
ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

УДК 621.382

С. Ю. КРАВЧЕНКО, Ю.С. КРАВЧЕНКО, В.С. ОСАДЧУК

БАГАТОКАНАЛЬНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ОПТИЧНОГО ЕМІСІЙНО-СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТРАВЛЕННЯ МІКРОСТРУКТУР

*Вінницький національний технічний університет
95, Хмельницьке шосе, Вінниця, Україна*

Анотація: Розглянуті питання щодо підвищення ефективності контролю плазмохімічних процесів травлення мікроструктур за рахунок введення багатоканальних систем реєстрації та обробки спектру власного випромінювання нерівноважної плазми. Проаналізовані принципи побудови таких систем та перспективи їх використання в технологічних умовах.

Аннотация: Рассмотрены вопросы повышения эффективности контроля плазмохимических процессов травления микроструктур за счет введения многоканальных систем регистрации и обработки спектра собственного излучения неравновесной плазмы. Проанализированы принципы построения таких систем и перспективы их использования в технологических условиях.

Abstract: The problems of improving effective control of plasma etching of microstructures due to the introduction of multichannel systems of recording and processing of the own emission spectrum of a nonequilibrium plasma are considered. The principles of construction of such systems and the prospects for their use in technological terms are analyzed.

Ключові слова: контроль, багатоканальні системи, спектр випромінювання, плазма, мікропроцесорні системи, частотні перетворювачі

ВСТУП

Як уже зазначалось раніше [1, 2], плазмохімічні процеси травлення мікроструктур фактично безальтернативно забезпечують на даний час точність відтворення функціонального рельєфного рисунку на кремнієвих пластинах до Ш300 мм на рівні $\leq 0,13$ мкм (мінімальний топологічний розмір, який введено в останню редакцію International Technology Roadmap for semiconductor 1999 Edition) [1]. Такий високий рівень прецизійності, окрім застосування в мікроелектронній технології електронних та іонних методів літографії, операцій самосуміщення, новітніх розробок плазмової технології [3, 4], пов'язаний з використанням принципу безперервного моніторингу основних параметрів плазмохімічних процесів, які визначають його якісні показники та час проведення цільової технологічної операції [5, 6].

В основу розробок сучасних систем контролю за ходом технологічного процесу при плазмохімічному травленні мікроструктур здебільшого покладено метод, який ґрунтується на використанні емісійно-спектрального методу дослідження параметрів нерівноважної плазми [7 - 9].

Сутність даного методу [10] полягає в реєстрації і дослідженні оптичного спектру власного випромінювання збуджених атомів та молекул. Даний метод дозволяє визначати концентрацію і просторовий розподіл газових частинок в основному, метастабільному, іонізованому та збудженому станах, механізми і кінетику хімічних реакцій, що протікають в плазмі [11], а оптична спектроскопія має тут перевагу перед іншими методами діагностики і контролю, оскільки забезпечує оперативне отримання інформації про процеси в газовому розряді, не роблячи на нього впливу, тобто без втручання в хід плазмохімічних перетворень.

Однак, як це уже відмічалось у спеціальних дослідженнях [1, 2] при достатньо великому співвідношенні сигнал/шум відносно прості задачі контролю, наприклад, визначення моменту закінчення цільового процесу травлення, складності виникають по мірі зменшення площі пластини, яка піддається плазмовому травленню (в такому випадку складова шуму у співвідношенні сигнал/шум збільшується) [1].

За таких умов вирішення основної задачі (забезпечення ефективного і надійного контролю плазмохімічного процесу) можливе лише шляхом застосування нетрадиційних підходів як при реєстрації інформаційних сигналів, так і при їх обробці.

Одним з найбільш перспективних напрямків вирішення даної проблеми є використання багатоканальних систем контролю, які б враховували як сучасні тенденції розвитку плазмохімічної технології, так і можливості сучасної техніки контролю та обробки отриманої інформації.

Мета даної роботи - аналіз нових нетрадиційних підходів підвищення ефективності плазмохімічних процесів в мікроелектроніці на основі використання багатоканальних систем їх контролю.

