

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. О. Селецька

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ОПТИЧНІ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2013

УДК 621.382.8

ББК 32.854.2

О-72

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 27.09.2012 р.)

Рецензенти:

В. П. Кожем'яко, доктор технічних наук, професор

В. Г. Петрук, доктор технічних наук, професор

В. Г. Дейбук, доктор фізико-математичних наук, професор

Осадчук, В. С.

О-72 Радіовимірювальні оптичні перетворювачі для мікроелектронної технології: монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. О. Селецька. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 160 с.

ISBN 978-966-641-506-9

В монографії проаналізовано сучасний стан оптичних перетворювачів, подано основи побудови радіовимірювальних оптичних перетворювачів з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором для визначення часу плазмохімічного травлення. Розглянуто принципи побудови, експериментальні дослідження основних параметрів оптичних перетворювачів. Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням і розробкою мікроелектронних перетворювачів оптичного випромінювання, а також на аспірантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

УДК 621.382.8

ББК 32.854.2

ISBN 978-966-641-506-9 © В. Осадчук, О. Осадчук, О. Селецька, 2013

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАВЛЕННЯ В ПЛАЗМОХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ.....	8
1.1 Загальна характеристика методів визначення часу плазмохімічних процесів.....	9
1.2 Методи визначення часу плазмохімічного травлення, що використовують «зразки-свідки».....	9
1.3 Безконтактні методи визначення часу плазмохімічного травлення.....	11
1.4 Оптичні методи визначення часу плазмохімічного травлення.....	16
1.5 Класифікація методів визначення часу плазмохімічних процесів та постановка задачі дослідження.....	25
2 РОЗРОБКА РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ОПТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ СТРУКТУР БІПОЛЯРНИХ ТА ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ.....	27
2.1 Розрахунок вольт-амперної характеристики частотного оптичного перетворювача з фото резистором.....	27
2.2 Визначення аналітичної залежності функції перетворення та рівняння чутливості частотного оптичного перетворювача з фоторезистором.....	37
2.3 Розрахунок вольт-амперної характеристики частотного оптичного перетворювача з фототранзистором.....	47
2.4 Визначення аналітичної залежності функції перетворення та рівняння чутливості частотного оптичного перетворювача з фототранзистором.....	53
3 РОЗРОБКА РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ОПТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ СТРУКТУР БІПОЛЯРНИХ ТА ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ.....	68
3.1 Розрахунок вольт-амперної характеристики частотного оптичного перетворювача з фоторезистором та активним індуктивним елементом.....	68

3.2	Визначення аналітичної залежності функції перетворення та рівняння чутливості частотного оптичного перетворювача з фоторезистором та активним індуктивним елементом.....	74
3.3	Розрахунок вольт-амперної характеристики частотного оптичного перетворювача з фототранзистором та активним індуктивним елементом.....	86
3.4	Визначення аналітичної залежності функції перетворення та рівняння чутливості частотного оптичного перетворювача з фототранзистором та активним індуктивним елементом.....	95
4	ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ТРАВЛЕННЯ У ПЛАЗМОХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ.....	108
4.1	Використання оптичних частотних перетворювачів для визначення часу плазмохімічного травлення.....	108
4.2	Використання мікропроцесорів в системі визначення часу плазмохімічного травлення.....	123
4.3	Розрахунок похибок пристрою визначення часу плазмохімічного травлення.....	127
	Література.....	146

ВСТУП

На цьому етапі розвитку науково-технічного прогресу аналітичне приладобудування є однією з нових областей використання мікроелектроніки, яка за допомогою групових методів технології дозволяє розробляти та створювати сенсори для вимірювання параметрів технологічних процесів. Створення вимірювальних перетворювачів є однією з актуальних проблем сьогодення. Вдосконалення систем автоматизованого контролю і управління різними об'єктами, процесами, виробництвами визначається досягненням в цій галузі.

Загальна тенденція в розвитку вимірювальних перетворювачів, в тому числі і оптичних, зумовлена збільшенням вимог точності до них при одночасному удосконаленні експлуатаційних умов. Все це заставляє проводити пошуки і розробку нових методів вимірювання, які б дозволили розв'язати задачі, що з'являються.

Одну з провідних позицій в науковому світі з розробки первинних перетворювачів займає Україна. Це, насамперед, стало можливим завдяки роботі відомих українських вчених І. М. Вікуліна [1, 2], З. Ю. Готри [3–6], М. Д. Кошового [7, 8], В. Л. Костенка [9], В. В. Кухарчука [10], В. П. Манойлова [11, 12], Я. Т. Луцика [13, 14], В. С. Осадчука [15–20], О. В. Осадчука [16–23], Є.П. Пістуна [24], В. О. Поджаренка [25], В. О. Романова [26, 27], Б. І. Стадника [13, 14], Ю. О. Скрипника [28, 29], В. М. Шарапова [30, 31], О. П. Яненка [12], а також закордонних вчених В. М. Арутуняна [32], Ж. Аша [33], А. І. Бутурліна [34, 35], Г. Виглеба [36], П. П. Кремлівського [37, 38], П. В. Новицького [39], В. І. Стафєєва [1, 2], А. М. Турічина [40], Д. Ю. Ейдукаса [41] та інших.

На сьогоднішній день ведуться широкомасштабні наукові дослідження з використання нових ідей, нових матеріалів, фізичних явищ для створення сенсорів в таких наукових закладах, як НТУУ «Київський політехнічний інститут» (м. Київ), Інститут Кібернетики НАН України (м. Київ), Інститут теплофізики НАН України (м. Київ), Київський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Київ), Інститут фізики напівпровідників НАН України (м. Київ), Інститут метрології (м. Харків), Національний технічний університет «Львівська політехніка» (м. Львів), Харківський національний технічний університет (м. Харків), Одеський національний університет ім. І. І. Мечни-

кова (м. Одеса), ВАТ «Український науково-дослідний інститут аналітичного приладобудування» України (м. Київ), Державний науково-дослідний інститут індикаторних приладів Міністерства промислової політики України (м. Вінниця), Вінницький національний технічний університет (м. Вінниця).

Подальші наукові дослідження цього напрямку розвинуті в науковій школі Вінницького національного технічного університету, а саме: дослідження теоретичних основ реактивних властивостей і від'ємного опору у напівпровідникових приладах подано у монографіях проф. В. С. Осадчука [15–20], розвиток теорії від'ємного опору і оцінки ефективності пристроїв з його використанням розглянуто в працях М. А. Філінюка [42–44], розробка теорії мікроелектронних частотних перетворювачів на основі транзисторних структур з від'ємним опором і її використання подано у працях проф. О. В. Осадчука [16–23, 45–52].

Одним з ключових факторів у досягненні високої якості продукції та забезпеченні автоматизації технологічних процесів є оперативний контроль їх параметрів. У мікроелектронній технології плазмохімічні процеси на цей час забезпечують найвищу точність відтворення рельєфного рисунку на кремнієвих пластинах. Найбільш інформативним та технологічним методом, який використовується для визначення параметрів плазмохімічних процесів, є емісійно-спектральний метод. Однак існують задачі технічної реалізації цього методу при малих значеннях інтенсивності спектра власного випромінювання плазми. Розв'язання цих задач можливе за рахунок значного підвищення чутливості оптичних перетворювачів, зокрема шляхом перетворення інформативного електричного сигналу в частотний. Характеристики перетворювачів визначають точність і надійність систем управління і регулювання технологічними процесами. Тому до оптичних сенсорів пред'являються жорсткі вимоги. Вони повинні бути економічними, забезпечувати високу точність вимірювання, мати мінімальну вагу, габарити та енергоспоживання, бути сумісними з сучасними ЕОМ та мати можливість виготовлення за стандартною груповою інтегральною технологією. Перспективним науковим напрямком є розробка та створення радіовимірювальних перетворювачів, які реалізують принцип перетворення «освітленість–частота–час плазмохімічного травлення», на основі реактивних властивостей напівпровідникових стру-

ктур з від'ємним опором. Використання таких приладів виключає з їх конструкцій аналого-цифрові перетворювачі, що дозволяє знизити собівартість систем управління, а також створити «інтелектуальні» вимірювальні перетворювачі в результаті поєднання на одному кристалі схем обробки інформації та первинного перетворювача.

Тому необхідність розробки теоретичних підходів до створення радіовимірювальних оптичних перетворювачів з частотним виходом на основі реактивних властивостей напівпровідникових приладів з від'ємним опором, а також розробки схем, конструкцій, експериментального дослідження параметрів, оцінюванню їх метрологічних характеристик, розробки мікропроцесорної системи вимірювання величини освітленості в промисловості з використанням радіовимірювальних оптичних перетворювачів є актуальним у наш час.

Автори вдячні рецензентам доктору технічних наук, професору В. П. Кожем'якові, доктору технічних наук, професору В. Г. Петруку і доктору фізико-математичних наук, професору В. Г. Дейбуку, корисні зауваження яких сприяли поліпшенню змісту книги.

