

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.382

Ю. С. Кравченко, к. ф.-м. н., доц.;  
В. С. Осадчук, д. т. н., проф.;  
С. Ю. Кравченко, студ.

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТРОЛЮ І УПРАВЛІННЯ ПЛАЗМОХІМІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

*Проаналізовано шляхи підвищення ефективності контролю і управління плазмохімічними процесами в мікроелектронній технології за рахунок впровадження нових підходів в реалізації контролю на основі сучасних досягнень в цій області, а також побудови систем управління в реальному часі, розробки сучасних контролерів на основі використання моделі процесу з використанням сучасних сенсорів в колі зворотного зв'язку, розробки нових типів контролерів управління.*

### Вступ

Плазмохімічні процеси травлення мікроструктур [1, 2] фактично безальтернативно забезпечують на даний час точність відтворення функціонального рельєфного рисунку на кремнієвих пластинах до  $\varnothing 300$  мм на рівні  $\leq 0,13$  мкм (мінімальний топологічний розмір, який введено в останню редакцію International Technology Roadmap for semiconductor 1999 Edition) [3]. 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 [4]. Окрім того, об'єктами моніторингу в плазмовій технології є температурний режим обробки напівпровідникових структур [3], склад та витрати плазмоутворювальних газів, параметри вакуумних та енергетичних установок [2], 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 [5 — 7], 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. Складності для вирішення цієї простої задачі виникають зі зменшення площі пластини, яка піддається плазмовому травленню (в такому випадку складова шуму у співвідношенні сигнал/шум збільшується) [3]. Проблеми виникають також під час здійснення багатостадійних процесів, які пов'язані зі зміною плазмоутворювальних газів та механізму взаємодії хімічно активних частинок плазми з поверхнею твердого тіла, і зі збільшенням кількості сенсорів, які окрім цільового процесу травлення реєструють багато інших параметрів, що забезпечують стабільні умови проведення плазмохімічного процесу.

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

Мета даної роботи — аналіз нових нетрадиційних підходів підвищення ефективності контролю плазмохімічних процесів в мікроелектроніці та управління ними.

## Аналіз проблеми

Один з таких нетрадиційних варіантів було запропоновано авторами робіт [8, 9], де багатомірний потік даних від різних сенсорів в системі з дискретним часом описується матрицею елементів інтенсивностей  $I_m$  ( $m$  — номер відповідного сенсора) в моменти часу  $t = 1 \dots n$ :

$$\begin{bmatrix} I_1(t=1) & I_2(t=1) & \dots & I_m(t=1) \\ I_1(t=2) & I_2(t=2) & \dots & I_m(t=2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1(t=n) & I_2(t=n) & \dots & I_m(t=n) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В будь-який дискретний момент часу  $t$  дані можуть бути зображені у вигляді ряду, члени якого є ортогональними функціями. Зокрема, в роботі [8] було використано зображення, подібне ряду Фур'є

$$f(\theta, t) = \frac{I_1}{\sqrt{2}} + I_2 \sin \theta + I_3 \cos \theta + I_4 \sin 2\theta + I_5 \cos 2\theta + I_6 \sin 3\theta + \dots, \quad (2)$$

де  $\theta \in [-\pi; \pi]$ .

