, має високу теплопровідність (майже на рівні металів), низькі діелектричні втрати, високий рівень ізолюючих характеристик. По-друге, монокристалічний AlN має смугу залишкових променів (Reststrahlen bands) в ІЧ-діапазоні, в якій ІЧ-випромінювання ефективно відбивається [8].

У розділі описано методику синтезу плівок AlN на гнучких термолабільних полімерних плівкових підкладках із фторопласту і майлару та монокристалічного кремнію, наведено результати вивчення морфології поверхні, рентгенівських досліджень, спектральні характеристики в ІЧ-діапазоні (2–25 мкм). Морфологія поверхні плівкових іонно-плазмових конденсатів AlN вивчалася методами АСМ. На поверхні всіх зразків AlN на плівкових підкладках із фторопласту і майлару було виявлено наявність двох рельєфів — мікрорельєфу і нанорельєфу на мікрорельєфі (рис. 11).



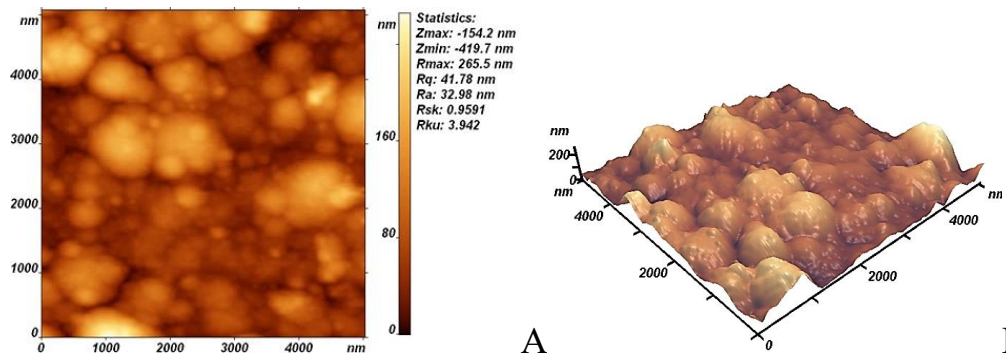


Рис. 11 АСМ-зображення поверхні плівкової структури Al на майларі (А), синтезованої при тиску робочого газу  $10^{-2}$  Торр та її тривимірне зображення (Б).

Розміри мікро- і нанорельєфів залежать від технологічних параметрів. Зокрема, при тиску робочого газу  $\sim 10^{-2}$  мм. рт. ст. формується щільна структура з розкидом розмірів зерен до 1,5 мкм і невеликими локальними переходами по висоті до 50 нм між зернами. Ця структура покрита однорідним нанорельєфом із зернами правильної сферичної форми розмірами 150–200 нм і висотою 30–40 нм. При збільшенні часу синтезу AlN збільшуються розміри як мікрорельєфу, так і нанорельєфу, що призводить до збільшення товщини та покращення однорідності структури сформованої плівки.

ІЧ-характеристики структур AlN на гнучких полімерних плівкових підкладках із фторопласту і майлару та на монокристалічному Si отримані на Фур'є-спектрометрі FTIR Spectrum BX-II. На ІЧ-спектрах відбивання для плівок AlN на підкладках із фторопласту і майлару та на монокристалічному Si виявлено *смугу залишкових променів* (рис. 12, криві 3 (зразок AlN на майларі) і 4 (AlN на Si)), що характерно для монокристалічного AlN. Смуга залишкових променів розширена ( $\approx 10,6$ –20 мкм) у порівнянні з монокристалічним AlN і проявляється для зразків із плівок AlN товщиною 8 мкм. Довгохвильовий край смуги залишкових променів зсувається у більш довгохвильову область через вплив підкладок на спектри відбиття. Крім того, на цей зсув може суттєво вплинути залишковий кисень, який утворює оксиди алюмінію, на що вказують рентгеноструктурні дослідження.