Відгуки про книгу, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою видавництва: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАВЛЕННЯ В ПЛАЗМОХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ

Плазмохімічні процеси травлення мікроструктур [53–61] фактично безальтернативно забезпечують на цей час точність відтворення функціонального рельєфного рисунку на кремнієвих пластинах до \varnothing 300 мм на рівні $\leq 0,13$ мкм (мінімальний топологічний розмір якого введено в останню редакцію International Technology Roadmap for semiconductor 1999 Edition) [62]. Такий високий рівень прецизійності, окрім застосування в мікроелектронній технології електронних та іонних методів літографії, операцій самосуміщення і самоформування, новітніх розробок плазмової технології, пов'язаний з використанням принципу безперервного моніторингу фізичних та технологічних параметрів плазмохімічних процесів, які визначають склад та енергію хімічно активних частинок нерівноважної плазми, процеси їх утворення та загибелі [63]. Окрім того, об'єктами моніторингу в плазмовій технології є температурний режим обробки напівпровідникових структур [62], склад та витрати плазмоутворювальних газів, параметри вакуумних та енергетичних установок [61], систем зовнішнього забезпечення технологічного процесу тощо.

Сучасний моніторинг здійснюється переважно за рахунок збору та обробки інформації від спеціальних сенсорів, в основу роботи яких покладено різноманітні фізичні та хімічні ефекти [64–66], а сам моніторинг є основним базовим елементом системи управління технологічним процесом.

З достатньо великим співвідношенням сигнал/шум відносно прості задачі управління, наприклад, визначення моменту закінчення цільового процесу травлення, розв'язуються на основі візуальної інтерпретації кінетичних кривих сигналу реального часу і порівнянням зі зразковими записом сигналу. Складність при розв'язанні цієї простої задачі виникає зі зменшенням площі пластини, яка піддається плазмовому травленню (в такому випадку складова шуму у співвідношенні сигнал/шум збільшується) [63].

За таких умов розв'язання основної задачі (забезпечення ефективного і надійного управління плазмохімічним процесом) можливе лише шляхом застосування нетрадиційних підходів як в процесах рестрації інформаційних сигналів, так і їх обробленні.

Проблематика цих питань розглядається у цьому розділі.

1.1 Загальна характеристика методів визначення часу плазмохімічних процесів

Традиційно для визначення часу плазмохімічних технологічних процесів використовують вимірювання зовнішніх параметрів системи – напруги і струму розряду, тиску і витрати газу та ін. [60, 67]. Однак «інструментом», який безпосередньо впливає на поверхню, що підлягає обробці, є плазма, і її параметри визначаються не тільки перерахованими зовнішніми параметрами, але й кількістю, формою і розташуванням виробів, що оброблюються, станом їх поверхні, а також станом поверхні вакуумної камери технологічної установки й іншими факторами, часто неконтрольованими. Тобто гарантом повторюваності результатів процесу є повторюваність параметрів плазми, яка контактує з відповідним виробом і потоком заряджених та хімічно активних частинок, які взаємодіють з його поверхнею. Це особливо важливо при розробці нового технологічного обладнання і відпрацювання нових технологій, коли необхідний швидкий зворотній зв'язок, оперативна інформація про параметри плазми і візуалізація змін, які вносяться, в реальному масштабі часу. Крім того, можливість відтворювати параметри плазми дозволяє переносити існуючі технологічні процеси на інші типи технологічних установок і нові типи виробів.

Методи визначення часу плазмохімічного травлення, що використовуються на цей час для управління процесами плазмової обробки матеріалів [60, 68], можна умовно поділити на контактні, безконтактні і такі, що використовують в якості контрольного елемента, так звані зразки-свідки.

1.2 Методи визначення часу плазмохімічного травлення, що використовують «зразки-свідки»

До останніх найчастіше відносять резистивний метод визначення часу плазмохімічного травлення та метод кварцового резонатора або метод кварцових мікротерезів [69]. Щодо резистивного методу, то він використовується при травленні струмопровідних плівок. В цьому випадку контрольний зразок-«свідок», являє собою відрізок діелектричної підкладки з двома контактними майданчиками, на яку нанесена металева плівка такої ж товщини, як і на підкладках, що обробляються. При повному видаленні металевої плівки зі «свідка» його опір різко зростає і процес травлення може бути зупинений ще до того, як матеріал підкладок буде пошкоджено.

На відміну від резистивного, метод кварцового резонатора заснований на зміні резонансної частоти кристала кварцу внаслідок зміни приєднаної маси при травленні в газорозрядній плазмі попередньо нанесених плівок матеріалів. Цей метод дозволяє реєструвати зміну ефективної товщини плівок будь-яких матеріалів, яка визначається як маса плівки поділена на площу і густину об'ємного матеріалу.

Незважаючи на свою універсальність, метод кварцового резонатора має низку суттєвих недоліків, які значно звужують можливості його використання на практиці. Насамперед, це малий строк служби дорогих кристалів кварцу і значне відхилення частоти вимірювального кристала від частоти еталонного кристала внаслідок різних умов, в яких знаходяться такі кристали. Крім того, при вимірюваннях в плазмі газового розряду ці кристали слід ретельно екранувати від електричних полів та заряджених частинок.

Серед чисельних контактних методів визначення часу плазмохімічних процесів найбільше застосування знайшов зондовий метод [70–77], який ґрунтується на використанні в якості первинного перетворювача зондів Ленгмюра [70, 78] і який дозволяє крім всього іншого вимірювати концентрацію електронів плазми та її потенціал і температуру.

Потенціал плазми є одним з головних параметрів технологічного процесу при плазмохімічному травленні різноманітних структур, оскільки прискорювальна напруга впливає як на профіль, так і на селективність цільового процесу травлення. Виміри, проведені за допомогою зонда Ленгмюра [70], показали, що з використанням елегазу SF_6 щільність плазми складає $1010 \dots 1012 \text{ см}^{-3}$, а потенціал плазми складає $5 \dots 9 \text{ В}$ при потужності 300 Вт і $26 \dots 30 \text{ В}$ при потужності 700 Вт . Крім щільності іонного струму, на швидкість і селективність травлення, як бачимо, впливає енергія іонів. Мала величина потенціалу плазми ($5 \dots 20 \text{ В}$) забезпечує низьке дефектоутворення – менше $0,05 \text{ см}^{-2}$.

Енергію іонів можна змінювати подачею на підкладкотримач напруги зсуву ($0 \dots -100 \text{ В}$). При напрузі зсуву в межах $-50 \dots -100 \text{ В}$ анізотропія досягає значення $1,0$, а іонний струм, яким забезпечується травлення, складається цілком з позитивних іонів. При зменшенні потенціалу зростає електронна складова, котра зменшує вертикальну складову швидкості травлення в SF_6 , що пов'язано зі збільшенням швидкості десорбції F на кремнієві пластини.

Не дивлячись на те, що в області використання електричних зондів для діагностування плазми накопичено багатий експериментальний і теоретичний матеріал [70–83], строгої універсальної теорії зондових вимірювань не існує, а побудовані теорії для окремих випадків

застосування зондів дуже складні. Окрім того, технологічна плазма, як правило, є нерівноважною, неоднорідною, неізотропною, хімічно активним середовищем, що обмежує використання стандартних зондових методик. Тому розробка зондових методик визначення часу плазмово-технологічних процесів являє собою достатньо складну науково-технічну задачу і потребує проведення широкого спектра досліджень технологічної плазми і специфіки роботи в ній електричних зондів.

1.3 Безконтактні методи визначення часу плазмохімічного травлення

Взагалі відмовитись від використання зразків-«свідків» дозволяють лише безконтактні методи визначення часу плазмохімічного травлення, принцип роботи яких ґрунтується не на дослідженні змін в структурі матеріалу, що обробляється в плазмі, а в дослідженні змін внутрішніх параметрів самої плазми. Наприклад, метод визначення електрофізичних параметрів газорозрядної плазми, який запропоновано в роботі [65] для реєстрації закінчення іонно-хімічного травлення плівок Al в плазмі CCl_4 , передбачає вимірювання імпедансу плазми між електродами, який зменшується в процесі травлення і приймає початкову величину після стравлювання Al. При реалізації цього методу ВЧ-потужність генератора (13,56 МГц), яка подавалась через LC-ланцюг на пару плоских електродів, підтримувалась на сталому рівні. При зміні імпедансу проміжку напруга на електродах теж змінюється. Таким чином, імпеданс можна контролювати по напрузі на електродах U . Експерименти показали, що чутливість методу, яка визначається як відношення напруги після (U_p) і під час ($U_{тр}$) травлення ($K=U_p/U_{тр}$), залежить головним чином від тиску, узгодження і кількості стравленої речовини. В розряді CCl_4 при зменшенні тиску імпеданс і добротність плазми збільшуються, а тому чутливість методу, яка дорівнює 1,3 при 8 Па, збільшується до 2,2 при 4 Па. Треба зазначити, що на чутливість цього методу значний вплив мають і параметри електричного узгоджувального кола.

