

МАЛОЕНЕРГОЄМНІ ПЛАЗМОВІ ТЕХНОЛОГІЧНІ СИСТЕМИ З РОЗРЯДАМИ У КОМБІНОВАНИХ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТА МАГНІТНОМУ ПОЛЯХ

В.І. Фаренік

*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
Науковий фізико-технологічний центр МОН та НАН України (Харків)*

Надійшла до редакції 28.08.2009

У цьому огляді наводяться результати наукових досліджень та прикладних розробок, виконаних у ХНУ імені В.Н. Каразіна НФТЦ МОН та НАН України з середини 70-х років до початку 90-х у галузі фізичних основ плазмових технологій для мікроелектроніки.

Ключові слова: плазмові технології, мікроелектроніка, іонні джерела, масспектрометри.

В этом обзоре приводятся результаты научных исследований и прикладных разработок, выполненных в ХНУ имени В.Н. Каразина и НФТЦ МОН и НАН Украины с середины 70-х годов до начала 90-х в области физических основ плазменных технологий для микроэлектроники.

Ключевые слова: плазменные технологии, микроэлектроника, ионные источники, массспектрометры.

In this review the findings of research investigations and applied developments made in both V.N. Karazin KNU and SCPT MES & NAS Ukraine from the end 70 up to the end 90 in the field of a basic physics of plasma technologies for micro- and nanoelectronics are presented.

Keywords: plasma technologies, microelectronics, ion sources, mass-spectrometers

Діяльність щодо вивчення плазмових процесів у технологічних системах мікро-електроніки на ініціативних засадах та для виконання окремих завдань промислових підприємств була започаткована на кафедрі фізики плазми Харківського державного університету (ХДУ) у 1975 році. У 1979 році, після створення Міністерством вищої та середньої спеціальної освіти (МВССО) України та Міністерством електронної промисловості (МЕП) СРСР при ХДУ галузевої науково-дослідної лабораторії діагностики плазмових технологічних процесів (ГНДЛ ДПТП), почалися планові науково-дослідні, а з 1983, коли при ХДУ було організовано спеціальне конструкторсько-технологічне бюро "Контур" (СКТБ "Контур"), дослідно-конструкторські роботи в зазначеній галузі. У 1992 році, після створення Наукового фізико-технологічного центру Міністерства освіти України та Академії наук України (НФТЦ МОУ та АНУ, зараз НФТЦ МОНУ та НАНУ), до цих робіт було залучено відділення плазмових технологій цього інституту. У 1993 році дослідження було продовжено в НДЛ ДПТП у складі створеної при ХДУ кафедри фізичних технологій (КФТ). Особлива увага при цьому приділялася дослідженню та розробці

малоенергоємних плазмових технологічних систем.

Цей напрямок, маючи стратегічне значення, пов'язане з необхідністю мікромініатюризації електронних приладів та збільшенням діаметру пластин-носіїв, актуальний, також, у зв'язку з розв'язанням постійно виникаючих етапних завдань, які супроводжують розвиток плазмових технологій мікроелектроніки, таких як, наприклад: розробка іонних джерел без розжарюваного катоду для реалізації процесів іонно-хімічної обробки, що тотожно зменшенню фізико-енергетичного впливу на поверхню; необхідність нанесення плівок на гнучкі пластикові носії з низькою температурою плавлення; малогабаритні технологічні модулі для космічних станцій; застосування, замість кремнієвих носіїв, матеріалів групи A_3B_5 з низькою температурою деградації; екологічні проблеми, що полягають у зменшенні викидів шкідливих речовин в атмосферу, зокрема фтору; інше.

На порозі якісного перетворення процесу мікромініатюризації приладів та виробів електроніки за допомогою нанотехнологій, мінімізація комплексного впливу активованого технологічного середовища на наноструктури, при збереженні його ефективності, є тим більш актуальною.