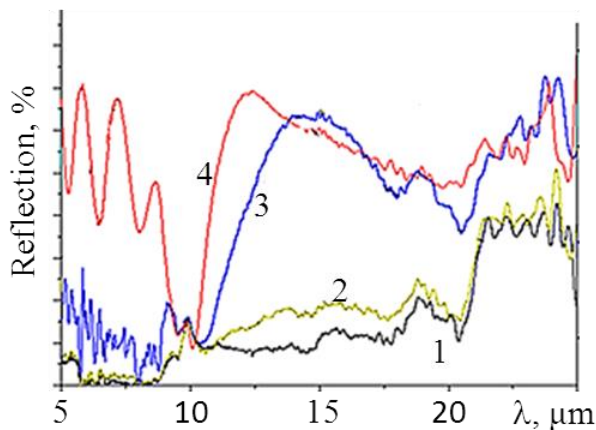


Рис. 12 Спектральні характеристики ІЧ відбивання майларової підкладки (крива 1), майларової плівки з AlN різної товщини ( $d \approx 2$  мкм — крива 2,  $d \approx 8$  мкм — крива 3) та структури AlN/Si з товщиною шару AlN  $d \approx 6,6$  мкм.

На рис. 13 представлені порівняльні спектри пропускання підкладок майлар ( $d \approx 40$  мкм), тефлон ( $d \approx 220$  мкм) і плівкових структур AlN на цих підкладках.

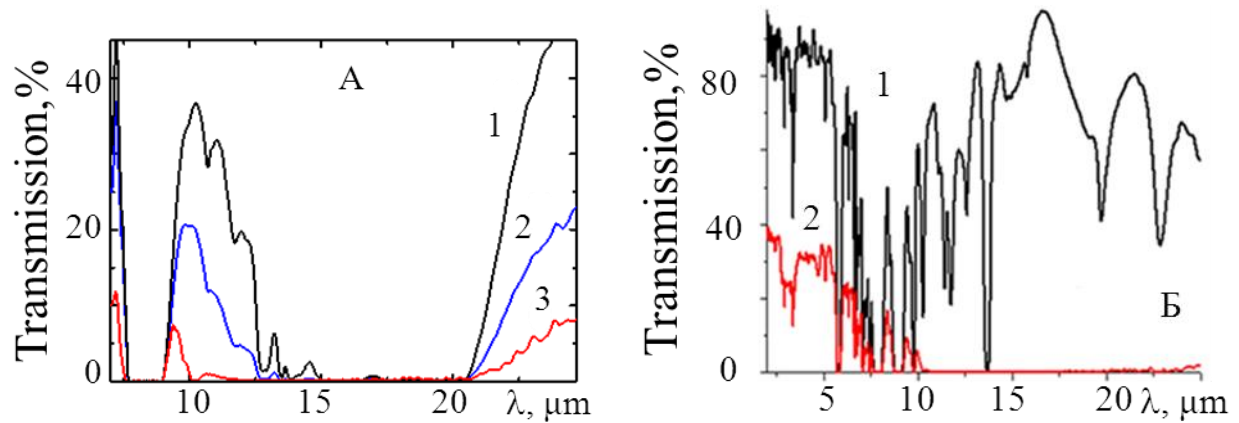


Рис. 13 Спектральні характеристики ІЧ-пропускання для майларової підкладинки товщиною  $d \approx 40$  мкм (1) і композиційних структур AlN/майлар з товщиною AlN 3 мкм (2) і 8 мкм (3) (рис. 13, А) та для тefлонової підкладинки ( $d \approx 220$  мкм) (1) і структур AlN/тефлон (AlN  $d \approx 15$  мкм) (2) (рис. 13, Б).

Як видно з рис. 13, з ростом товщини плівки AlN пропускання структур зменшується. Зауважимо, що у діапазоні (10–25 мкм) плівка AlN товщиною 15 мкм на тefлоні повністю блокує ІЧ-випромінювання.