Подібним чином вирішена проблема визначення часу травлення і в роботі [84], де запропоновано метод визначення закінчення плазмохімічного травлення шляхом вимірювання відбитої потужності в реакторі.

У прикладі практичного здійснення цього винаходу сказано, що підкладка, з якої необхідно видалити шар фоторезисту, завантажується в плазмовий реактор. Несучий газ з воднем вдувається в реактор таким чином, щоб заповнити простір, що оточує підкладку, і зберегти

тиск у межах: приблизно від 26,654 до 199,983 Па (0,2...1,5 мм рт. ст.). Підкладка, вкрита фоторезистом, підігрівається. Потужність високої частоти підводиться до плазмового реактора таким чином, щоб утворити плазму водню, що вступає в реакцію з фоторезистом, видаляючи його. Потужність, відбита реактором назад до джерела живлення, піддається вимірюванню, а за зміною цієї відбитої потужності виявляють кінець реакції, тобто момент завершення операції очищення.

На рис. 1.1 наведена високочастотна схема для плазмохімічного реактора. Джерело живлення 1 приєднується до внутрішнього електрода 6 ланцюгом узгодження 2. Потужність, що підводиться від джерела живлення 1, вимірюється вимірювачем потужності 3. Вхідний імпеданс, що виявляють в реакторі, є функцією навантаження в реакційній камері. Зміна утримувача підкладок чи їх числа призводить до зміни імпедансу. Для компенсації цього змінного вхідного імпедансу узгоджувальний ланцюг 2 регулюється таким чином, щоб максимально зменшити відбиту потужність, виміряну вимірювачем потужності 4. Відбита потужність може також реєструватися на стрічці самописного приладу 5, який записує показання вимірювача відбитої потужності.

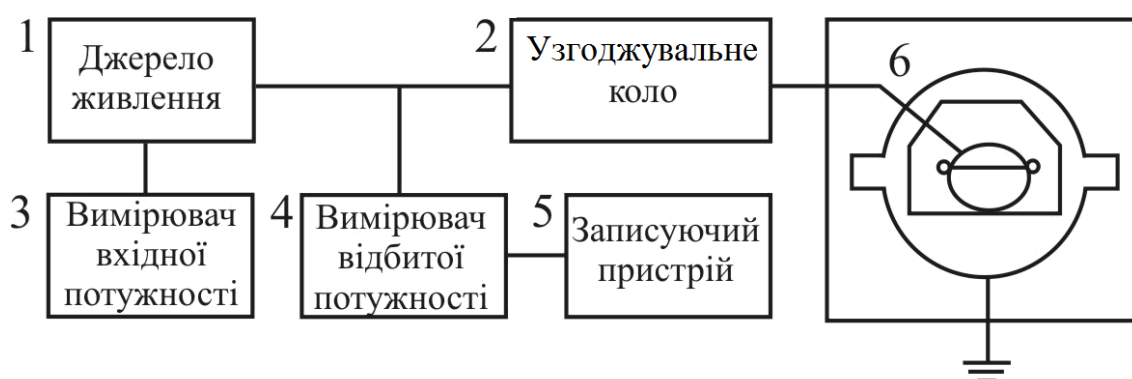


Рисунок 1.1 – Схематичний вигляд органів керування реактором і засобів для визначення кінця реакції [84]

В процесі технологічного дослідження цього методу було виявлено, що визначення відбитої потужності забезпечує надійне визначення кінця реакції. Наявність продуктів реакції в реакційній камері змінює ефективний повний опір, призводить до неузгодженості узгоджувального ланцюга і збільшує відбиту потужність.

На рис. 1.2 наведено типовий запис, зроблений самописним приладом 5, що показує відбиту потужність як функцію часу. Спочатку відбита потужність регулюється до одержання мінімального значення 7. Після початку очищення відбита потужність зростає, як пока-

зано позицією 8, в результаті неузгодженості високочастотної схеми, а потім досягає максимального значення, як показано позицією 9. При продовженні очищення відбита потужність падає до значення, зазначеного позицією 10, а потім знову зменшується до низького постійного значення, зазначеного позицією 11, після повного видалення фоторезисту. Допускається, щоб час плазмохімічної реакції трохи перевищував час травлення, наприклад, на дві хвилини, для того, щоб забезпечити повне видалення продукту.

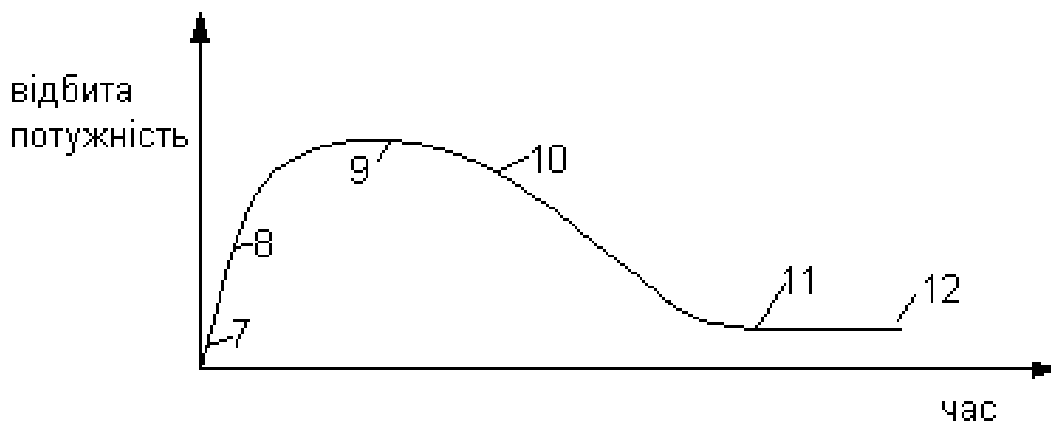


Рисунок 1.2 – Типовий запис, зроблений самописним приладом [84]

Основним недоліком методів вимірювання електрофізичних параметрів плазми є їх недостатня чутливість і висока його залежність від електричних параметрів системи живлення.

Одним з найбільш інформативних та ефективних на цей час методів визначення часу плазмохімічних процесів залишається мас-спектрометричний [85–88], який ґрунтується на технології розділення іонізованих атомів, молекул і радикалів в залежності від відношення маси іона до його заряду і подальшому вимірюванні відповідних іонних струмів.

Мас-спектрометричний аналіз по праву можна назвати самим універсальним методом визначення складу газових середовищ, тому він широко використовується для дослідження процесів, що протікають у газовій плазмі. Найбільш загальна схема мас-спектрометричних досліджень плазмохімічного травлення показана на рис. 1.3. Ця система, розроблена для вивчення частинок, що падають на підкладку в планарних діодних системах розпилення, дозволяє визначати як іонний склад плазми, так і концентрацію газоподібних продуктів реакції.

Іони, утворені в плазмі, витягаються через отвір у підкладкотримачі діаметром 0,8 мм, прискорюються від'ємним потенціалом циліндричного електрода, розташованого відразу ж під отвором, направляються в електростатичний аналізатор енергії з кутом відхилення 90°

і потім у квадрупольний мас-аналізатор. Отриманий спектр іонів, що містяться в плазмі при плазмохімічному травленні кремнію і двоокису кремнію, надає повну інформацію про всі проміжні і кінцеві газоподібні продукти, що утворюються в розряді. Електростатичний аналізатор енергії дозволяє вимірювати розподіл енергії іонів у плазмі і тим самим визначати її потенціал як у випадку розряду на постійному струмі, так і у високочастотному розряді.