Необхідність виконання технічних вимог створення малоенергоємного плазмового обладнання стимулювала проведення цілеспрямованих фундаментальних досліджень процесів створення плазми складної молекулярної структури з мінімальним енерговкладом та властивостей розрядів з комбінованими електричним та магнітним полями, наявність яких забезпечує керуваність плазмових технологічних процесів.

1. Досліджено особливості діагностики іонно-пучкової та ВЧ плазми і процесів травлення в них зондовими методами. Вперше виявлена можливість оперативного контролю та контролю моменту закінчення процесів іонно-променевого травлення (ПТ) методом одиночного ленгмюрівського зонду в режимі електронного струму насичення, за допомогою електростатичного аналізатора при контролі травлення мішеней, що переміщуються, методом вимірювання зміни струму катоду-нейтралізатора у просторі масопереносу.

Вперше показано, що контроль процесів ПХТ можливо здійснювати виходячи з якісних характеристик зондів різноманітних конструкцій, зокрема, слідкуючи за змінами потенціалу “плаваючого” зонду впродовж травлення.

Розроблено методики та виготовлено експериментально-технологічні зразки пристроїв мас-спектрометричного контролю “Контроль-04, 14, 24, 34, 44, 54, 64” та зондового контролю “Контроль-01, 02, 03, 05, 06, 07, 08, 09”, що не мають аналогів у вітчизняній та зарубіжній практиці.

2. Вивчено процеси запалення розрядів зі схрещеними постійними електричним та магнітним полями в інертних та хімічно-активних газах у комірці Пеннінга, циліндричному магнетронному діоді та базових моделях іонних джерел типу “Луч” та “Радикал”. Зміряні характеристики плазми та інжектіваних іонних потоків і розподіл їх за просторовими параметрами пристроїв з різноманітними конструкціями основних та допоміжних електродів, витягаючих діафрагм. Вперше виявлено умови збудження та подавлення іон-іонної нестійкості обертової плазми, нестійкості зарядженої електронної плазми, електростатичної нестійкості у щілині прискорювача з замк-

нутим дрейфом електронів. Показано, що подавлення характерних нестійкостей у плазмотворюючих ступенях та за умови нейтралізації іонних потоків у просторі масопереносу можливо одержувати щільні іонні потоки середніх та малих енергій.

Розроблено ряд низькоенергетичних одна- та двоступеневих іонних джерел з однорідним розподілом за радіусом густини іонного пучка, що забезпечує однорідність плазмової обробки (ПО) не гірше 5%.

Вивчено процеси утворення відбиткового розряду у парах металів та вплив колективних процесів на характер формування синтезованих іонно-атомних потоків. Для реалізації методу термоіонного осадження запропоновано нові конструкції джерел з низьким початковим робочим тиском ($P \sim 10^{-5}$ Тор) та низькими енергіями іонів ($e_i = 50 - 1000$ eВ) у синтезованих іон-атомних потоках: відбитковий розряд Пеннінга та плазмо-пучковий розряд у дуговому режимі.

Більшість розробок не мають аналогів в Україні та за рубежом.

3. Досліджено характеристики вторинної плазми у просторі транспортування іонних пучків середніх та малих енергій від джерела іонів (ДІ) до металічних та діелектричних мішеней у модельних умовах та у камерах промислових установок типу УРМ, “Каштан”. Доведено, що при енергіях іонів $e_i < 1000$ eВ за об’ємну нейтралізацію іонних пучків відповідають процеси рекомбінації іонів на “своєму” нейтральному газі, народження вторинних електронів, що складаються з декількох груп з різними функціями розподілу за енергіями. Виявлено неоднозначну роль катоданейтралізатора. Вивчено характер надлишкових зарядів на поверхнях діелектричних мішеней, винайдено спосіб обробки таких мішеней. Запропоновано якісну картину транспортування та нейтралізації іонних пучків середніх та малих енергій у технологічних установках іонної обробки мікроструктур.