Мікрохвильові дослідження створених МСФ на структурах AlN на гнучких полімерних плівках в діапазоні 2,2–34 ГГц (робочий діапазон системи VLBI) показали відсутність втрат сигналу, що підтверджує ефективність їх використання у високочутливих кріогенних приймальних системах. Отримані структури ефективно блокують шкідливе ІЧ випромінювання (в тому числі вторинне теплове випромінювання вхідних вікон кріостатів) і прозорі для інформативного мікрохвильового сигналу.

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено наукову проблему створення в геліконно-дугових іонно-плазмових процесах гібридних гетеросистем TiN/Fe, TiN/Fe/C та AlN, з'ясовано особливості їхніх електронних, магнітних й оптичних властивостей і мікроструктури, встановлено закономірності та зв'язок між їхніми фізичними властивостями та мікро- і наноструктурою.

У результаті виконання дисертаційної роботи при використанні ГГДПР отримано наступні основні наукові результати:

1. Вперше виявлено явище високоенергетичного режиму геліконного розряду «Плазмова колона», при якому плазма високої густини розповсюджується із розрядної камери в технологічну зону (камеру обробки), де досягнуто значення густини плазми  $\sim 10^{12}$  см $^{-3}$ , що на 2–3 порядки вище, ніж у відомих джерел плазми, а густина іонного струму в  $\approx 2,5$  рази вища, ніж для відомого об'ємного геліконного розряду.

2. Вперше отримано регулярну структуру нанорельєфу розміром 2–10 нм на плівці нітриду титану (TiN) на монокристалічному кремнію, на якій синтезовані магнітні монодомени нанокластери заліза (Fe).

3. Вперше виявлено суперпарамагнітний ефект в наноструктурах TiN/Fe з температурою блокування  $T_B = 42,2$  К і температурою суперпарамагнітної межі

$\approx 150$  К.

4. Вперше встановлено, що наноструктурований вуглець, синтезований на нанокластерах заліза (наноструктура TiN/Fe/C), в декілька разів підвищує величину магнітної сприйнятливості порівняно із зразком без вуглецю (наноструктура TiN/Fe), суттєво підвищує суперпарамагнітну температуру блокування  $T_B$  до  $\approx 180$ – $270$  К для  $H = 100$  Е і до  $\approx 90$ – $120$  К для  $H = 1$  кЕ та підвищує до кімнатних температур температуру суперпарамагнітної межі.

5. Вперше виявлено, що при кімнатних температурах ВАХ гетероструктур TiN/Fe/C демонструють виникнення станів з нульовим диференціальним опором і гігантською провідністю, що може бути обумовленим тунельним резонансно-перколяційним транспортом у наноструктурованому С.

6. Вперше виявлено ефекти перемикання мемристорного типу у гетероструктурі TiN/Fe/C між високоомним ( $1,3 \times 10^{-2}$  Ом) і низькоомним ( $3 \times 10^{-4}$  Ом) станами.

7. Вперше синтезовані наноструктуровані плівки AlN на гнучких термолабільних полімерних підкладках тефлон і майлар.

8. Встановлено, що поверхня отриманих плівок AlN характеризується наявністю двох рельєфів: мікрорельєфу і нанорельєфу. Структура рельєфів залежить від робочих параметрів – тиску і часу нанесення.

9. В наноструктурованих плівках AlN, синтезованих на полімерних підкладках з тефлону та майлару, вперше виявлено смугу залишкових променів (діапазон  $\lambda \approx 10$ – $20$  мкм), що приводить до ефективного блокування ІЧ-випромінювання.

Одержані фундаментальні наукові результати мають важливе практичне значення.

На основі геліконно-дугових джерел плазмових потоків високої густини розроблено фізичні засади формування іонно-плазмових конденсатів для створення функціональних гібридних гетеросистем TiN/Fe, TiN/Fe/C та AlN.