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ

Класична схема [12] емісійно-спектрального контролю (рис. 1) є достатньо простою і, за умов великого співвідношення сигнал/шум досить ефективною. Вона складається з плазмового реактора, що крізь прозору стінку якого або спеціальне оптичне вікно власне випромінювання плазми виводиться за межі розрядної камери, оптичного спектрального приладу (монохроматор), за допомогою якого виділяється необхідне для аналізу і контролю випромінювання на певній довжині хвилі, фотопомножувача, де ця частка випромінювання перетворюється в електричний сигнал, підсилювача, з виходу якого інформаційний сигнал подається на самопишучий прилад, де і реєструвалася зміна інтенсивності даного випромінювання по відношенню до фонового сигналу

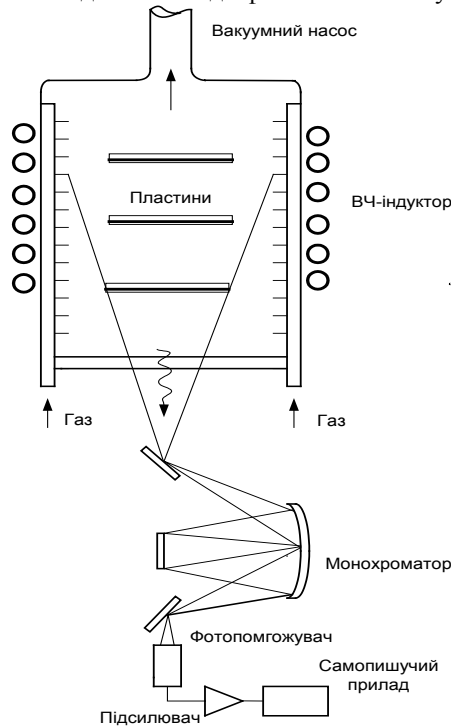


Рис. 1. Схема емісійно-спектрального контролю

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. 2 показано спектр випромінювання плазми CCl_4 при плазмовому травленні Al [13, 14]. 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. На рис. 2б показана зміна інтенсивності смуги 261,4 нм при травленні шару Al товщиною 1300 нм на підкладці площею 3×3 см². Після вмикання розряду деякий час триває перехідний період, після якого починається процес травлення, про що говорить швидке зростання інтенсивності. Спадання інтенсивності наприкінці травлення не є настільки швидким, що, за версією авторів [14], може бути

зумовлено геометричними факторами.

Треба зазначити, що для технічної реалізації емісійно-спектрального методу контролю немає необхідності використовувати такі громіздкі, дорогі і складні спектральні прилади як спектрограф чи монохроматор. В більшості випадків для виділення із загального спектру необхідної спектральної лінії або смуги досить застосування вузькосмугових інтерференційних світлофільтрів [14].

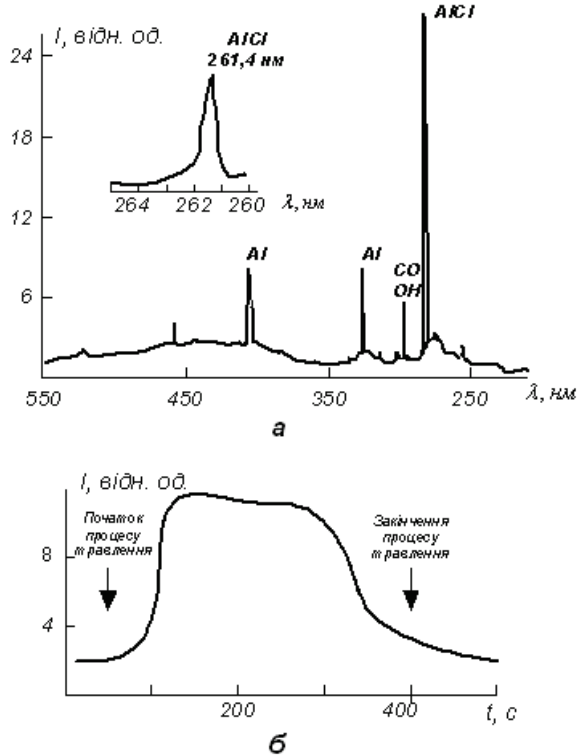


Рис. 2. Визначення моменту закінчення плазмохімічного травлення алюмінієвої плівки: а — спектр випромінювання плазми CCl_4 ; б — зміна інтенсивності лінії $AlCl$ при плазмохімічному травленні плівки Al

Суттєве підвищення ефективності контролю і його достовірності дає використання методу порівняння двох світлових сигналів, один з яких є інформаційним, а інший - фоновим [15, 16].