4. Виконано комплекс досліджень характеристик ВЧ розряду: особливостей запалення та існування розряду у мінімумі кривої запалення; диференціальної негативної провідності; впливу вторинної електронної емісії на запалення та існування розряду; парамет-

рів плазми розряду в міжелектродному проміжку з різними його довжиною та матеріалами електродів; нелінійностей імпедансу. За результатами досліджень вперше встановлено можливість стійкого існування при аномально низьких напругах запалення та підтримки розряду з мінімальною відстанню між електродами та параметрами плазми – густина, температура компонентів, однорідність розподілу за радіусом вакуумної камери – на рівні ефективно технологічно придатних.

Винайдено мінімізований за розмірами (“у пластину”) і за енерговкладом реактор з верхнім електродом оригінальної конструкції, що дозволяє здійснювати розподілені за площею електроду напуск робочих газів і відкачування продуктів реакції, що забезпечує однорідність обробки не гірше 1%. Цей реактор є загальною складовою для розроблених установок плазмо-хімічного травлення (ПХТ) діодного типу.

Розроблено та виготовлено експериментально-технологічну установку ПХТ “Контур-01” з автоматизованим аналітично-контролюючим комплексом на базі мас-спектрометра МХ-7401 “Контроль-04” та пристроєм “Контроль-01”; експериментально-технологічну установку ПХТ “Контур-03” з габаритними розмірами, що відповідають стандартам технологічних ліній підприємств мікроелектроніки; малогабаритні настільні установки ПХТ “Титан”, призначені для малосерійних виробництв заводських технологічних та науково-дослідних лабораторій.

Вперше на установках зазначеного типу здійснено бездефектну ПО матеріалів з низькою температурою деструкції (арсенід галію, кадмій-ртуть-телур, високоомний кремній) при високих анізотропії, однорідності, швидкості травлення.

Розробки захищені авторськими свідоцтвами.

5. Вперше розроблено конструкцію комбінованого розряду з ВЧ індукційним збудженням плазми та введеними в нього електродами, на які подається ВЧ зміщення – індукційний плазмовий конденсатор (ІПК), вивчено його характеристики. Встановлено, що, порівняно з ВЧІ розрядом у ІПК вихід на сталий режим існування здійснюється плавно, без

стартових стрибків струму та напруги на розряді, а зміна напруги ВЧ зміщення дає змогу керувати параметрами плазми, зокрема, енергетикою та густиною іонів. Показано, що оптимальними параметрами для здійснення керування ефективних процесів ПО у ІПК є інтегральні струмові та енергетичні параметри, енергетична ціна іона, ВЧ потужність, що поглинається в об’ємі плазми, розсіюється в електричних колах та іде на прискорення іонів, їх залежності від тиску та сорту робочого газу, вольтоватні та ват-амперні характеристики розряду. Вивчено залежність енергетичної ціни іону від усіх технологічно важливих параметрів, що дозволило розробити оптимальні малоенергоємні технологічні пристрої з пониженим робочим тиском.

Винайдено вакуумно-реакційну камеру на основі ВЧ індукційного плазмового конденсатора. Використання у цьому реакторі спеціальної сітки, що відокремлює область плазмостворювання від зони обробки, дозволяє реалізувати гамму процесів плазмо-хімічного травлення, у тому числі чисто радикального (РТ).

Винайдено широко-апертурне ВЧ індукційне джерело низькоенергетичних іонів з енергіями 50 – 300 еВ, щільністю струму до 7 мА/см² і однорідним розподілом густини струму за радіусом пучка. Таке джерело дає змогу проводити бездефектну ПО матеріалів групи А₃В₅ на нерухомій мішені діаметром до 300 мм при пониженому тиску робочого газу $P \leq 10^{-4}$ мм рт. ст.

З використанням різних конструкцій індукційного плазмового конденсатора розроблено та виготовлено експериментально-технологічні установки ПХТ, РТ та радикального іонно-променевого травлення (РІПТ) “Контур-02”, “Контур-04”, “Контур-05”, “Каштан-5”.

Розробки захищені авторськими свідоцтвами.