Результати дослідження магнітних і релаксаційних явищ у наноструктурованих гетероструктурах TiN/Fe вказують на можливість суттєвого збільшення щільності магнітного запису за рахунок істотного зростання коефіцієнта анізотропії заліза в наноструктурованому стані. Синтез на поверхні наноструктурованого заліза вуглецевих наноструктур (TiN/Fe/C) дозволяє наблизитися до вирішення проблеми подолання суперпарамагнітної межі.

Виявлена асиметрична гістерезисна поведінка ВАХ гетероструктур TiN/Fe/C дозволяє реалізувати на їх основі нові пристрої для запису даних – мемристори.

Створені мультиспектральні ІЧ-фільтри на основі іонно-плазмових конденсатів AlN на гнучких полімерних підкладках з майлару та тефлону потрібні для надчутливих кріогенних приймальних систем новітніх систем передачі інформації, телекомунікацій, нової генерації систем навігації і позиціонування.



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Sizov F., Tsybrii Z., Vuichyk M., Svezhentsova K., Rudenko E., Korotash I., Polotskiy D. Functional Selective Nanostructured Coatings Synthesized by Low-Temperature Ion-Plasma Method on Polymeric Substrates // Chapter in: «Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings». Editors A. D. Pogrebnjak, V. Novosad. Springer. Singapore. – 2019. – P. 235–247.
2. Rudenko E., Tsybrii Z., Sizov F., Korotash I., Polotskiy D., Skoryk M., Vuichyk M., Svezhentsova K. Infrared blocking, microwave and terahertz low-loss transmission AlN films grown on flexible polymeric substrates // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121, No. 13. – P. 135304.
3. Руденко Э.М., Белоголовский М.А., Короташи И.В., Полоцкий Д.Ю., Краковный А.А., Житлухина Е.С. Мемристорные эффекты в твёрдотельных гетероструктурах // Металлофизика и новейшие технологии. – 2016. – Т. 38, № 8. – с. 995–1008.
4. Руденко Э.М., Зубов Э.Е., Белоголовский М.А., Короташи И.В., Шаповалов А.П., Полоцкий Д.Ю., Бондаренко С.И., Савина Ю.А. Магнитные и релаксационные явления в плёночных гетероструктурах Si–TiN–Fe с углеродными нанотрубками // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – Т. 37, № 10. – с. 1369–1376.
5. Rudenko E.M., Korotash I.V., Polotsky D.Yu., Osipov L.S., Prichna T.A., Shapovalov A.P. Formation of TiN Nanostructured Relief Heterostructures in hybrid Helicon-Arc Plasma Reactor // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – Т. 37, № 4. – с. 499–508.
6. Руденко Е.М., Короташи И.В., Шаповалов А.П., Цибрий З.Ф., Білоголовський М.О., Полоцький Д.Ю., Шлапак Ю.В., Чміль В.М., Глушеченко Е.М., Чміль В.В., Пилипенко А.М., Сизов Ф.Ф. Теплофізичні та спектральні характеристики квазіоптичних фільтруючих пристроїв для кріоелектронних приймальних систем // Доповіді НАН України. – 2015. – № 12. – с. 49–56.
7. Shapovalov A.P., Korotash I.V., Rudenko E.M., Sizov F.F., Dubyna D.S., Osipov L.S., Polotskiy D. Yu., Tsybrii Z.F., Korchovyi A.A. Structure and optical properties of AlN films obtained using the cathodic arc plasma deposition technique // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2015. – Vol. 18, No. 2. – с. 117–122.
8. Осипов Л.С., Полоцкий Д.Ю., Беспалов С.А., Сницар М.С., Невмержицкий В.И. Ионно-плазменное нанесение наноструктурированных многокомпонентных покрытий на термолабильные материалы // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2014. – Т. 12, № 1. – с. 73–80.
9. Semenyuk V.F., Virko V.F., Korotash I.V., Osipov L.S., Polotsky D.Yu., Rudenko E.M., Slobodyan V.M., Shamrai K.P. Controlling Parameters Determining Technological Properties of a Helicon Discharge System // Problems of Atomic Science and Technology, Series «Plasma Electronics and New Methods of Acceleration». – 2013. – No. 4 (86). – p. 179–182.
10. Семенюк В.Ф., Руденко Э.М., Короташи И.В., Осипов Л.С., Полоцкий Д.Ю., Шамрай К.П., Одинокое В.В., Павлов Г.Я., Сологуб В.А.. Унифицированное технологическое ионно-плазменное оборудование