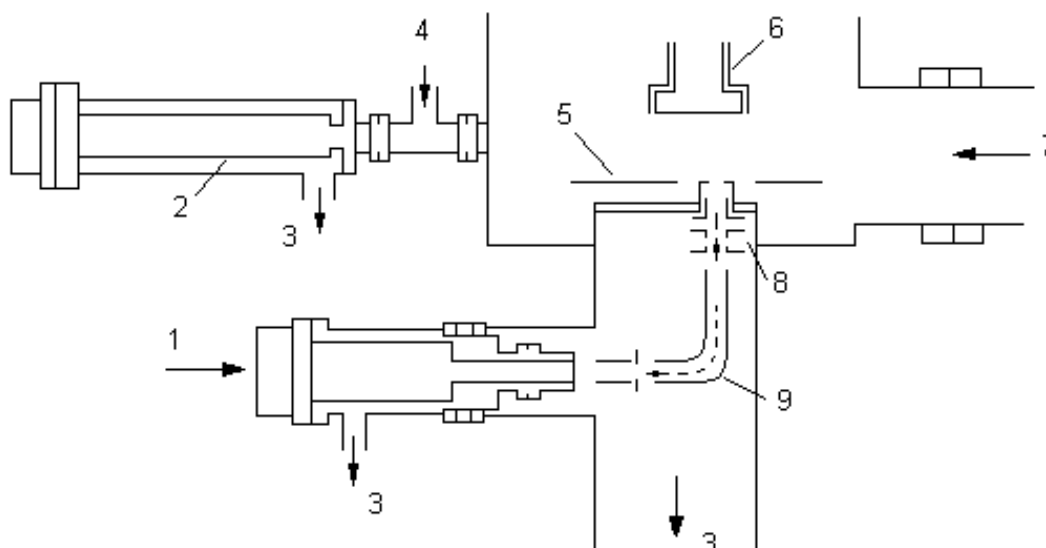


Рисунок 1.3 – Схема експериментальної системи для мас-спектрометричного методу визначення часу плазмохімічного травлення [85]: 1 – квадрупольний мас-аналізатор; 2 – квадрупольний мас-спектрометр; 3 – дифузійні насоси; 4 – пастка і механічний насос; 5 – підкладкотримач; 6 – збуджуючий високочастотний електрод (мішень); 7 – газовий потік; 8 – іонізатор; 9 – електростатичний аналізатор енергії іонів

Другий мас-спектрометр, підключений до системи, призначений для аналізу складу газоподібних продуктів реакції і визначення їхньої концентрації. Частина газового потоку, що відкачується з плазмохімічного реактора, через газовідбірний отвір діаметром 0,2 мм (рис. 1.4) надходить в іонне джерело мас-спектрометра, де під дією електронного удару молекули газу дисоціюють і іонізуються. Маса іонів і інтенсивності одержуваних іонних струмів вимірюються квадрупольним мас-аналізатором. Вакуум у мас-спектрометричних аналізаторах складає $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па, у той час, як у плазмохімічних установках тиск газів, що травлять, досягає 1...100 Па. Тому, щоб вимірювані концентрації продуктів реакції відповідали дійсним, до систем газовідбору і вакуумної відкачки мас-спектрометра пред'являються визначені вимоги [85].

Треба зазначити, що сучасні мас-спектрометри (квадрупольні і часопротітні) дозволяють фіксувати найменші зміни концентрації продуктів реакції, наявність яких в газі, що відкачується, є безсумнівним свідченням протікання процесу травлення відповідного матеріалу. Поява будь-якого піка в спектрі вказує на початок травлення, а його зникнення – на видалення шару матеріалу, що травиться. Для визначення часу травлення плівок Si, SiO₂ і Si₃N₄, що дають той самий кремнійвмісний продукт травлення SiF₄, можна використовувати розходження у швидкостях травлення і, отже, різну інтенсивність виходу SiF₄, що характеризується при мас-спектрометричному методі визначення часу травлення піком іона SiF³⁺.

Зрозуміло, що для визначення моменту закінчення плазмохімічного травлення шарів система прямого відбору газу з плазми (рис. 1.3) є громіздкою і вимагає спеціального оснащення розрядної камери. У зв'язку з цим були розроблені спеціальні системи, наприклад, фланцева система для аналізу залишкових газів і управління плазмохімічними процесами [86] моделі SS-20. Проста портативна система з габаритами 46×30,5×15 см, що має чутливість і час реакції на зміни тиску в камері, прийнятні для визначення часу плазмохімічного травлення, для стикування з різними установками плазмохімічної обробки постачається спеціальним фланцем на три канали з різною вакуумною провідністю. Це дозволяє використовувати систему для аналізу залишкових газів у плазмохімічному реакторі, аналізувати газ, відкачується з реактору у системах як з малим (0,1...3 Па), так і з відносно високим (більше 2,7 Па) тиском газу, що травить. При роботі з багатоканальним селектором піків система дає можливість одночасно стежити за зміною концентрації різних продуктів і здійснювати не тільки управління технологічними процесами, але і дослідження плазмохімічного травлення. У цьому випадку реактор виконує роль «чорної скриньки», з якої надходить інформація у вигляді складу вхідних і вихідних газів [86].

Таким чином, за допомогою мас-спектрометричного аналізу можна розв'язувати такі задачі при плазмохімічному травленні:

- забезпечувати відтворюваність технологічного циклу травлення за рахунок постійного контролю залишкових газів у розрядній камері;
- виявляти й усувати течії у вакуумних системах установок плазмохімічного травлення;
- здійснювати контроль чистоти і складу газового травника;
- чітко (у межах ±3 нм) визначати момент закінчення травлення шарів.

В той же час практична реалізація мас-спектрометричного методу в умовах існуючого в нашій країні економічного спаду досить не проста. Річ в тому, що мас-спектрометри, виробництво яких освоєно

деякими нашими підприємствами (наприклад, високочастотний однопільний мас-спектрометр-аналізатор типу РОМС-8 [80]), працюють, здебільшого, при досить низьких тисках газу (10^{-2} Па і менше), що значно ускладнює всю систему газовідбору для мас-спектрального аналізу. Крім того, вартість таких систем досить висока (до кількох сотень тисяч грн), що економічно не завжди бажано.

1.4 Оптичні методи визначення часу плазмохімічного травлення

До оптичних методів визначення часу плазмохімічного травлення відносяться фотометричний, метод оптико-акустичної спектроскопії та емісійно-спектральний методи.

Для визначення моменту закінчення процесу травлення плівок з різними оптичними сталими досить часто використовується фотометричний метод, в основу якого покладено вимірювання коефіцієнта відбиття оптичного променя.

Так, наприклад, цей метод використовувався для визначення часу іонно-плазмового травлення в роботі [65]. Джерелом світла в цьому випадку слугував He-Ne-лазер, промінь якого крізь вікно спостереження спрямовувався в вакуумну камеру і за допомогою дзеркал і мікрометричних гвинтів юстирувався на поверхні зразка, а відбиваючись від неї, попадав в оптичний детектор. Закінчення травлення кожного шару багат шарової структури (Au-CdS-скляна підкладка) відмічалось за рахунок помітної зміни коефіцієнта відбиття.

Треба зазначити, що цей метод досить простий і достатньо інформативний, оскільки дозволяє визначати параметри плазмохімічного травлення в реальному масштабі часу. В той же час метод має і свої недоліки. Так, в цитованому вище повідомленні відмічалось, що в процесі травлення шару Au мало місце зниження коефіцієнта відбиття. Самі дослідники пояснюють цей факт зростанням жорсткості поверхні при інтенсивному іонному бомбардуванні. Крім того, топологія структури не завжди дозволяє використовувати для визначення часу травлення окремі її елементи внаслідок її невеликих розмірів, а це примушує використовувати зразки-«свідки», які повинні бути аналогічними по відношенню до технологічних зразків як за структурою, так і напилені в тій же послідовності.

Певний інтерес викликає також метод лазерної оптико-акустичної спектроскопії плазми [88]. При поглинанні речовиною випромінювання з модульованою інтенсивністю утворюються теплові хвилі, які можна реєструвати за інтенсивністю звуку, що виникає внаслідок теплового розширення. Це явище, оптико-акустичний ефект, виявлене Белом ще в

1880 р., лежить в основі оптико-акустичної спектроскопії, що стала останнім часом розповсюдженим методом дослідження різних фізичних властивостей газів, рідин, твердих тіл і біологічних об'єктів. Метод дозволяє вимірювати, наприклад, значення коефіцієнта поглинання світла в діапазоні $10^{-7} \dots 10^6 \text{ см}^{-1}$. Розкладання молекул на складові атоми в процесі термічної іонізації й утворення плазми руйнують структуру енергетичних рівнів молекул. В іонізованих атомах в плазмі виникають нові рівні, що були відсутніми в атомах і молекулах нейтрального газу. У випадку, коли лазерний промінь проходить через газове середовище, практично не поглинаючись, оптико-акустичний сигнал малий і складається в, основному, із шумів. При порушенні параметрів газового розряду з неізотермічною плазмою, в якій може існувати слабо затухаюча звукова хвиля, іонізовані атоми можуть резонансно поглинати лазерне випромінювання. При домінуючій ролі безвипромінювального каналу релаксації поглинання випромінювання викликає періодичне нагрівання середовища і збуджує у ній акустичні коливання. В низькотемпературній плазмі лише невелика частина атомів чи молекул знаходиться в іонізованому стані. Якщо розглядати іони як деяку домішку в газі, то аналітичні можливості оптико-акустичного методу і, в першу чергу, висока концентраційна чутливість дозволять упевнено реєструвати оптико-акустичний сигнал плазми. Подібний експеримент можна реалізувати, узявши, наприклад, в якості газу аргон і використовуючи одну з придатних довжин хвиль випромінювання аргонового лазера, що працює на переходах між високозбудженими станами іонів, Ar^+ , Ar^{2+} і Ar^{3+} . У цьому випадку випромінювання, що не поглинається атомами нейтрального газу, буде резонансно поглинатися збудженими іонами в плазмі. Імовірність безвипромінювальної рекомбінації, а отже, і величину оптико-акустичного сигналу, можна збільшити, ввівши в газ домішку, наприклад, азот. Конструкція газорозрядної трубки для реєстрації оптико-акустичного сигналу зображена на рис. 1.4.