На рис.3 наведена схема двоканальної системи для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення [16], де світло, що випромінюється низькотемпературною плазмою, розділяють і окремо реєструють випромінювання, яке пройшло крізь спеціальну тонку плівку, що поглинає випромінювання, яке відповідає реакції травлення, і випромінювання, яке не пройшло через дану тонку плівку. Потім визначають різницю між цими двома сигналами, за якою і визначають момент закінчення цільового процесу.

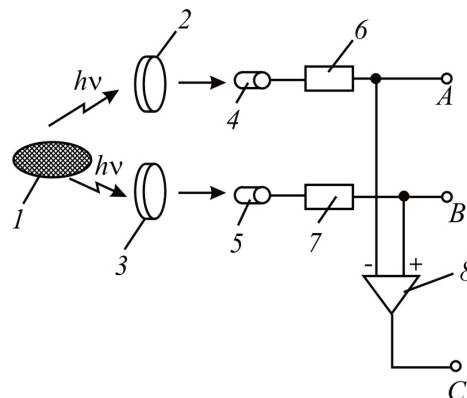


Рис. 3. Система для визначення моменту закінчення плазмового травлення: 1 – напівпровідникова пластина; 2, 3 – фільтри; 4, 5 – фотоелементи; 6, 7, 8 – підсилювачі

Для забезпечення автоматизації процесу плазмохімічної обробки та його контролю широко

використовуються елементи оптоелектроніки, мікропроцесорна та комп'ютерна техніка [17, 18].

Так на рис. 4 представлена схема двоканальної системи реєстрації спектру випромінювання плазми [17], де для виведення та аналізу власного випромінювання плазми використано оптичні світловоди та модулятор світлового потоку, а для порівняння інформаційного і фонового оптичних сигналів мікропроцесорна техніка і управляючий комп'ютер.

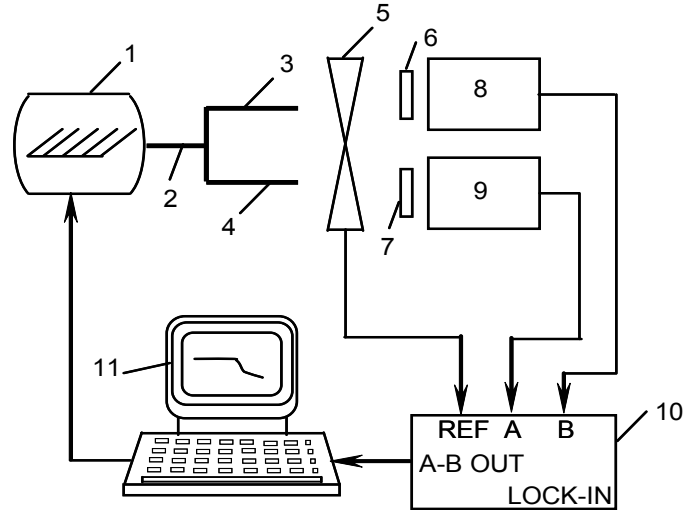


Рис. 4. Двоканальна система для визначення моменту закінчення плазмового травлення: 1 – плазмовий реактор; 2 - 4 – світловоди; 5 – модулятор; 6, 7 – інтерференційні фільтри; 8, 9 – фотоперетворювачі; 10 – блок порівняння; 11 – управляючий комп'ютер

Результати такого контролю наведені на рис. 5, де зображені в режимі реального часу залежності, що відображають відносну зміну інтенсивності випромінювання інформаційного та фонового сигналів, які порівнюються між собою.