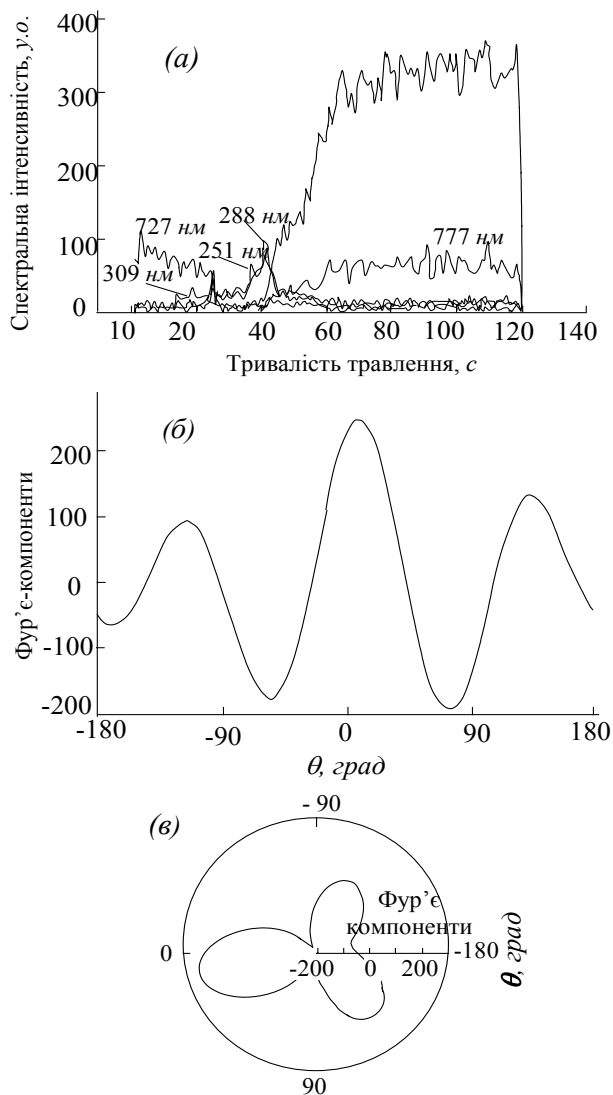


Рис. 1. Спектральні лінії плазми: *a* — зареєстровано в ході травлення багат шарової структури; *б* — зображено Фур'є-компонентами: в декартових, *в* — в полярних координатах

Іншими словами, в кожний момент часу ми маємо вектор даних, які отримано в ході процесу. Елементи цього вектора використовуються у вигляді коефіцієнтів в рівнянні (2). При цьому в матрицю можуть входити не тільки однорідні дані (наприклад, спектральні), але й сигнали будь-яких датчиків, які слідкують за станом різноманітних параметрів системи. Таким чином, можна побудувати відбиток, «портрет» процесу, який дискретно змінюється у часі. На рис. 1 показано зображення Фур'є-перетворених даних спектральних емісійних ліній і смуг для часу  $t$  в декартових і полярних координатах [8]. В полярних координатах маємо замкнуту криву («Фур'є-кляксу», за термінологією авторів), форма якої еволюціонує в ході технологічного процесу.

Запропонований підхід в інтерпретації даних моніторингу був випробуваний на процесах формування затворів в структурах TiN/poly-Si/SiO<sub>2</sub>/Si з окисною маскою, а також в процесі формування отворів з площею, яка відкрита для травлення, що складає не більше 1% площі пластини.

Підвищення якості детектування моменту закінчення процесу плазмохімічного травлення можливе також з використанням іншого набору ортогональних функцій в розкладанні (2). Цим питанням присвячені дослідження, де аналізуються «портрети» процесу травлення на основі поліноміальних функцій Чебишева і Лежандра [10]. Рівняння (2) в даному випадку

має вигляд

$$f(\theta, t) = I_1 P[1, \theta, t] + I_2 P[2, \theta, t] + I_3 P[3, \theta, t] + \dots + I_m P[m, \theta, t], \quad (3)$$

де  $P[m, \theta, t]$  — зображений в загальному вигляді поліном  $m$ -го порядку від аргументу  $\theta$ . Поліноми Чебишева для моменту часу  $t$  при цьому записуються у вигляді

$$P[m, \theta, t] \equiv T_m(\theta) = \cos[m \arccos(\theta)], \quad \theta \in [-1, 1]. \quad (4)$$

а поліноми Лежандра як

$$P[m, \theta, t] \equiv P_m(\theta) = \frac{1}{2^m n!} \frac{d^m}{d\theta^m} (\theta^2 - 1)^m, \quad \theta \in [-1, 1]. \quad (5)$$