Результати розробок було випробувано у провідних НДІ та впроваджено на передових підприємствах вітчизняної електронної промисловості: НВО “Кристал”, ВО “Сатурн”, ВО “Оріон” (м. Київ); ЦКБ ВО “Донець” (м. Луганськ); Мінський радіотехнічний інститут, ВО “Інтеграл”, (м. Мінськ, Білорусь);

НДІ Вакуумної техніки ім. С.А. Векшинського, Фізико-технологічний інститут РАН, НДІ Прикладної фізики, НВО “Оріон”, НВО “Сапфір” (м. Москва, Росія); Московський інститут електронної техніки, НДІ Точних технологій, НДІ Молекулярної електроніки, заводи “Мікрон” та “Ангстрем”, НДІ Точного машинобудування, НДІ “Мікроприлад” (м. Зеленоград, Росія); ВО “Світлана”, ВО “Авангард” (м. С-Петербург, Росія); НДІ Напівпровідникових приладів, НВО “Електроніка” (м. Воронеж, Росія) у процесах формування топологічного рисунку при виробництві приладів мікро- та мікрофотоелектроніки.

До вище зазначених розробок відносяться: пристрої зондового та мас-спектрометричного контролю, джерела іонів зі схрещеними полями та вакуумно-реакційні камери з ВЧС і ВЧІ розрядами, експериментально-технологічні установки типу “Контур” та “Титан”, що дозволили довести відсоток виходу кондиційних приладів на ПО до 100 та реалізувати “м’які” режими ПО.

Впровадження розробок дало суттєвий економічний ефект.

Обраний напрямок досліджень та розробок сформувався та був реалізований при виконанні таких міжгалузевих та галузевих програм, як: Програма спільних робіт вищих навчальних закладів МВССО СРСР та союзних республік і підприємств МЕР СРСР на 1981–1990 рр.; Програма комплексних досліджень вузів Мінвузу УРСР на 1981–1985 рр. з проблеми “Фізичні властивості та застосування плазми”; Програма спільних науково-дослідних робіт інститутів АН СРСР, Мінвузу та підприємств Мінелектронпрому у галузі обладнання та технології плазмо-хімічних та іонно-хімічних методів обробки на 1982–1985 рр.; Міжвузівська цільова науково-технічна програма Мінвузу СРСР “Іонно-плазмова технологія” на 1983–1990 рр.; Республіканська наукова програма робіт закладів АН УРСР, МВССО УРСР та організацій п/с А–1501 з проблеми “Мікроелектроніка. Розробка нових принципів мікроелектроніки та створення на їх основі прогресивних технологій, методів контролю

та надвеликих інтегральних мікросхем” на 1984–1990 рр.

За вище згаданими програмами виконувалися наступні завдання:

– ГНДЛ ДПТП кафедри фізики плазми ХДУ за темами: “Дослідження плазмових технологічних процесів обробки поверхні твердих тіл та розробка методів їх діагностики і контролю”, № ДР 01827003474; 1981–1985 рр.; “Розробка та дослідження автоматизованої установки для прецизійного низькоенергетичного високовакуумного травлення тонких плівок при створенні матричних фотоприймачів нового класу”, шифр “Соляріс”, “Дослідження та розробка прецизійних швидкісних процесів плазмохімічного травлення напівпровідникових матеріалів та методів оперативного контролю цих процесів”, шифр “Токамак”, “Розробка комплексу установок іонно-плазмового травлення напівпровідникових матеріалів діаметром до 100 мм, що використовуються при виробництві фотоприймачів та фотоприймальних пристроїв”, шифр “Альгаїр–Тополь”, Постанова директивних органів, 1985–1990 рр.

