

Відгук

офіційного опонента на дисертацію Полоцького Дениса Юрійовича «Електронні, магнітні й оптичні властивості та мікроструктура гібридних гетеросистем TiN/Fe/C і AlN», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла

Актуальність теми дисертації

Сучасний світ неможливо уявити без мікро- та наноелектроніки, які впроваджуються у всі галузі людської діяльності: комп'ютерну техніку, телекомунікації, авіоніку, космічну та медичну техніку, енергетику, системи безпеки. І тому створення елементної бази сучасної електроніки потребує нових технологічних рішень. Рівень розвитку технологій є головним обмежуючим елементом, що визначає можливості розвитку сучасної електроніки. Тому дослідження в цій сфері завжди будуть актуальними, а застосування нестандартних підходів і технологічних рішень, що дозволяють працювати з нетрадиційними матеріалами, розширюють можливості і сфери застосування сучасної електроніки. Отже дослідження можливостей і вдосконалення геліконно-дугових іонно-плазмових технологій, якому присвячена дисертаційна робота Дениса Полоцького, є актуальним і сучасним. Про актуальність виконаних дисертантом досліджень свідчить також значний перелік наукових проектів і грантів Інститута металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, у рамках яких було створено принципово нове іонно-плазмово вакуумно-технологічне обладнання на основі геліконного реактора і плазмово-дугових прискорювачів і досліджені можливості і перспективи його застосування.

Загальна характеристика роботи

Предметом проведеної дисертантом роботи були створення технологій росту і дослідження структурних, електронних, магнітних й оптичних властивостей гібридних гетеросистем TiN/Fe, TiN/Fe/C на кремнієвих підкладках та наноструктурованих плівок AlN на кремнієвих і полімерних підкладках. Метою роботи декларувалось 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 вирішувались наступні наукові завдання:

- вивчення фізико-технічні можливості іонно-плазмової системи гібридного геліконно-дугового іонно-плазмового реактора (ГГДІПР),
- розробка фізичних засад формування на основі ГГДІПР іонно-плазмових конденсатів ряду матеріалів (TiN, AlN, Fe, C) на діелектричних підкладках, в тому числі AlN на термолабільних полімерних плівкових підкладках,
- створення гібридних гетеросистем TiN/Fe, TiN/Fe/C на кремнієвих підкладках та AlN на кремнієвих і гнучких полімерних підкладках на основі розроблених геліконно-дугових іонно-плазмових процесів,

- дослідження електронних, магнітних та оптичних властивостей та мікроструктури створених гібридних гетеросистем та встановлення закономірностей зв'язку між їх фізичними властивостями та мікро- і наноструктурою.

Дисертація складається зі вступу, оглядового розділу, трьох оригінальних розділів і загальних висновків. 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.

У *першому розділі*, що є літературним оглядом, здійснено глибокий та критичний аналіз наявних результатів за темою дисертаційної роботи. На основі такого аналізу і були сформульовані напрями і перспективи подальших досліджень в області технології, а саме показана перспективність геліконного джерела плазми для отримання наноструктурованих плівок.

У *другому розділі* описано принцип роботи, конструкцію і результати дослідження робочих режимів розробленого геліконного джерела плазми та плазмово-дугового прискорювача. Досліджено вплив магнітного поля на виникнення геліконного розряду та просторовий розподіл поглинання ВЧ-потужності. Обговорено два режими роботи геліконного джерела — відомий режим об'ємного розряду та виявлений новий режим «плазмова колона». Виявлено можливості просторового керування плазмовим потоком плазмово-дугового прискорювача з ефективною сепарацією від мікрокрапельної фази, що покращує рівномірність поверхні вирощених плівок. Також детально описані методи і результати досліджень морфології вирощених структур.

У *третьому розділі* досліджуються режими стимульованого плазмою синтезу гібридних гетеросистем TiN/Fe/C на підкладках монокристалічного кремнію (Si), в яких наноструктурований вуглець (C) наноситься в режимі плазмово-активованого осадження з газової фази на каталітичні центри — кластери заліза (Fe). Аналіз структур плівок TiN/Fe, сформованих при різних енергіях потоку йонів, показав можливість керованого формування нанопорядкованого рельєфу в діапазоні 5-100 нм в залежності від умов формування плівкових структур. Встановлено суперпарамагнітний характер поведінки магнітного моменту в одержаних нано-гетероструктурах TiN/Fe і TiN/Fe/C.