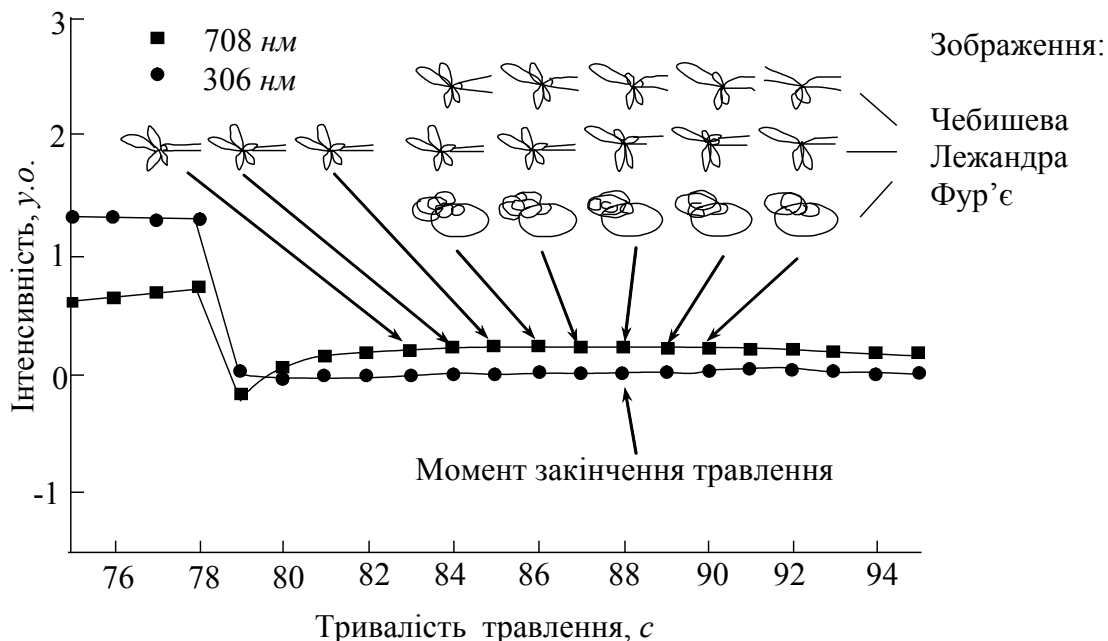


Рис. 2. Часові залежності інтенсивності спектральних ліній в ході травлення металевих шарів Al/TiN/poly-Si з використанням різного набору ортогональних функцій

Картинки Чебишева і Лежандра, на відміну від Фур'є, не є замкнутими кривими в полярних координатах. Характерним для таких зображень є зміна розміру однієї з петельок, особливо помітна на «чебишевському портреті» в точці, яка як раз і реєструє момент закінчення цільового процесу травлення. Однак така зміна ще досить складна для поточних спостережень оператора.

Можливо тому автори [9] запропонували використовувати кінетичні залежності площі під кривою, або, іншими словами, інтеграл ( $A_f$ ) функції (3) у вигляді

$$A_f = \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta, t) d\theta. \quad (6)$$

Результати такого моніторингу були перевірені на кількох послідовно проведених процесах. Їх вигляд показано на рис. За для травлення металевих шарів і на рис. 3б — для травлення контактних отворів (використовувались дані 10 сенсорів). Як бачимо, момент закінчення процесу травлення спостерігається досить явно, що свідчить про доцільність використання даного підходу для інтерпретації даних, що мало змінюються або знаходяться в зашумленому стані.