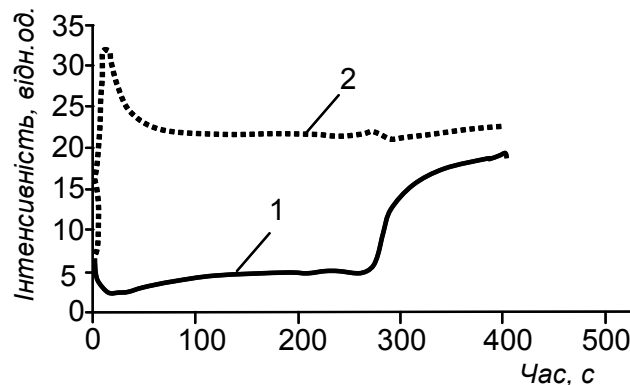


Рис. 5. Зміна інтенсивності інформаційного (1) та фонового сигналу (2) в процесі плазмохімічного травлення мікроструктур

Аналогічна структура системи двоканальної системи контролю процесу плазмохімічного травлення [18] наведена на рис. 6. Відмінність даної структурної схеми полягає в наявності зворотного зв'язку у вигляді додаткового оптичного каналу для введення каліброваного сигналу, що за думкою авторів не тільки підвищує точність контролю, а й покращує процес обробки отриманої інформації.

Варіантом вирішення проблеми підвищення ефективності контролю процесів плазмохімічного травлення є використання в системах контролю принципу частотного перетворення аналогових інформаційних сигналів [19].

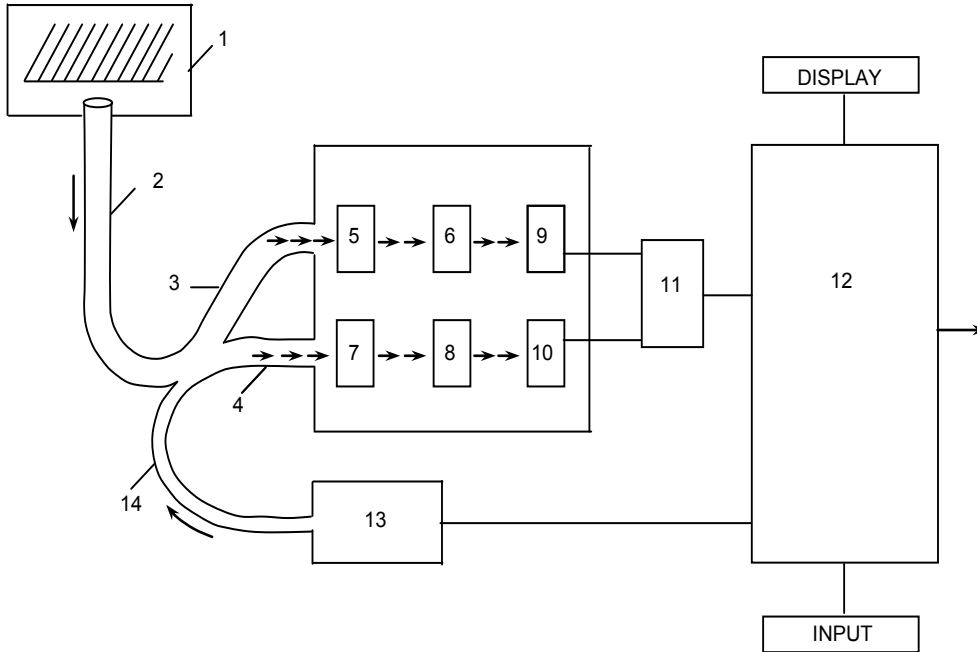


Рис.6. Двоканальна система для визначення моменту закінчення плазмового травлення: 1- плазмовий реактор; 2 – основний світловод; 3, 4 – світловоди для інформаційного та фонового оптичного випромінювання; 5, 7 – оптичні блоки; 6, 8 – інтерференційні фільтри; 9, 10 – фотоперетворювачі; 11 – блок порівняння; 12 – мікропроцесорний блок управління; 13 – блок калібрування; 14 – світловод для введення каліброваного сигналу

Приклад такої системи, де в якості фоточутливих елементів використано частотні перетворювачі на основі напівпровідникових структур з від’ємним опором [20], наведено на рис. 7.