За результатами діяльності ГНДЛ ДПТП та СКТБ “Контур” на кафедрі фізики плазми було створено міцну матеріальну базу і висококваліфікований колектив наукових співробітників та спеціалістів, що явилось фундаментом створення у 1992 році НФТЦ МОН та НАН України, а у 1993 році – кафедри фізичних технологій. Колективами НФТЦ МОН та НАН України та КФТ ХНУ імені В.Н. Каразіна було продовжено виконання цілеспрямованих фундаментальних досліджень, розпочатих у галузевій лабораторії:

– науково-дослідної частини ХДУ по кафедрі фізики плазми за темою “Дослідження умов формування електричних розрядів у комбінованих полях та процесів взаємодії плазми складної молекулярної структури з поверхнями твердих тіл”, № ДР UA010086188, 1992–1993 рр.; по кафедрі фізичних технологій за темами “Дослідження іонно-пучкової плазми, прикатодних та прианодних шарів просторового заряду у комбінованих (постійному і високочастотному) електричному та магнітному полях у процесах травлення та

нанесення тонких плівок різних матеріалів”, № ДР 0194U018581, 1994–1995 рр.; “Дослідження процесів формування потоків заряджених частинок в іонно-плазмових системах з комбінованими ЕН полями”, № ДР 0197U016507, 1997–1999 рр.

Згідно до Програм “Взаємодія електромагнітного випромінювання та потоків заряджених частинок з речовиною” Координаційного плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти України на 1996–1999 рр.; науково-дослідних, дослідно-конструкторських та експериментально-технологічних робіт Наукового фізико-технологічного центру Міносвіти та АН України на 1992–1995 рр.: “Розділ 1. Розробка високоефективних іонно-плазмових процесів та обладнання для мікроелектроніки” розроблялися теми:

- “Дослідження, розробка та виготовлення комплексу плазмового малоенергоємного устаткування для нанесення та травлення тонких шарів матеріалів, що використовуються у мікроелектроніці”, № ДР 0194000325, 1992–1993 рр.;
- “Розробка та виготовлення експериментального зразка уніфікованого інфор-

маційно-керуючого комплексу і програмного забезпечення для автоматизації вакуумно-плазмового обладнання”, № ДР 01944012848, 1994–1995 рр.;

- “Дослідження іонно-плазмових систем в комбінованих ЕН полях для синтезу покриттів з прогнозованими фізичними властивостями”, № ДР 01964018189, 1996–1997 рр.;
- “Дослідження умов формування електричних розрядів у комбінованих полях та процесів взаємодії плазми з поверхнею твердого тіла”, Комплексна тема на базі робіт №№ ДР 0196U018189, 0196U018191, 0194U012847, 1996–1999 рр.

Результати вищезазначених робіт забезпечили успішну участь у подальшому виконанні Держбюджетної тематики МОНУ, Міжгалузєвої програми розвитку найбільш конкурентоспроможних напрямків мікроелектроніки в Україні (напрямок “Нове технологічне обладнання для мікроелектроніки”), розроблену на виконання доручень Президента України від 24.06.98 р. №1–14/473 та Кабміну України від 30.06.98 р. № 12586/2 (1999–2001 рр.)

Фаренік Владимир Иванович – научный руководитель ОНИЛ ДПТП с 1979 года, сейчас – заведующий кафедрой физических технологий ХНУ имени В.Н. Каразиа, директор НФТЦ МОНУ и НАНУ.

В разные годы начальниками, руководителями отделов и секторов, ведущими научными сотрудниками и специалистами ОНИЛ ДПТП (с 1992 НИЛ ДПТП) работали, продолжают сотрудничество Покроев А.Г., Власов В.В., Егоренков В.Д., Середа Н.Д., Юнаков Н.Н., Бизюков А.А., Целуйко А.Ф., Бобков В.В., Сосипатров М.В., Плетнев В.Н., Кропотов Н.Ю., Будянский А.М., Качанов Ю.А., Марущенко Н.Б., Ашеко А.А., Бизюков В.И., Крячко Ю.П., Ясин И.В., Карпунин С.И., Цуканов В.В., Манзюк Н.А., Лукашевич О.И., Демченко П.И., Дружинин В.П., Ушаков А.В., Положий К.И., Алимов С.С., Стервеедов А.Н., Глушко В.И., Босенко В.Н., Окороков В.В.

© В.І. Фаренік, 2009.