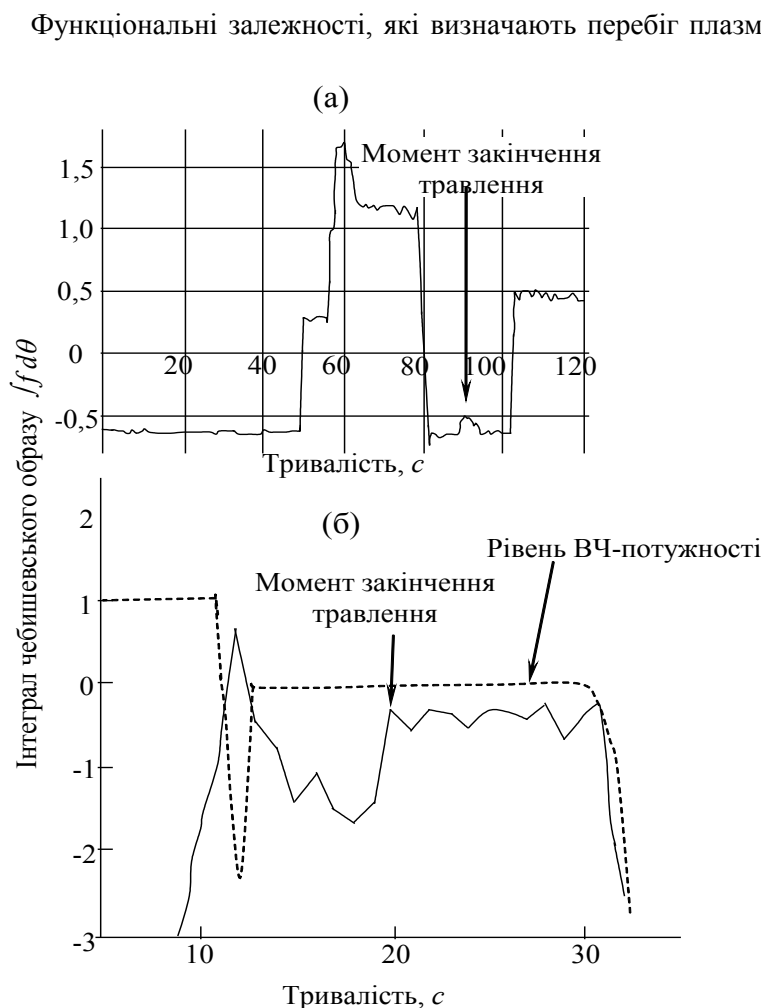


Рис. 3. Динаміка зміни інтеграла чебишевського образу в процесі травлення: а — структури Al/TiN; б — контактних отворів в SiO<sub>2</sub>

(ПД-контролера), який запропоновано в роботі [12]. Травлення відбувалось в щільній фтор- і хлормісткій плазмі. Контрольовані параметри процесу: ВЧ-потужність, яка вносилась у плазму; ВЧ-зміщення на пластині; тиск у камері і потоки газів. Додатково вимірялась густина активних радикалів за допомогою оптичної актинометрії.

Оскільки створити фізично точну модель залежності швидкості травлення ( $R$ ) від всіх цих змінних складно, то за параметр управління було обрано один єдиний — величину ВЧ-зміщення на пластину ( $W_f$ ); інші були фіксовані, і їх коливання відслідковувались як збурення стаціонарного стану. Основним результатом цієї роботи слід вважати доповнення основного алгоритму ПД-контролера корекцією перехідних процесів управління за допомогою прямого зв'язку за такою напівемпіричною залежністю швидкості травлення [13]:

$$R = A \frac{J_i E_i}{1 + B J_i E_i / P J_r}, \quad (7)$$

де  $J_i, E_i$  — потік іонів в бік поверхні та їх енергія;  $J_r$  — потік активних радикалів.

З урахуванням того, що  $J_i, E_i \cong W_f + C$ , а густина радикалів в плазмі, яка визначається оптичною актинометрією, —  $P_r$ , вираз (7) перепишеться як

$$R = A \frac{W_f + C}{1 + D W_f / P_r}, \quad (8)$$

де  $A, B, C$  — підгоночні коефіцієнти.

Функціональні залежності, які визначають перебіг плазмо-стимульованих процесів, є складними і не до кінця вивченими. А тому існує кілька стратегій управління такими процесами.

Статистичний підхід базується на одночасному врахуванні великої кількості параметрів процесу і автоматизованої мінімізації похибки відносно заданого значення; свою життєздатність показують і моделі управління, які базуються на спрощених залежностях цільового критерію від параметрів процесу. Розвитком останніх є алгоритми управління, які використовують методи попередньої побудови так званих функцій відгуку в просторі параметрів, що регулюються за даними моніторингу.

Метод управління процесом травлення полікремнію і SiO<sub>2</sub>, який базується на використанні двопробеневого ( $\lambda_1 = 632,8$  нм,  $\lambda = 543,5$  нм) інтерферометричного методу вимірювання товщини неструктуризованих плівок [11] в колі зворотного зв'язку пропорційно-інтегрально-диференціального контролера

Результати управління швидкістю травлення полікремнію в реальному часі за запропонованим алгоритмом показані на рис. 4.

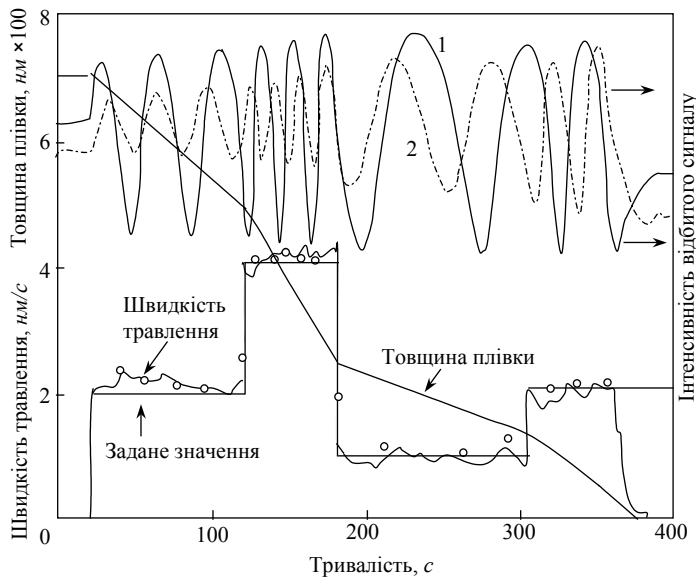


Рис. 4. Управління швидкістю травлення плівки poly-Si в реальному часі за алгоритмом ПІД-контролера