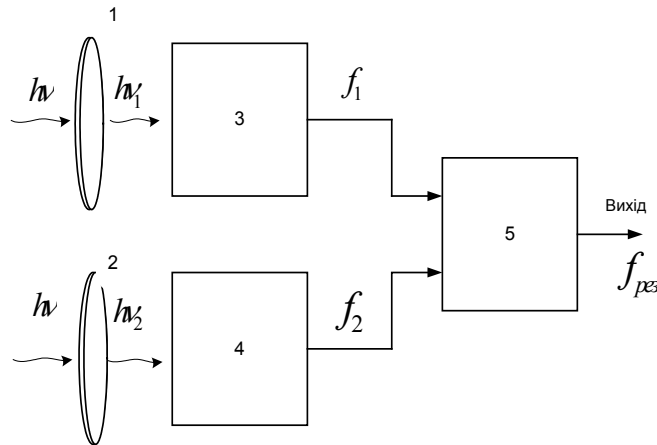


Рис. 7. Двоканальна система для визначення моменту закінчення плазмового травлення з частотними перетворювачами: 1, 2 – інтерференційні фільтри; 3, 4 – частотні перетворювачі; 5 – частотний компаратор

На рис. 8 наведена електрична схема такого частотного перетворювача на основі двох біполярних транзисторів і активного індуктивного елемента [21]

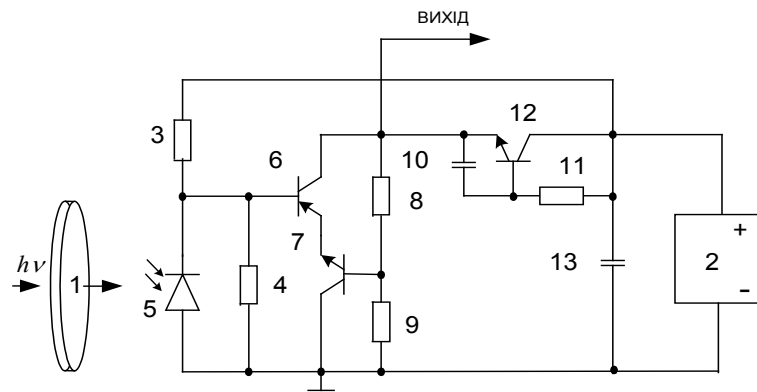


Рис. 8. Частотний перетворювач на основі структури з від'ємним опором

Двоканальні системи контролю процесу плазмохімічного травлення мікроструктур добре зарекомендували себе в умовах сучасного виробництва. В той же час перехід мікроелектронної технології на нанорозміри основних елементів інтегральних мікросхем надвеликого ступеня інтеграції потребує подальшого підвищення вимог до систем контролю з точки зору підвищення вимог до його достовірності, оскільки площа, що витравлюється на одній пластині здебільшого не перевищує одного її відсотка [1].

Підвищення ефективності контролю можливе за рахунок збільшення кількості інформаційних каналів і в цьому сенсі певний інтерес викликають системи, де в якості інформаційних оптичних сигналів використовуються спектральні лінії та смуги якомога більш широкого спектру власного випромінювання нерівноважної плазми.

Так на рис. 9 наведена структурна схема системи контролю [17], де в якості інформаційних сигналів використовуються три спектральні лінії або смуги.