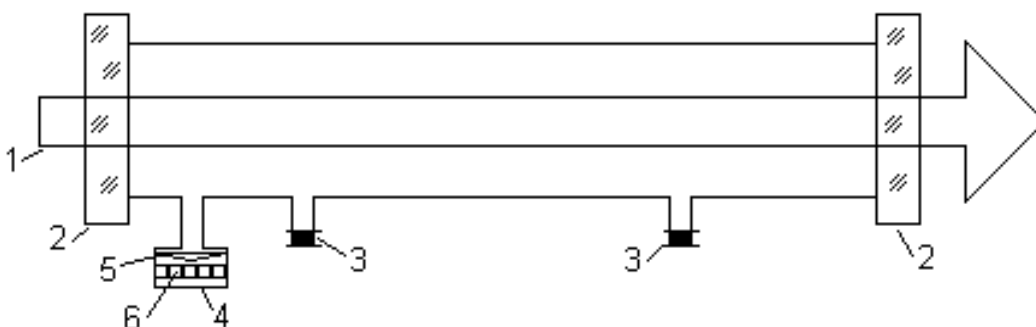


Рисунок 1.4 – Конструкція газорозрядної трубки для реєстрації оптико-акустичного сигналу [89]: 1 – лазерний промінь; 2 – вікна; 3 – електроди; 4 – мікрофон; 5 – мембрана; 6 – нерухомий електрод з отворами

Основним недоліком запропонованої системи є, насамперед, недостатня вивченість покладеного в її основу фізичного явища стосовно складних молекул плазмоутворювального газу, що суттєво гальмує процес впровадження оптико-акустичної діагностики в сучасну технологію управління плазмохімічними процесами.

Високим ступенем інформативності і технологічності вирізняється також досить популярний метод емісійної спектроскопії [45, 89–94]. В основі цього методу лежить реєстрація оптичного спектра власного випромінювання збуджених в плазмі атомів і молекул.

Піонерами в застосуванні емісійно-спектрального методу для визначення моменту закінчення процесів плазмового травлення можна вважати авторів роботи [89], які, досліджуючи ультрафіолетове випромінювання радіочастотної оксидної плазми, що використовувалась для травлення органічних речовин (зняття негативної фоторезистивної маски), запропонували використовувати в якості інформаційного сигналу для визначення моменту закінчення технологічного процесу власне оптичне випромінювання плазми, а саме випромінювання спектральних смуг молекул CO і радикалів OH, які є продуктами травлення матеріалу фоторезисту, на довжинах хвиль 283,0 та 297,7 нм. Схема для реалізації такого методу (рис. 1.5) виявилась достатньо простою і, як на той час, досить ефективною.

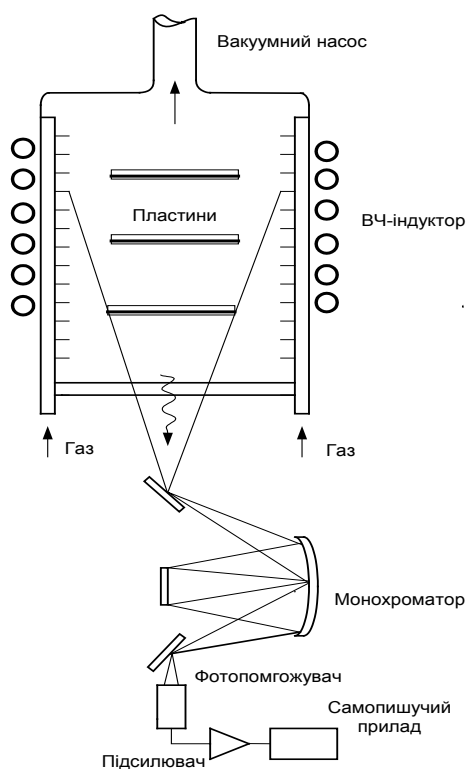


Рисунок 1.5 – Схема емісійно-спектрального методу визначення часу плазмохімічного травлення [89]

Вона включала кварцовий плазмовий реактор, крізь прозору стінку якого власне випромінювання плазми виводилось за межі розрядної камери, а також монохроматора, де виділялось необхідне для аналізу випромінювання на певній довжині хвилі (наприклад, на довжині хвилі 297,7 нм), фотопомножувача, де ця частка випромінювання перетворювалась в електричний сигнал підсилювача, з виходу якого інформаційний сигнал подавався на самописний прилад, де і реєструвалась зміна інтенсивності цього випромінювання по відношенню до фонового сигналу (рис. 1.6).

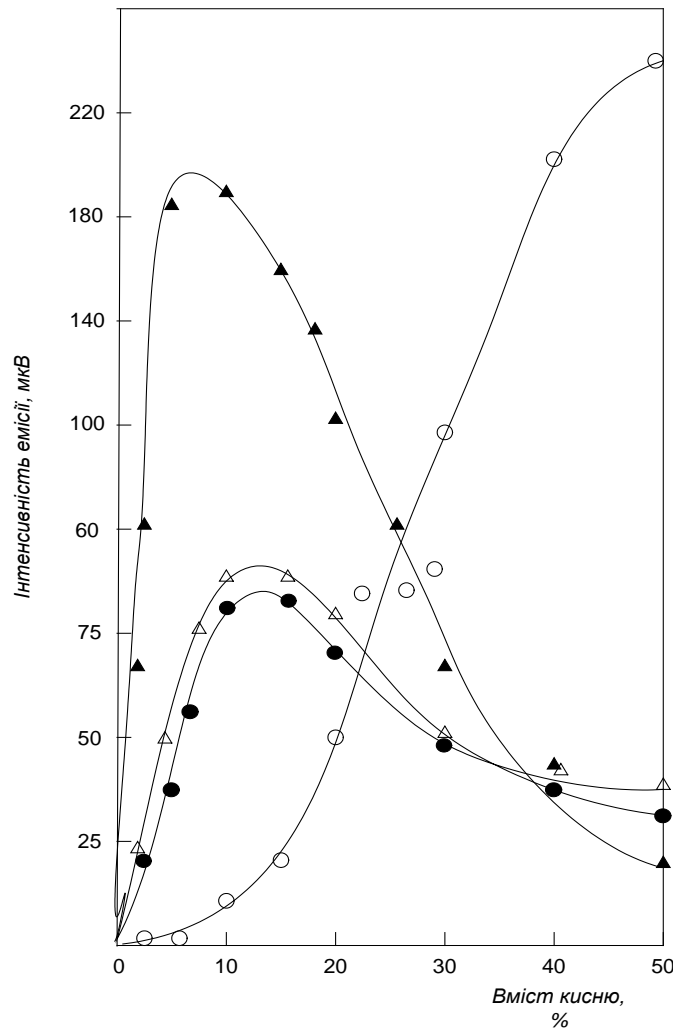


Рисунок 1.6 – Залежність інтенсивності емісії від вмісту кисню [89]

Аналогічні дослідження були проведені і при травленні Si, poly-Si, SiO₂ і Si₃N₄ [90, 91] в плазмі CF₄ та CF₄+O₂. Так, для визначення часу тривалості процесу травлення кремнію було запропоновано використати крім смуги CO (система Ангстрема, перехід ВΣ–АП з довжиною хвилі $\lambda = 482$ нм) спектральну лінію F* (випромінюючий перехід 3s12p – 3p2p, $\lambda = 703,7$ нм). Використання в якості інформаційного сигналу випромінювання атомарного хлору, який не є продуктом

травлення, в цій роботі пояснюється кореляцією швидкості травлення кремнію з інтенсивністю оптичної емісії атомів F*, яка була виявлена авторами цієї роботи експериментально при дослідженні процесу травлення кремнієвих пластин в плазмі чотирифтористого вуглецю як з додаванням кисню, так і при збільшенні потужності височастотного розряду.

При виготовленні інтегральної мікросхеми важливим елементом є формування відповідних металевих з'єднань окремих елементів майбутньої мікросхеми, основним матеріалом яких і на наш час залишається алюміній.

На рис. 1.7 показано спектр випромінювання плазми CCl_4 при плазмовому травленні Al [95, 96]. Оскільки лінії атомарного Al не завжди можна зареєструвати, особливо при малих площах алюмінієвої плівки, для визначення кінцевого моменту травлення було обрано спектральну смугу AlCl з $\lambda = 261,4$ нм.