Продемонстровано визначальний внесок вуглецевих наноструктур у магнітну сприйнятливості гетероструктур TiN/Fe/C у порівнянні з аналогічною величиною для тієї ж структури без вуглецю. Також у гетеросистемах TiN/Fe/C автором виявлені ефекти електронної нестійкості, які характерні для сильнокорельованих електронних систем, і призводять до перемикання системи під дією струмової інжекції між високоомним і низькоомним станами. Крім того, в гетероструктурі TiN/Fe/C виявлено стан з екстремально високою провідністю при кімнатній температурі ($R < 10^{-5}$ Ом при 310 K).

Четвертий розділ присвячено розробці технології формування плівок нітриду алюмінію на термолабільних полімерних підкладках з застосуванням гібридного геліконно-дугового плазмового реактора. Вперше синтезовані наноструктуровані плівки AlN на гнучких термолабільних полімерних підкладках з тефлону і майлару. Вдосконалення технології дозволили позбутися негативного впливу мікрокрапельної компоненти матеріалу катода на поверхню плівок AlN, а також окислення алюмінію при підвищенні парціального тиску кисню. Аналіз поверхні отриманих плівок AlN на полімерних підкладках показав характерну наявність мікрорельєфа і нанорельєфа одночасно. Показано, що структура рельєфів і розміри кристалітів залежать від робочих параметрів – тиску газу і швидкості нанесення.

В наноструктурованих плівках AlN, синтезованих на полімерних підкладках з тефлону та майлару, вперше виявлено смугу залишкових променів в діапазоні довжин хвиль $\lambda \approx 10\text{-}20$ мкм, що приводить до ефективного відбивання ІЧ-випромінювання. Для отриманих композитів AlN/майлар і AlN/тефлон виявлено розширення смуги залишкових променів у порівнянні із монокристалічним AlN. Створені мультиспектральні ІЧ-фільтри на основі іонно-плазмових конденсатів AlN на гнучких полімерних підкладках з майлару та тефлону.

На основі результатів, наведених у розділах 2 – 4, можна сформулювати положення, які визначають **наукову новизну дисертації**. Доцільно розглянути найважливіші з них:

1. В процесі виконання роботи вперше отриманий режим високоенергетичного геліконного розряду «Плазмова колона», при якому плазма із розрядної камери розповсюджується в камеру обробки і має густину на 2 порядки вищу, ніж була відома з попередніх робіт.

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

3. На цій штучно створеній наноструктурі TiN/Fe вперше виявлено суперпарамагнітний ефект і встановлено, що у цих структурах монодоменні нанокластери Fe мають істотно більшу магнітну анізотропію, ніж альфа-залізо.

4. Якщо на нанокластерах заліза синтезувати наноструктурований вуглець, наноструктура TiN/Fe/C матиме в декілька разів вищу магнітну сприйнятливість порівняно із зразком без вуглецю (TiN/Fe) і вищу температуру суперпарамагнітної межі.

5. Вперше продемонстровано, що вольт-амперні характеристики наноструктур TiN/Fe/C демонструють появу станів із гігантською провідністю при кімнатних температурах, що автор пояснює резонансно-перколяційним транспортом.

6. Такі ж структури демонструють ефекти перемикання мемристорного типу між високоомним і низькоомним станами.

7. Вперше синтезовані наноструктуровані плівки AlN на гнучких термолабільних полімерних підкладках тефлону і майлару. Показано, що поверхня отриманих плівок AlN характеризується наявністю мікрорельєфа і нанорельєфа. Структура рельєфів залежить від технологічних параметрів росту структури, а саме, від тиску і часу нанесення.

8. В наноструктурованих плівках AlN, синтезованих на полімерних підкладках з тефлону та майлару, виявлено смугу залишкових променів, ширшу, ніж має монокристалічний нітрид алюмінію. Показано, що плівка AlN товщиною 10-25 мкм на гнучкій тефлоновій підкладці повністю блокує проходження ІЧ-випромінювання, але залишається прозорою в оптичному і мікрохвильовому діапазонах. Ці властивості роблять дуже привабливим практичне застосування таких структур для маскування теплих об'єктів, а також для екранування шумів в системах телекомунікації.

Достовірність результатів та ступінь обґрунтованості наукових положень

Головне, що всі унікальні зразки, які створенні новим технологічним методом з прискіпливим підбором технологічних режимів росту, всебічно тестувалися і вивчалися з залученням сучасних методів експериментальних досліджень на високоточному обладнанні. Це забезпечує достовірність результатів, одержаних у дисертаційній роботі та ступінь обґрунтування наукових положень. Тобто достовірність отриманих результатів обґрунтовується наступним:

1. Адекватно підібраними умовами виготовлення та характеристики зразків, що досліджувалися в роботі.
2. Узгодженням експериментальних результатів та модельних уявлень.
3. Комплексним підходом до аналізу властивостей створених автором унікальних наноструктурованих композитних структур.
4. Достатнім рівнем апробації та високим статусом наукових видань, у яких висвітлено результати роботи.