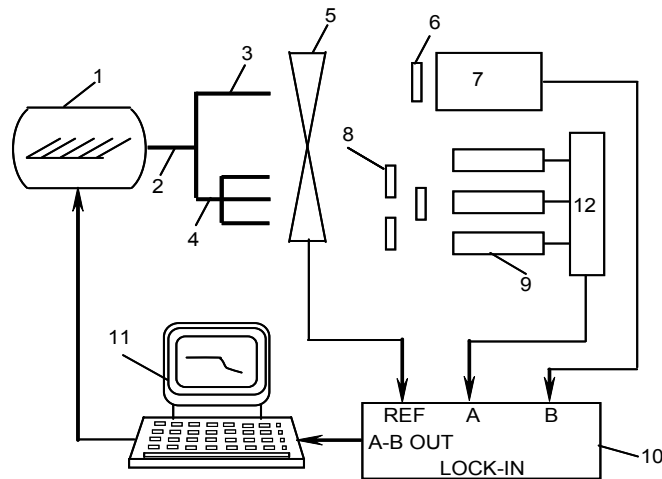


Рис.9. Багатоканальна система для визначення моменту закінчення плазмового травлення: 1- плазмовий реактор; 2 - 4 – світловоди; 5 – модулятор; 6, 7 – інтерференційні фільтри; 8, 9 – фотоперетворювачі; 10 – блок порівняння; 11 – комп'ютер; 12 - мікропроцесор

Дієвість такого підходу для вирішення проблеми підвищення ефективності контролю при плазмохімічному травленні мікроструктур демонструє графік, наведені результати моніторингу процесу плазмохімічного травлення багат шарової структури *poly-Si/SiO₂/Si* у фторвміщуючій плазмі [22] (рис. 10).

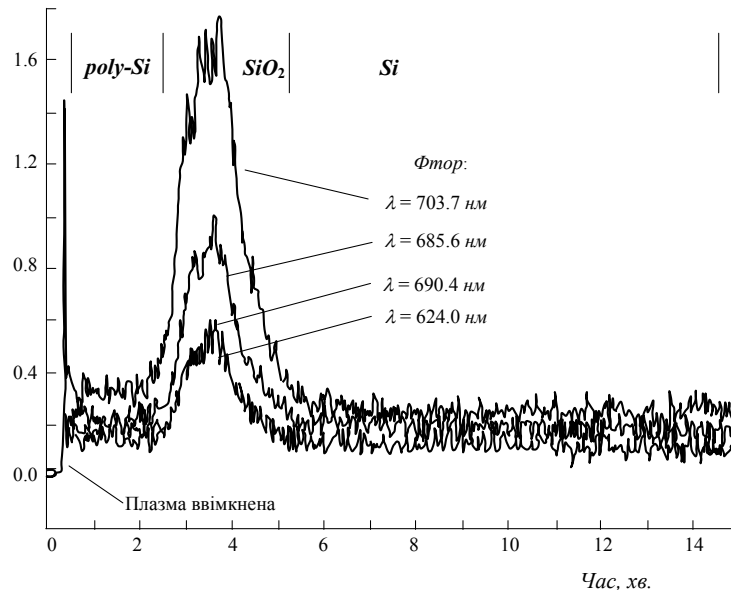


Рис.10. Результати моніторингу процесу плазмохімічного травлення багатошарової структури poly-Si/SiO₂/Si у фторвміщуючій плазмі

Як бачимо, часова еволюція інтенсивності ліній атомарного (радикального) фтору дозволяє досить чітко виділити три етапи плазмохімічного травлення різних шарів – полікремній, оксид кремнію, підкладка, що дає можливість використовувати даний метод моніторингу для визначення моменту закінчення процесу травлення. Використання чотирьох інформаційних каналів, крім того, дає можливість виключити помилки, які можуть бути пов'язані як з невеликим співвідношенням сигнал/шум, так і з неповною відповідністю зміни інтенсивності інформаційної спектральної лінії характеру технологічної операції.

В зв'язку з цим нами на практичному рівні була розроблена схема багатоканальної системи реєстрації спектру випромінювання нерівноважної плазми (рис. 11) [23].