формирования наноструктур // Металлофизика и новейшие технологии. – 2011. – Т. 33, № 2. – с. 223–231.

11. Колесник О., Одинок В., Павлов Г., Полоцкий Д., Руденко Э., Семенюк В., Сологуб В. Наноструктурированные многокомпонентные покрытия на термолабильных материалах // Наноиндустрия. – 2012. – № 31. – с. 28–30.

12. Коротащ И.В., Одинок В.В., Павлов Г.Я., Полоцкий Д.Ю., Руденко Е.М., Семенюк В.Ф., Сологуб В.А., Шамрай К.П. Плазменно-стимулированное формирование ориентированных углеродных наноструктур в едином технологическом цикле // Наноинженерия. – 2012. – № 4. – с. 3–8.

13. Коротащ И., Одинок В., Павлов Г., Полоцкий Д., Руденко Е., Семенюк В., Сологуб В. Формирование углеродных наноструктур в едином технологическом цикле // Наноиндустрия. – 2011. – № 1. – с. 10–14.

14. Коротащ И., Одинок В., Павлов Г., Полоцкий Д., Руденко Е., Семенюк В., Сологуб В. Установка для формирования наноструктур // Наноиндустрия. – 2010. – № 4. – с. 14–18.

### **Праці апробаційного характеру**

15. Rudenko E., Korotash I., Krakovny A., Polotskiy D., Belogolovskii M., Perepelytsia V. Ultra-Low Resistance in Carbon Nanostructures // Proc. XI International Scientific and Practical Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT-2019). September 16–18, 2019. – Abstracts. – Lviv, Ukraine. – p. 257–260.

16. Руденко Е.М., Коротащ І.В., Полоцький Д.Ю., Краковний А.О. Гістерезисні ефекти в провідності вуглецевих наноструктурованих систем // Міжнародна конференція «Функціональні матеріали для інноваційної енергетики — ФМІЕ–2019». 13–15 травня 2019 р. Збірка тез конференції. – м. Київ, Україна. – с. 55.

17. Tsybrii Z., Vuichyk M., Svezhentsova K., Sizov F., Korotash I., Rudenko E., Polotskiy D. Nanostructured Functional Film Coatings Formed by Helicon-Arc Ion-Plasma Method on the Polymeric Substrates // Proceeding of the 2018 IEEE 8th International Conference on «Nanomaterials: Applications & Properties» (NAP–2018). September 9–14, 2018, Zatoka, Odesa Region, Ukraine, Part. 3. – p. 179–182

18. Слободян В.М., Вірко В.Ф., Шамрай К.П., Коротащ І.В., Осипов Л.С., Полоцький Д.Ю., Руденко Е.М., Семенюк В.Ф. Властивості розряду в метані та в його сумішах з воднем у плазмовому джерелі геліконного типу з планарною антеною // XXI Щорічна наукова конференція ІЯД НАН України. 27–31 січня 2014 р. – Збірка тез конференції. – Київ, Україна. – с. 167.

19. Слободян В.М., Романюк Л.І., Вірко В.Ф., Шамрай К.П., Коротащ І.В., Осипов Л.С., Полоцький Д.Ю., Руденко Е.М., Семенюк В.Ф. Керування параметрами геліконного джерела з планарною антеною потенціалами зміщення металевих електродів // «Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу». 24–25 вересня 2013 р. – Збірка тез конференції. – Київ, Україна. – с. 50.