Практичне значення результатів роботи і рекомендації щодо їх використання

Унікальні технологічні напрацювання у вивченні можливостей іонно-плазмової системи гібридного геліконно-дугового іонно-плазмового реактора, а також структури, що синтезовані в процесі виконання дисертаційної роботи Полоцького Д.Ю., можуть бути використані у подальших фундаментальних і прикладних дослідженнях та розробках функціональної мікро- та наноелектроніки.

Зауваження до роботи

Робота, на мою думку, має деякі недоліки.

1. Не всі рисунки містять вичерпний опис, тому для їх розуміння часто доводиться шукати посилання на рисунок в тексті, що утруднює сприйняття інформації. Наприклад, в главі 3 при детальному аналізі морфології поверхні рисунки не містять вказівки на метод, яким вони отримані.
2. Трапляється хибне вживання термінів. Наприклад, на стор. 104-105 «інтенсивність променя 15 кеВ» замість «енергія збудження пучка», що також вживається в тексті поруч.
3. В підпису до рис.3.21 пропущений карбон. Повинно бути: TiN/Fe/C. На самому рисунку – правильно.
4. В авторефераті на стор. 7 в останньому абзаці дається хибне посилання на рис., якого там нема. В дисертації це рис. 3.19 .
5. Для аналізу електричних властивостей структур TiN/Fe/C чотиризондовим методом досліджувались їх вольт-амперні характеристики. Але незрозуміло, чим відрізняються рис.3.24 і 3.25, 3.27. на стор.124. Рис. 3.24 виглядає як статична ВАХ, а рис. 3.25 знятий в динамічному режимі? З чим пов'язані моменти зриву напруги на рис.3.25? Чи відновлювані ці зміни опору? Здається, що при такій нестабільності варто було прописувати часові зміни напруги за допомогою осцилографа. Автору було б варто більше приділити уваги цьому експерименту і його поясненню в дисертації.
6. Ідея з застосуванням структури TiN/Fe/C в якості мемристора безперечно цікава, але хочеться бачити порівняння зі вже існуючими прототипами мемристорів на основі ітрій-барієвого купрату або з діоксиду титану. А також цікаво побачити оцінки швидкості перемикання запропонованого мемристорного елемента і щільності запису інформації в їх масиві, так само як і вплив паразитних ефектів суперпарамагнітної межі. Останнє зауваження є скоріше побажанням для подальшого розвитку роботи.
7. В авторефераті не знайшов відображення результат про суб-ТГц пропускання плівок AlN/майлар, який є в дисертації і є важливим для практичного застосування цих фільтрів.
8. Для практичного застосування ІЧ – фільтрів AlN/майлар хотілось би бачити

дослідження термічної стійкості цих структур. Але це теж варто віднести до побажань на подальший розвиток роботи.

Однак, наведені зауваження не впливають на загальну цінність і завершеність дисертаційної роботи.

Загальний висновок

За матеріалами дисертації опубліковано 14 статей у фахових наукових журналах, у тому числі у журналі Journal of Applied Physics (2017), що належить до Q1-Q2 по системі Scopus, та 12 тез доповідей на міжнародних і українських наукових конференціях. Матеріали пройшли апробацію на 8 міжнародних наукових конференціях. Автореферат і опубліковані роботи достатньо повно відображають основний зміст дисертаційної роботи.

Дисертація Полоцького Д.Ю. є завершеною науково-дослідною роботою, в якій отримано нові науково-обґрунтовані результати у рамках технології і фізики наноструктурованих матеріалів з унікальними електричними, магнітними і оптичними властивостями. У сукупності отримані результати можуть бути використані для створення нового покоління наноматеріалів і композитів для систем функціональної електроніки.

Таким чином, за актуальністю тематики, за новизною отриманих результатів, їх обсягом, достовірністю та обґрунтованістю, науковим і практичним значенням представлена дисертаційна робота «Електронні, магнітні й оптичні властивості та мікроструктура гібридних гетеросистем TiN/Fe/C і AlN» цілком відповідає вимогам Порядку присудження наукових ступенів, а її автор, Полоцький Денис Юрійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,
Старший науковий співробітник
Інституту фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
кандидат фіз.-мат. наук

Ж.В. Гуменюк-Сичевська

Підпис Ж.В. Гуменюк-Сичевської засвідчую:

Вчений секретар
Інституту фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
Доктор хімічних наук, професор



В.М. Томашик