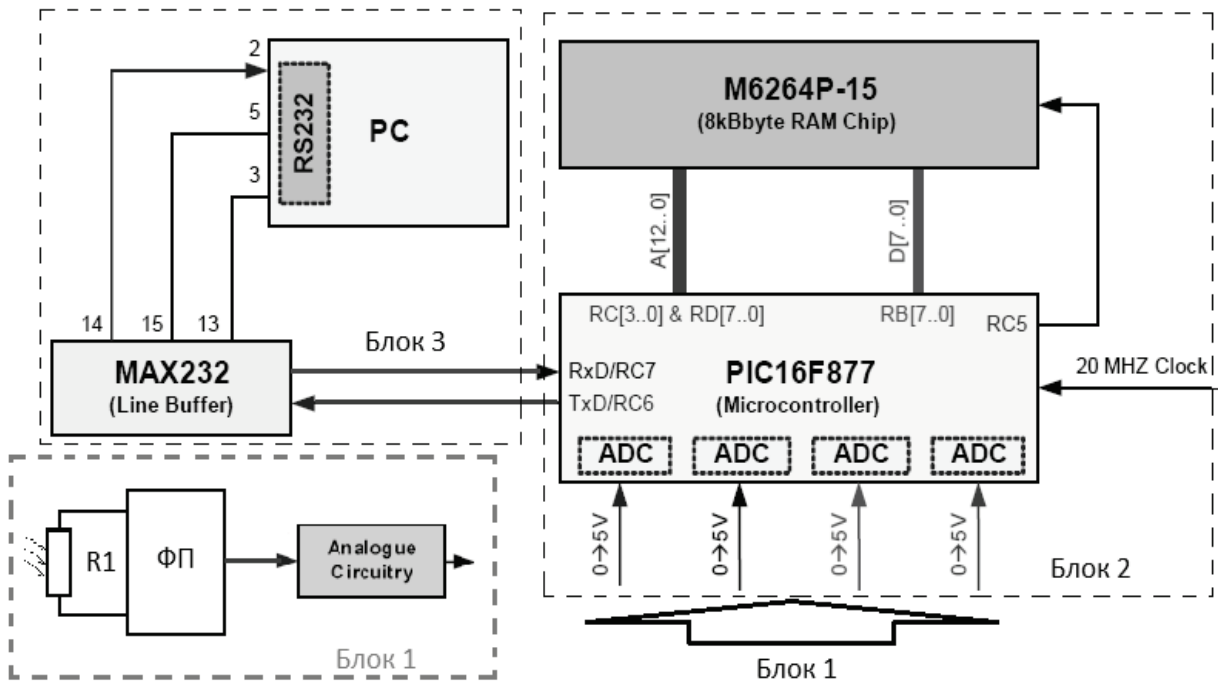


Рис. 11. Блок-схема багатоканальної системи реєстрації спектру випромінювання нерівноважної плазми

Блок-схема запропонованої системи містить фотоприймач, блок обробки даних та блок з'єднання пристрою з комп'ютером через COM-порт.

Фотоприймач (блок 1) складається з чотирьох незалежних фоторезисторів R1–R4 та фотоперетворювача.

Блок обробки даних (блок 2) побудований на базі мікроконтролера серії PIC16F877A. Дана мікросхема має аналогові входи і в схемі, що розглядається, відіграє роль осцилографа [7]. Мікросхема пам'яті M6264P–15 використана в якості додаткової оперативної пам'яті, що забезпечує спостереження процесів в реальному часі.

Блок з'єднання схеми з комп'ютером (блок 3) через СОМ-порт представлений схемою перетворювача сигналу на мікросхемі серії MAX232. На її виході формуються кодові сигнали, які і надходять на СОМ-порт.

Дана система може бути використана як окремий контролюючий пристрій, так і у складі загальної автоматизованої системи контролю і управління технологічним процесом