функції розподілу електронів за енергіями з просторовою роздільною здатністю, коефіцієнтів електронного транспорту і перерізів електронної взаємодії); та гідродинамічний модуль (розрахунок густини заряджених і нейтральних частинок на основі розв'язання рівнянь потоків і потенціалів плазми з рівняння Пуассона).

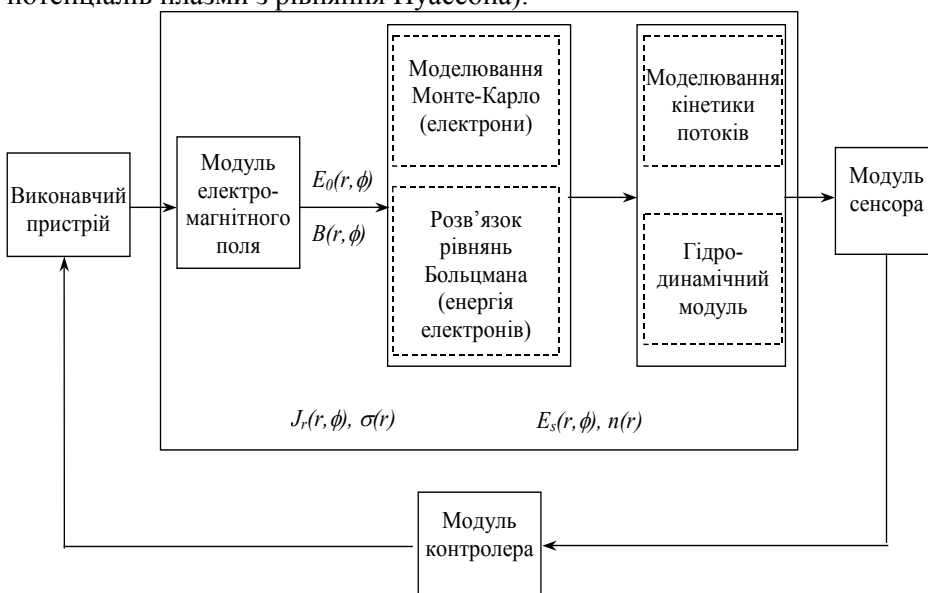


Рис. 5. Блок-схема віртуального плазмового реактора з системою автоматизованого управління технологічним процесом

Ядро було доповнено модулем сенсора реального часу, модулем програмованого віртуального контролера і виконавчого пристрою. Верифікація моделі проводилась за допомогою процесу травлення poly-Si в плазмі  $Cl_2/Ar$  в реакторі з магнітним захистом стінок.

Розглядаються два типи контролерів управління: стандартний ПІД-контролер і контролер, робота якого базується на попередньо формалізованих функціях відгуку. Їх задача — утримувати сигнал сенсора/сенсорів ( $y_j$ ) на вході на заданому значенні, керуючи пристроями ( $x_j$ ). Як відомо, функціонування ПІД-контролера описується рівнянням

$$x(t) = K \left[ \Delta y(t) + \frac{1}{T_i} \int \Delta y(t) dt + T_d \frac{d[\Delta y(t)]}{dt} \right], \quad (9)$$

де  $\Delta y = y - y_s$  — сигнал розбіжності між заданим значенням сигналу сенсора  $y_s$  та його поточною величиною  $y$  як функції часу  $t$ ;  $K$  — коефіцієнт пропорційності (підсилення) контролера;  $T_i$  та  $T_d$  — сталі часу інтегрування і диференціювання відповідно. Другий контролер реалізовано з урахуванням поліноміальної апроксимації поверхнею відгуку

$$y_j = c_{0j} + \sum_{k=1}^n c_{1jk} (x_k - x_{k0}) + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n c_{2jkl} (x_k - x_{k0})(x_l - x_{l0}), \quad (10)$$

де  $c_{0j}$ ,  $c_{1jk}$ ,  $c_{2jkl}$  — сталі коефіцієнти.