20. Слободян В.М., Вірко В.Ф., Шамрай К.П., Коротащ І.В., Осипов Л.С., Полоцький Д.Ю., Руденко Е.М., Семенюк В.Ф. Характеристики геліконного

розряду у вуглеводневих газах та їх сумішах з воднем // «Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу». 24–25 вересня 2013 р. – Збірка тез конференції. – Київ, Україна. – с. 51.

21. Семенюк В.Ф., Руденко Э. М., Коротащ И. В., Осипов Л. С., Полоцкий Д.Ю., Шамрай К.П., Вирко В. Ф., Слободян В. М., Прихна Т.А., Ткач В.Н., Шаповалов А.П. Управление формированием нанокластеров металла – катализатора изменением энергетических характеристик геликонной плазмы // IV International Scientific Conference «Nanoscale Systems: structure, properties, technology» NANSYS–2013. 19–22 November 2013. – Тезисы. – Киев, Украина. – с. 410.

22. Полоцкий Д.Ю., Осипов Л.С., Невмержицкий В.И., Сницар М.С. Ионно – плазменное нанесение наноструктурированных многокомпонентных покрытий на термолабильные материалы // IV International Scientific Conference «Nanoscale Systems: structure, properties, technology» NANSYS–2013. 19–22 November 2013. – Тезисы. – Киев, Украина. – с. 404.

23. Коротащ И. В., Руденко Э. М., Краковный А. А., Семенюк В.Ф., Осипов Л.С., Полоцкий Д.Ю. Экстремальная проводимость и эффекты электронной неустойчивости в углеродных нанотрубках в структурах nanoC(Fe)/TiN // IV International Scientific Conference «Nanoscale Systems: structure, properties, technology» NANSYS–2013. 19–22 November 2013. – Тезисы. – Киев, Украина. – с. 333.

24. Семенюк В.Ф., Слободян В.М., Коротащ И.В., Полоцкий Д.Ю., Руденко Э.М., Вирко В.Ф., Шамрай К.П. Управление параметрами плазмы в технологической геликонной разрядной системе // 8 Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технологии». 16–18 апреля 2013 г. – Тезисы. – Москва, РФ: НОБЕЛЛА. – с. 19–24.

25. Коротащ И.В., Одинокое В.В., Павлов Г.Я., Полоцкий Д.Ю., Руденко Э.М., Семенюк В.Ф., Сологуб В.А., Шамрай К.П. Плазменно-стимулированное формирование ориентированных углеродных наноструктур в едином вакуумно-технологическом цикле // 6 Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технологии». 13–15 апреля 2011 г. – Тезисы. – Москва, РФ. – 1С. – с. 198–202.

26. Семенюк В.Ф., Руденко Э.М., Коротащ И.В., Осипов Л.С., Полоцкий Д.Ю., Шамрай К.П., Одинокое В.В., Павлов Г.Я., Сологуб В.А. Гибридная ионно-плазменная разрядная система для многофункциональной установки формирования наноструктур // 4-та міжнародна наукова конференція «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур». 6–8 жовтня 2010 р. – Збірка тез конференції. – Харків, Україна. – Т. 1. – с. 144–149.

### **Список використаної літератури**

1. Flexible Electronics. Materials and Applications. Eds. W.S. Wong, A. Salleo. – 2009 (Springer US).

2. Звездин А.К., Звездин К.А. Суперпарамагнетизм сегодня: магниты-карлики на пути в мир квантов // Природа. – 2001, – № 9. – с. 9–18.

3. Кондорский Е.И. К теории однодоменных частиц / ДАН СССР. – 1952. – Т. 82. – № 3. – с. 365.