ВИСНОВКИ

Таким чином, в результаті проведеного аналізу показано, що використання багатоканального контролю плазмохімічного процесу травлення мікроструктур дійсно може суттєво підвищити його достовірність, а, значить, і його ефективність. Подальше вдосконалення як самого технологічного процесу плазмохімічного травлення мікроструктур, так і елементів його контролю потребує, вочевидь, нових нетрадиційних технічних рішень і їх впровадження у виробництво.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Орликовский А.А. Диагностика *in situ* плазменных технологических процессов микроэлектроники: Современное состояние и ближайшие перспективы. Часть IV / А.А. Орликовский, К.В.Руденко, Я.Н.Суханов // Микроэлектроника. – 2001. – Т.30. – № 6. – С.403 – 433.
2. Кравченко Ю.С. Шляхи підвищення ефективності контролю і управління плазмохімічними процесами / Ю.С.Кравченко, В.С.Осадчук, С.Ю.Кравченко // Вісник ВПІ. – 2007. – № 6. – С.119 – 125.
3. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов / Б.С.Данилин, В.Ю.Киреев – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.
4. Орликовский А.А. Проблемы плазмохимического травления в технологии микроэлектроники / А.А.Орликовский, Д.И.Словецкий // Микроэлектроника. – 1987. – Т.16. – № 6. – С.497 – 512.
5. Данилин В.С. Контроль процессов травления материалов в низкотемпературной газоразрядной плазме / В.С.Данилин, В.Ю.Киреев, В.А.Каплин, Э.А.Лебедев, Н.Н.Федоров // Приборы и техника эксперимента. – 1982. – № 1. – С. 13 –28.
6. Юдина Н.К. 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.
7. Методы исследования плазмы: Пер. с англ. /Под ред. В.Лохте-Хольдгрена. – М.: Мир, 1971. – 552 с.
8. Диагностика плазмы: Пер. с англ. / Под ред. Р.Хадлстоуна, С.Леонарда – М.: Мир, 1967. – 515 с.
9. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия / М.А. Ельяшевич – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 892 с.
10. Даниленко О.О. Оптичний емісійно-спектральний контроль процесів травлення в низькотемпературній плазмі / О.О.Даниленко, Ю.С.Кравченко, В.С.Осадчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології – 2005. – № 2 (10). – С.173 – 180.
11. Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме / Д.И.Словецкий - М.: Наука, 1980. – 310 с.
12. Degenkolb E.O. 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.
13. Curtis B.J. Optical End-Point Detection for the Plasma Etching of Aluminium / B.J.Curtis // Solid State Technology. – 1980. – V. 23. – № 4. – P.129 – 132.
14. Curtis B.J. Some Experiments in Aluminium CCl₄ 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.
15. Pat. USA № 4289188, H01L 21/306; C23F 1/00. Method and Apparatus for Monitoring Etching / Mizutani T. and all. – 1981.
16. Заявка Японії № 58-43521, H 01L 21/302; C 23F 4/00; G 02B 5/22. Спосіб визначення моменту закінчення сухого травлення. – 1983.
17. Заявка Японії № 60-60727, H 01L 21/302; G 01R 19/00. Спосіб і пристрій для визначення моменту

- закінчення травлення. – 1985.
18. Pat. USA № 5308414, G01N 21/00. Method and Apparatus for Optical Emission end Point Detection in Plasma Etching Processes / O'Neil J. A. and all. – 1994.
 19. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2001. – 303 с.
 20. Патент України № 26976, H01L 21/302. Спосіб визначення моменту закінчення процесу плазмохімічного травлення / Кравченко С. Ю., Кравченко Ю. С., Осадчук В. С., Осадчук О. В. – 2007. – Бюл. 16.
 21. Патент України № 26975, H01L 21/302. Пристрій для визначення моменту закінчення процесу плазмового травлення / Кравченко С. Ю., Кравченко Ю. С., Осадчук В. С., Осадчук О. В. – 2007. – Бюл. 16.
 22. Барышев Ю.П. Диагностика плазмохимического травления SiO₂/Si и определение момента окончания травления / Ю.П.Барышев, А.П.Ершов, К.Ш.Исаев и др. // Микроэлектроника. – 1996. – Т. 25. – № 5. – С. 373 – 379.
 23. Білилівський В.М. Багатоканальна система реєстрації спектру випромінювання нерівноважної плазми / В.М.Білилівський В.М., С.Ю.Кравченко, Ю.С.Кравченко, В.С.Осадчук // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010). Тези доповідей десятої міжнародної науково-технічної конференції. М.Вінниця, 19 – 21 жовтня 2010 р. – С. 89. – www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/materials.

Надійшла до редакції 02.04.2011р.

КРАВЧЕНКО С. Ю. – аспірант кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

КРАВЧЕНКО Ю. С. – к.ф.-м.н., доцент кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

ОСАДЧУК В. С. – д.т.н., професор кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.