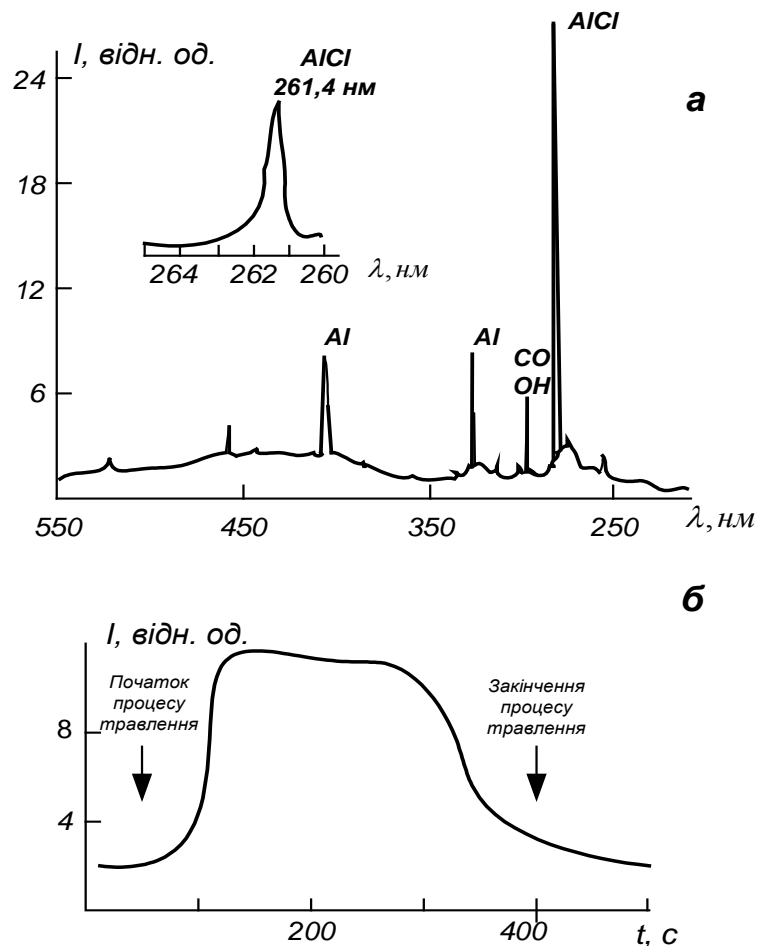


Рисунок 1.7 – Визначення моменту закінчення плазмохімічного травлення алюмінієвої плівки [95]: а – спектр випромінювання плазми CCl_4 ; б – зміна інтенсивності лінії AlCl при плазмохімічному травленні плівки Al

ЛІТЕРАТУРА

1. Викулин И. М. Полупроводниковые датчики / И. М. Викулин, В. И Стафеев. – М. : Советское радио, 1975. – 104 с.
2. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И Стафеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 263 с.
3. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-Прес. – Т. 1. – 2002. – 475 с.
4. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-Прес. – Т. 2. – 2003. – 592 с.
5. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-Прес. – Т. 3. Книга 1. – 2007. – 246 с.
6. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-Прес. – Т. 3. Книга 2. – 2007. – 364 с.
7. Кошовий М. Д. Пристрої та системи для вимірювання тиску / М. Д. Кошовий, Т. Г. Рожнова // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 157–158.
8. Кошовий М. Д. Построение информационно-измерительных систем с коммутацией каналов / [М. Д. Кошовий, А. Г. Михайлив, А. С. Кулик, Т. Г. Рожнова] // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2003. – Вип. 19. – С. 141–145.
9. Костенко В. Л. Исследование твердотельных структур для датчиков специализированных информационно-измерительных систем / В. Л. Костенко, Р. В. Нягу // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2007. – Спецвипуск. – С. 185–187.
10. Кухарчук В. В. Елементи контролю динамічних параметрів електронних машин / Василь Васильович Кухарчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 127 с.

11. Манойлов В. Ф. Неинвазивный метод определения вязкостных свойств крови по параметрам пульсовой волны / В. Ф. Манойлов, Т. Н. Никитчук // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: 15-я международная Крымская конференция, 12–16 сентября 2005 г.: матер. конф. – Севастополь, 2005. – Т. 2. – С.902 – 903.
12. Скрипник Ю. О. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НДЧ-діапазону / Ю. О. Скрипник, В. Ф. Манойлов, О. П. Яненко. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 374 с.
13. Вимірювання температури: теорія та практика / [А. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник]. – Львів : Бескід БІТ, 2006. – 559 с.
14. Енциклопедія термометрії / [Луцик А. Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І.]. – Львів : Видавництво національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 414 с.
15. Осадчук В. С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / Владимир Степанович Осадчук. – К. : Вища школа, 1987. – 155 с.
16. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів та транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 275 с.
17. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 195 с.
18. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 208 с.
19. Осадчук В. С. Сенсори тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 2007 с.
20. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 162 с.
21. Осадчук А. В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением / Александр Владимирович Осадчук. – Винница : Континент, 1998. – 129 с.

22. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / Олександр Володимирович Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 302 с.
23. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 184 с.
24. Пістун Е. П. Нормування витрат змінного перепаду тиску / Е. П. Пістун, Л. В. Лесовой. – Львів : Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв, 2006. – 570 с.
25. Поджаренко В. О. Оцінка статистичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань / В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук // Вісник державного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. – 2001. – № 420. – С. 37–47.
26. Бабичев Г. Г. Вертикальный двухколлекторный транзистор с ускоряющими полями в базе и эмиттере / Г. Г. Бабичев, С. И. Козловский, В. А. Романов // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33. – № 3. – С. 370–379.
27. Кремниевый однопереходной тензотранзистор / [Г. Г. Бабичев, С. И. Козловский, В. А. Романов, Н. Н. Шаран] // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – № 2. – С. 66 – 71.
28. Скрипник Ю. А. Частотно-дисперсійні аналізатори складу та властивостей матеріалів та речовин / Ю. А. Скрипник, Д. Б. Головка, К. Л. Шевченко. – К. : МП ЛЕСЯ, 2002. – 182 с.
29. Скрипник Ю. А. Методи і засади частотно-дисперсійного аналізу речовин та матеріалів / Ю. А. Скрипник, Д. Б. Головка. – К. : Фаза-ЛТД, 2000. – 198 с.
30. Шарапов В. М. Трехкоординатный пьезоэлектрический акселерометр / В. М. Шарапов, А. Н. Гурский, Н. Ю. Плосконос / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2007. – Спец-випуск. – С. 258–260.
31. Шарапов В. М. Симметричный биморфный пьезокерамический преобразователь с линейной амплитудно-частотной характерис-

тикой / В. М. Шарапов, Ю. Ю. Балковская / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – № 3. – С. 43–46.

32. Арутюнян В. М. Микроэлектронные технологии – магистральный путь для создания химических твердотельных сенсоров / В. М. Арутюнян // Микроэлектроника. – 1991. – № 4. – С. 337–355.

33. Аш Ж. Датчики измерительных систем. В 2-х томах / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – Т. 1. – 424 с.

34. Бутурлин А. Н. Микроэлектронные датчики влажности. Сборник обзоров / А. Н. Бутурлин, С. А. Крутоверцев, Ю. Д. Чистяков // Зарубежная электроника. – 1984. – № 9. – С. 3–54.

35. Бутурлин А. Н. Влияние режимов получения на структуры пиролитических пленок оксида олова и на их газочувствительные свойства / А. Н. Бутурлин, Т. А. Габузьян, Н. А. Голованов // Полупроводниковые материалы. Сб. научн. тр. – М. : МИЭТ. – 1984. – С. 95–98.

36. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб. – М. : Мир, 1989. – 196 с.

37. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества / П. П. Кремлевский. – М. : Машиностроение, 1975. – 776 с.

38. Кремлевский П. П. Расчет и конструирование расходомеров / П. П. Кремлевский. – М. : Машиностроение, 1978. – 224 с.

39. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кноринг, В. С. Гутников. – М. : Энергия, 1970. – 424 с.

40. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Туричин. – М. : Госэнергоиздат, 1959. – 684 с.

41. Измерение параметров цифровых интегральных микросхем / Под ред. чл. кор. АН Литовской ССР Д. Ю. Эйдукаса и канд. техн. наук Б. В. Орлова. – М. : Радио и связь, 1982. – 367 с.

42. Філінюк М. А. Аналіз впливу зворотного зв'язку на параметри негatronу в польовому транзисторі / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 6. – С. 94–97.

43. Филинюк Н. А. Краткий исторический обзор развития научного направления «Негатроника» / Николай Антонович Филинюк //

Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 3. – С. 38–43.

44. Філінюк М. А. Дослідження енергетичних властивостей не-лінійної індуктивності / М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 2. – С. 44–46.

45. Осадчук В. С. Оптичний емісійно-спектральний контроль процесів травлення в низькотемпературній плазмі / В. С. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Даниленко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – № 2. – С. 173–180.