4. Bozorth R.M. Directional ferromagnetic properties of metals // J. Appl. Phys. – 1937. – Vol. 8, № 9. – p. 575–588.
5. Blonder G.E., Tinkham M., Klapwijk T.M. Transition from metallic to tunneling regimes in superconducting microconstrictions: Excess current, charge imbalance, and supercurrent conversion // Phys. Rev. B. – 1982. – Vol. 25. – p. 4515–4532.
6. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 8. Квантовая механика. I, 1966 (Мир, Москва); Выпуск 9. Квантовая механика. II, 1967 (Мир, Москва).
7. Лифшиц И.М., Кирпиченков В.Я. Туннельная прозрачность разупорядоченных систем // ЖЭТФ. – 1979. – Т. 77, № 3 – с. 989–1016.
8. C. Ma and D. Behrend, NVI Inc, The Development of the VLBI2010 Global Observing System (VGOS), Solar System Exploration Seminar for the Director of Science and Exploration. (2012). – p. 7.
9. Akasaki. Infrared lattice vibration of vapour-grown AlN // Solid State Communications. – 1967. – Vol. 5. – p. 851–853.

### АНОТАЦІЯ

**Полоцький Д. Ю. Електронні, магнітні й оптичні властивості та мікроструктура гібридних гетеросистем TiN/Fe/C і AlN.** — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. — Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова Національної академії наук України, м. Київ, 2020 р.

Вивчено створені в геліконно-дугових іонно-плазмових процесах гібридні гетеросистеми TiN/Fe, TiN/Fe/C та AlN, з'ясовані особливості їх електронних, магнітних й оптичних властивостей та мікроструктури; встановлені закономірності і зв'язок між їх фізичними властивостями та мікро- і наноструктурою. Виявлено явище високоенергетичного режиму геліконного розряду, вперше отримано регулярну структуру нанорельєфу на Si. Виявлено суперпарамагнітний ефект в наноструктура TiN/Fe і TiN/Fe/C. Встановлено, що наноструктурований C у структурі TiN/Fe/C у декілька раз підвищує магнітну сприйнятливості порівняно із структурою TiN/Fe та підвищує температури блокування і суперпарамагнітної межі. Виявлено, що при кімнатних температурах ВАХ гетероструктур TiN/Fe/C демонструють виникнення станів з нульовим диференціальним опором і гігантською провідністю. У гетероструктурі TiN/Fe/C виявлено ефекти перемикання мемристорного типу між високоомним і низькоомним станами. Вперше синтезовані наноструктуровані плівки AlN на гнучких термолабільних полімерних підкладах тефлон і майлар, в яких виявлено смугу залишкових променів в ІЧ-діапазоні.

**Ключові слова:** іонно-плазмові процеси, геліконне джерело плазми, плазово-дуговий прискорювач, наноструктури, електронні, магнітні й оптичні властивості гетероструктур, суперпарамагнетизм, гігантська провідність, мемристорні ефекти, ІЧ-квазіоптичні фільтри.

## ABSTRACT

**Polotskyi D. Yu. Electronic, magnetic and optical properties and microstructure of TiN/Fe/C and AlN hybrid heterosystems.** — Qualification scientific work as the manuscript.

Thesis for a Candidate of Physical and Mathematical Sciences by specialty 01.04.07 – Solid State Physics. — G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the N.A.S. of Ukraine, Kyiv, 2020.

The paper describes a powerful device, unique in its technological capabilities — a hybrid helicon-arc ion-plasma reactor, the main feature of which is a combination of three plasma instruments within the technological volume. Two of them are of the same physical nature — plasma-arc accelerators (PAC), the third one is a high-frequency plasma source — the helicon discharge. Thus, due to its physical characteristics, the helicon plasma source is able to clean effectively the working volume of the reactor and the substrate surface from residual atmosphere elements. Experiments have shown that the use of a helicon discharge for activating the surface of such problematic (for creating it on the surface of film structures) materials as Teflon and Mylar make it possible to apply a layer of a dielectric aluminum nitride, which make the samples opaque to the IR radiation in the range of 2–25 microns.

Due to its design features, PAC is able to transfer a plasma beam that originates in the end surface of the consumable cathode and is accelerated in crossed electric and magnetic fields to a distance of about 50 cm without significant losses in the plasma density. As a result of the dissertation work, for the first time, a number of fundamental scientific results was obtained using a hybrid helicon-arc ion-plasma reactor: For the first time, the phenomenon of high-energy helicon discharge mode of "Plasma column" was revealed, in which high-density plasma propagates from the discharge chamber to the technological zone (the processing chamber), where the plasma density is  $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , 2–3 orders of magnitude higher than known plasma sources, and the ion current density is  $\approx 2.5$  times larger than for the known bulk helicon discharge.

For the first time, a regular nanorelief structure with a size of 2–10 nm was obtained on a titanium nitride (TiN) film on single-crystalline silicon, on which magnetic monodomain nanoclusters of iron (Fe) were synthesized.

For the first time, a superparamagnetic effect was detected in TiN/Fe nanostructures with a blocking temperature  $T_B = 42.2 \text{ K}$  and a superparamagnetic limit temperature  $\approx 150 \text{ K}$ .

It was found for the first time that nanostructured carbon synthesized on iron nanoclusters (TiN/Fe/C nanostructure) increases magnetic susceptibility value several times compared to the carbon-free sample (TiN/Fe nanostructure), significantly increases the superparamagnetic blocking temperature to 180 K for  $H = 100 \text{ E}$  and up to  $\approx 90\text{--}120 \text{ K}$  for  $H = 1 \text{ kE}$  and raises the temperature of the superparamagnetic boundary to room temperature.

It was found for the first time that at room temperatures  $I$ – $V$  characteristics of TiN/Fe/C heterostructures show the occurrence of states with zero differential resistance and giant conductivity that may be due to resonant-percolation transport in nanostructured C.

For the first time, the switching effects of the memristor type in TiN/Fe/C heterostructures between high-impedance ( $1.3 \times 10^{-2}$  Ohm) and low-impedance ( $3 \times 10^{-4}$  Ohm) states were revealed.

Nanostructured AlN films were firstly synthesized on flexible thermolabile polymer substrates Teflon and Mylar.

It is established that the surface of the obtained AlN films is characterized by the presence of two reliefs: micro-relief and nanorelief. The reliefs structure depends on the operating parameters — pressure and application time.

In nanostructured AlN films synthesized on polymeric substrates made of Teflon and Mylar, for the first time, the band of residual rays ( $\lambda \approx 10\text{--}20$   $\mu\text{m}$ ) has been detected leading to effective blocking of the IR radiation.

The obtained fundamental scientific results are of great practical importance:

Based on the helicon-arc sources of high-density plasma flows, physical principles of the ion-plasma condensate formation for the creation of functional hybrid heterosystems TiN/Fe, TiN/Fe/C and AlN have been developed.

Results of the study of magnetic and relaxation phenomena in nanostructured TiN/Fe heterostructures indicate possibility of essential growth in the magnetic recording density due to significant increase in the iron anisotropy coefficient in the nanostructured state. Synthesis of nanostructured iron on the surface of carbon nanostructures (TiN/Fe/C) allows us to approach the solution of the problem of overcoming the superparamagnetic limit.

The revealed asymmetric hysteresis behavior of the  $I$ – $V$  characteristics of TiN/Fe/C heterostructures allows implementation of novel devices for data recording — memristors on their base.

Fabricated multispectral IR filters based on AlN ion-plasma condensates on flexible polymer substrates made of Mylar and Teflon are necessary for supersensitive cryogenic receiving systems of the newest systems for information transfer, telecommunications, new generation of navigation and positioning systems.

**Keywords:** ion-plasma processes, helicon plasma source, plasma-arc accelerator, nanostructures, electronic, magnetic and optical properties of heterostructures, superparamagnetism, giant conductivity, memristor effects, IR quasi-optical filters.

Підписано до друку 31.08.2020 р. Зам. № 21-20  
Формат 60×90/16. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Наклад 100 прим. Ум. друк. арк. 0,86.