46. Мікроелектронний оптичний перетворювач для контролю плазмохімічних процесів / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Селецька] // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 6. – С. 117–121.

47. Визначення вольт-амперної характеристики частотного оптичного перетворювача для контролю плазмохімічних процесів / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Селецька] // Перспективні напрацювання науки і техніки: IV міжнародна науково-практична конференція, 07–15 листопада 2008 р.: матеріали конф. – Пшемишль, 2008. – С. 75–80.

48. Осадчук В. С. Оптичний мікроелектронний перетворювач з фототранзистором для контролю плазмохімічних процесів / В. С. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Селецька // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 5. – С. 226–231.

49. Оптичний мікроелектронний оптичний перетворювач з активним індуктивним елементом для контролю плазмохімічних процесів / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Селецька] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 6. – С. 94–100.

50. Вольт-амперна характеристика частотного оптичного перетворювача з фототранзистором для контролю плазмохімічних процесів / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Селецька] // Сучасні проблеми мікроелектроніки, радіоелектроніки, телекомуніка-

цій та приладобудування: 4-та міжнародна науково-технічна конференція, 8–9 жовтня 2009 р.: тези доповіді. – Вінниця, 2009. – С. 81.

51. Осадчук В. С. Частотний оптичний перетворювач для контролю плазмохімічних процесів / В. С. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Селецька // Вісник Хмельницького Національного Університету. – 2008. – № 4. – С. 160–163.

52. Оптичний перетворювач з частотним виходом / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Селецька] // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: междунар. научно-техн. конференция, 15–25 декабря 2008 г.: материалы конф. – Одесса, 2008. – С. 6–9.

53. Пат. України № 4229, H01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю. С., Даниленко О. О.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № 2004032002; заявл. 18.03.04; опубл. 17.01.05, Бюл. № 1.

54. Пат. України № 9698, H01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю. С., Даниленко О. О.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № 200502275; заявл. 14.03.05; опубл. 17.10.05, Бюл. № 10.

55. Пат. України № 4413, H01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю. С., Даниленко О. О.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № 20040503420; заявл. 06.05.04; опубл. 17.01.05, Бюл. № 1.

56. Пат. України № 9700, H01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко Ю. С., Даниленко О. О.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200502296; заявл. 14.03.05; опубл. 17.10.05, Бюл. № 10.

57. Даниленко О. О. Математична модель емісійно-спектрального частотного перетворювача / Ю. С. Кравченко, О. О. Даниленко // Фотоніка-ОДС-2005: 3-тя міжнародна науково-технічна конференція, 27–28 квітня 2005 р.: тези доповіді. – Вінниця, 2005. – С. 218.

58. Даниленко О. О. Математична модель емісійно-спектрального частотного перетворювача [Електронний ресурс] /

Ю. С. Кравченко, О. О. Даниленко // Наукові праці. – 2007. – № 1. – Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2007-1/ru/07kusefc_ru.pdf.

59. Осадчук О. В. Оптический перетворювач для визначення часу плазмохімічних процесів / О. В. Осадчук, Ю. С. Кравченко, О. О. Се- лецька // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: міжнародна науково-технічна конференція. – Вінниця, 19–21 травня 2010 р.: тези доповіді. – Вінниця, 2010. – С. 279.

60. Таруи Ясуо. Основы технологии СБИС: пер.с япон. / Ясуо Таруи; [под. ред. В. Г. Ржанова] – М. : Радио и связь, 1985. – 480 с.

61. Данилин В. С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов / В. С. Данилин, В. Ю. Киреев. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.

62. Орликовский А. А. Диагностика in situ плазменных технологических процессов микроэлектроники: Современное состояние и перспективы. Часть IV / А. А. Орликовский, К. В. Руденко, Я. Н. Суханов // Микроэлектроника. – 2001. – Т. 30. – № 6. – С. 403–433.

63. Орликовский А. А. Проблемы плазмохимического травления / А. А. Орликовский, Д. И. Словецкий // Микроэлектроника. – 1987. – № 6. – Т. 16. – С. 497–512.

64. Контроль процессов травления материалов в низкотемпературной газоразрядной плазме / [В. С. Данилин, В. Ю. Киреев, В. А. Каплин и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1980. – № 1. – С. 13–28.

65. Исследование и контроль плазмохимических процессов / [Н. К. Юдина, М. С. Чупахин, Э. А. Лебедев, Н. Н. Федоров] // Зарубежная электронная техника. – 1980. – Вып. 3 (223). – С. 3–54.

66. Руденко К. В. Диагностика плазменных технологических процессов микро- и наноэлектроники: автореф. дис. на соискание ученой степени докт. физ.-мат. наук : спец. 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» [Электронный ресурс] / Константин Васильевич Руденко. – М., 2007. – 45 с. – Режим доступу до автореф.:

http://vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/vak/announcements/fiz_mat/RydenkoKV.pdf

67. Пат. України № 6260, С23F 1/00. Пристрій для плазмохімічного травлення матеріалів / Будянський О. М., Покроєв А. Г., Фареник В. І., Плетньов В. М.; заявник та патентовласник Харк. держц. техн. ун-т. – № 4351608/SU; заявл. 28.12.87; опубл. 29.12.94, Бюл. № 8.

68. Контроль процессов травления материалов в низкотемпературной газоразрядной плазме / [В. С. Данилин, В. Ю. Киреев, В. А. Каплин, Э. М. Врублевський] // Приборы и техника эксперимента. – 1980. – № 1. – С. 13–28.

69. Новосядлый С. П. Плазменная технология формирования субмикронных структур БИС / С. П. Новосядлый // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 6. – С. 57–63.

70. Дудин С. В. Оборудование для зондовой диагностики и контроля плазменных технологических процессов / С. В. Дудин, А. П. Яцков, В. И. Фареник // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 3. – С. 43–49.

71. Чан П. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме / П. Чан, Л. Тэлбот, К. Турян. – М. : Мир, 1978. – Т. 1. – 234 с.

72. Чан П. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме. / П. Чан, Л. Тэлбот, К. Турян. – М. : Мир, 1978. – Т. 2. – 256 с.

73. Алексеев Б. В. Зондовый метод диагностики плазмы. / Б. В. Алексеев, В. А. Котельников. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 142 с.

74. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме / О. В. Козлов. – М. : Атомиздат, 1989. – 135 с.

75. Чен Ф. Электрические зонды / Ф. Чен. // В кн.: Диагностика плазмы. – М. : Мир, 1967. – 438 с.

76. Пат. України № 41790, H01L 21/02. Спосіб плазмохімічного травлення напівпровідникових пластин / Каракулова А. І., Кравченко С. Ю., Кравченко Ю. С.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200814785; заявл. 22.12.08; опубл. 10.06.09, Бюл. № 11.

77. Пат. України № 31519, H01L 21/302. Спосіб визначення моменту закінчення процесу плазмохімічного травлення / Кравченко Ю. С., Дудник Д. П.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200714245; заявл. 17.12.07; опубл. 10.04.08, Бюл. № 7.

78. Зондовая диагностика плазмы вч и свч источников в иммерсионном ионном имплантере [Электронный ресурс] / [С. Н. Аверкин, А. П. Ершов, А. А. Орликовский и др.] // XXX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС: междунар. науч.-техн. конференция, 24–28 февр. 2003 г.: тезисы докл., 2003. – Режим доступа до журн.: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXX/Pt/ru/AZ-Sukhanov.doc>

79. Дудин С. В. Исследование ионно-пучковой плазмы, создаваемой широким потоком ионов низкой энергии / С. В. Дудин. – Харьков : Препринт НФТЦ, 1994. – 124 с.

80. Дудин С. В. Экспериментальное исследование ионно-пучковой плазмы / С. В. Дудин, А. В. Зыков, В. И Фареник. – Харьков : Препринт НФТЦ, – 1994. – 143 с.

81. Дудин С. В. Специфика диагностики параметров плазмы электрическими зондами в процессах ионно-лучевого и плазмохимического травления / С. В. Дудин // В сб.: Ионно-лучевая обработка материалов в микро- и нанoeлектронике. – М. : Наука, 1999. – С. 86–116.

82. Мяконьких А. В. Мониторинг плазмохимических процессов формирования микро- и наноструктур методами зондовой диагностики: автореф. дис. на соискание ученой. степени канд. физ.-мат. наук. наук : спец. 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» [Электронный ресурс] / Андрей Валерьевич Мяконьких. – М., 2009. – 26 с. – Режим доступа:

<http://www.ftian.ru/dissovet/avtorefmyakonkikh.pdf>

83. Зондовые измерения параметров плазмы в сверхзвуковом потоке [Электронный ресурс] / [А. Ф. Александров, А. П. Ершов, С. А. Каменщиков и др.] // XXXV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС: междунар. науч.-техн. конфере-

нция, 11–15 февр. 2008 г.: тезисы докл., 2008. – Режим доступа : <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXV/Pt/ru/MY-Surkont.doc>

84. Диагностика плазмы: Пер. с англ. / Под ред. Р. Хадлстоуна, С. Леонарда. – М. : Мир, 1967. – 515 с.

85. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия / М. А. Ельяшевич. – М. : Изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 892 с.

86. Словецкий Д. И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме / Д. И. Словецкий. – М. : Наука, 1980. – 310 с.

87. Лисица В. С. Новые проблемы в спектроскопической диагностике плазмы / В. С. Лисица. [Электронный ресурс] // XXXIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС: междунар. науч.-техн. конф, 12–16 февр. 2007 г.: тезисы докл., 2007. – Режим доступа: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXIV/R/ru/RF-Lisitsa.doc>

88. Вардапетян Р. П. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия плазмы / Р. П. Вардапетян // Физика плазмы. – 1990. – Вып.7. – Т. 16. – С. 98–99.

89. Spectroscopic Study of Radiofrequency Oxygen Plasma Stripping of Negative Photoresists / [E. O. Degenkolb, C. J. Mogab, M. R. Goldrick, J. R. Griffiths] // Applied Spectroscopy. – 1976. – V. 30. – № 5. – P. 520–527.

90. Harshbarger W. R. Spectroscopic Analysis of R.F. Plasmas / W. R. Harshbarger, R. A. Porter // Solid State Technology. – 1978. – V. 21. – № 4. – P. 99–103.

91. Kadou H. End Point Detection in Plasma Etching by Optical Emission Spectroscopy / H. Kadou, T. Takachi // J. Electrochem. Soc. – 1980. – V. 127. – № 1. – P. 234–235.

92. Пат. Японії № 57-028334, H01L 21/302. Пристрій контролю процесу плазмового травлення / Мітсубісі денкі к. к. – 1989.

93. Пат. США № 5045149, H01L 21/302. Пристрій контролю процесу плазмового травлення / Хітачі лтд. – 1992.

94. Пат. України № 22675 H01L 21/306. Спосіб плазмового травлення оптично прозорих плівок оксиду індію та олова / Кравчен-

ко Ю. С., Плахотнюк М. М.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200706553; заявл. 11.06.07; опубл. 10.10.07, Бюл. № 16.

95. Curtis B. J. Optical End-Point Detection for the Plasma Etching of Aluminium / B. J. Curtis // *Solid State Technology*. – 1980. – Vol. 23. – № 4. – P. 129–132.

96. Curtis B. J. Some Experiments in Aluminium CCl_4 Plasma Etching with an Oscillating Quartz Microbalance / B. J. Curtis, H. R. Brunner // *ISPC – 5: 5 Int. Symp. Plasma Chem.*, Edinburgh, 10–14 Aug., – 1981. – P. 318–323. – Proc. 4 Symp. Plasma Process, San Francisco, Calif., Pennington, N.-J., 1983, May 8–13. – P. 300–309.

97. Пат. Японії № 58-56341, H01L 21/302. Пристрій контролю процесу плазмового травлення / Мацусіта денкі сангьо к. к. – 1990.

98. Смоланов Н. А. Оптическая диагностика катодной низкотемпературной плазмы в технологии получения нитрид-карбид-титановых соединений [Электронный ресурс] / Н. А. Смоланов, Н. А. Панькин, О. Ф. Четвертакова // XXXVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС: междунар. науч.-техн. конф, 9–13 февр. 2009 г.: тезисы докл., 2009. – Режим доступа: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVI/Pt/ru/ON-Smolanov.doc>

99. Пат. Японії № 56-129325, H01L 21/302. Пристрій для процесу сухого травлення / Фудзіцу к. к. – 1989.

100. Босяков М. Н. Спектральный метод контроля плазмохимического процесса удаления фоторезиста / М. Н. Босяков, А. А. Лабуда, Н. Н. Никифорова // *Электронная промышленность*. – 1979. – Вып. 7. – С. 27–30.

101. Таблицы спектральных линий / [А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев, С. М. Райский и др.] – М. : Наука, 1969. – 784 с.

102. *Donnees Spectroscopiques Concernant les Molecules Diatomiques* / Red. Generale B.Rosen. – Paris : Hermann & C°, 1951. – 366 p.

103. Пат. Японії № 60-60727, H 01L 21/302; G 01R 19/00. Спосіб і пристрій для визначення моменту закінчення травлення. – 1985.

104. Pat. USA № 4289188, H01L 21/306; C23F 1/00. Method and Apparatus for Monitoring Etching / Mizutani T. and all. – 1981.

105. Пат. Японії № 58-43521, Н 01L 21/302; С 23F 4/00; G 02B 5/22. Спосіб визначення моменту закінчення сухого травлення. – 1983.

106. Пат. України № 26976, H01L 21/302. Спосіб визначення моменту закінчення процесу плазмохімічного травлення / Кравченко С. Ю., Кравченко Ю. С., Осадчук В. С., Осадчук О. В.; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200706553; заявл. 11.06.07 ; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 16.

107. Гусев В. В. Индикаторы спектрального контроля плазмохимических процессов / В. В. Гусев, В. М. Долгополов, В. И. Иванов // Электронная промышленность. – 1983. – Вып. 6 (123). – С. 47–48.

108. Гусев В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев – М. : Высшая школа, 1982. – 495 с.

109. Дулин В. Н. Электронные и квантовые приборы / В. Н. Дулин. – М. : Энергия, 1972. – 220 с.

110. Лавриненко В. Ю. Справочник по электровакуумным и полупроводниковым приборам / В. Ю. Лавриненко. –К. : Техника, 1984. –410 с.

111. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. – М. : Сов. Радио, 1977. – 231 с.

112. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов / Я. А. Федотов. – М. : Высшая школа, 1980. – 390 с.

113. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – Вып. 2: Модели компонент аналоговых устройств. – 72 с.

114. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1 / С. Зи. – М. : Мир, 1984.– 456 с.

115. Ферри Д. Электроника ультрабольших интегральных схем / Д. Ферри, Л. Эйкерс, Э. Гринич. – М. : Мир, 1991. – 327 с.

116. Нерретер В. Расчет электрических цепей на персональных ЭВМ / В. Нерретер. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.

117. Мирский Г. Я. Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.
118. Свечников С. В. Элементы оптоэлектроники / С. В. Свечников. – М. : Сов. Радио, 1971. – 312 с.
119. Батушев В. А. Электронные приборы / В. А. Батушев – М. : Высшая школа, 1980. – 378 с.
120. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем: учебное пособие для вузов / А. С. Березин, О. Р. Мочалкина. – М. : Радио и связь, 1992. – 320 с.
121. Матсон Э. А. Конструирование и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. Учебное пособие / Э. А. Матсон, Д. В. Крыжановский, В. И. Петкевич. – Минск : Высшэйшая школа, 1979. – 192 с.
122. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок / Л. А. Коледов. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
123. Автомат плазмохимического удаления фоторезиста «Плазма – НД 125 ФМ». Утп. ПД. 3-003 / Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 3.240. 296. ТО. 1987.
124. Метрология и радиоизмерения в телекоммуникационных системах : учебное пособие / [Под. ред. В. Ф. Нефедова] – М. : Высшая школа, 2001. – 383 с.
125. Кукуш В. Д. Электрорадиоизмерения : учеб. пособие для вузов / В. Д. Кукуш. – М. : Радио и связь, 1985. – 368 с.
126. USB-частотомір / [О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. С. Звягин, Р. В. Криночкін] // Матеріали 6-ї міжнародної науково-практичної конференції «Дні науки – 2010». – 2010. – С. 32–34.
127. Метрологія та вимірювальна техніка / [В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, Л. В. Грумінська]. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252 с.
128. Пождаренко В. О. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка / В. О. Пождаренко, В. В. Кухарчук. – К. : НМК ВО, 1991. – 240 с.

129. Шагурин Н. Н. Микропроцессоры и микроконтроллеры фирмы Motorola : справочное пособие / Н. Н. Шагурин. – М. : Радио и связь, 1998. – 560 с.

130. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейный ИС / Дж. Гринфилд. – М. : Мир, 1992. – 545 с.

131. Электрические измерения : учебник для вузов. Изд. 4-е / [Под. ред. А. В. Фремке]. – М. : Энергия, 1973. – 474 с.

132. Кухарчук В. В. Оцінка статичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. О. Поджаренко // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. –2001. – № 420. – С. 37–45.

133. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования : учебник для вузов / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. – К. : Высшая школа, 1986. – 238 с.

Наукове видання

**Осадчук Володимир Степанович,
Осадчук Олександр Володимирович,
Селецька Олена Олександрівна**

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ОПТИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено О. В. Осадчуком

Підписано до друку 09.01.2013 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 9,24
Наклад 100 прим. Зам № 2013-003

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.