Моделні результати управління швидкістю травлення полікремнію ПД-контролером і контролером з урахуванням функцій відгуку системи показані на рис. 6.

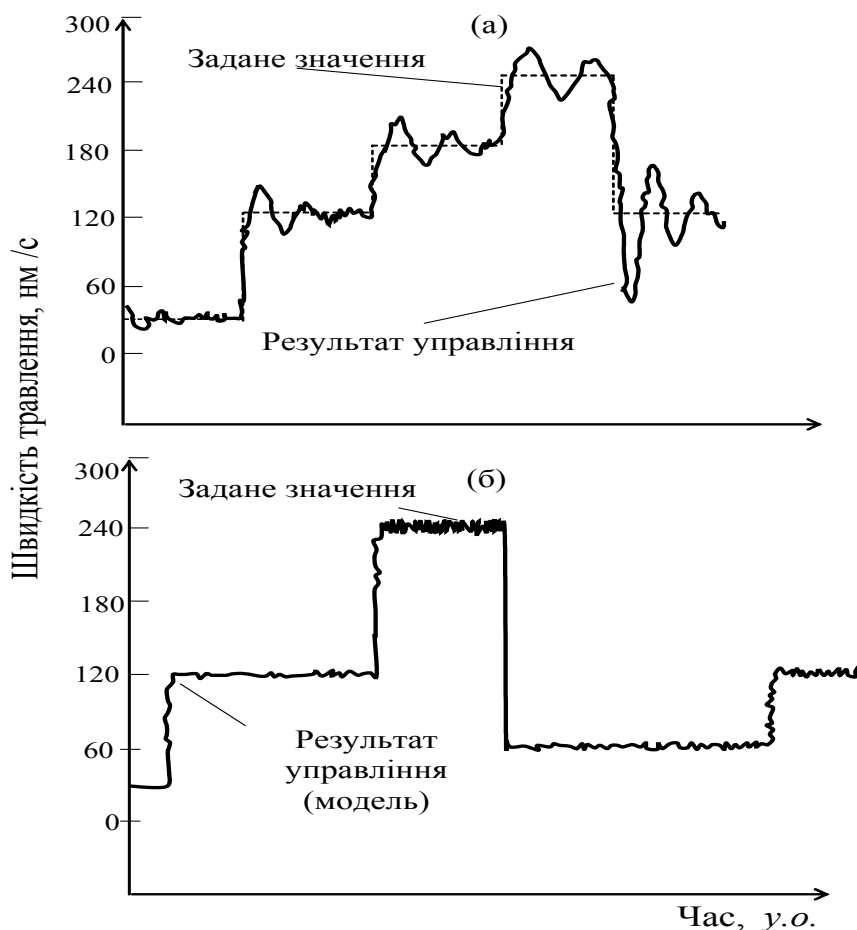


Рис. 6. Результати моделювання швидкості травлення poly-Si:  
а — за алгоритмом ПД-контролера; б — за комбінацією алгоритмів ПД-контролера і моделі, яка побудована на поверхнях відгуку

Однак це породжує і відповідні проблеми. Стримуючи сигнали сенсорів (в розглянутому випадку потоки іонів і радикалів хлору) біля заданого значення, контролер може змінити стан інших параметрів плазми. Це може бути, наприклад, густина електронів, температура, склад газової суміші. Їх зміна призведе, в свою чергу, до непотрібних радіаційних пошкоджень в оброблюваній пластині. Іншими словами, контролер повертає до початкового значення сигнали обраних сенсорів, а не стан плазми в реакторі.

## Висновки

Проведений аналіз свідчить, що подальший розвиток мікроелектронної технології можливий лише за умови забезпечення ефективного і достовірного контролю її технологічних параметрів і,

Як бачимо, управління процесом за класичним алгоритмом ПД-контролера призводить до динамічних похибок зі ступінчатою зміною завдання (а), а введення в алгоритм контролера додаткового прямого зв'язку між його сигналом управління і динамічною похибкою сигналу сенсора по полю номінально апроксимованим функціям відгуку значно покращує картину перехідних процесів (б). Це повністю узгоджується з експериментом [14]. Слід зазначити, що отриманий результат може бути досягнуто лише з оптимально вибраною пропорцією між впливом функцій відгуку і ПД-компоненти на вихідний сигнал контролера (глибини прямого та зворотного зв'язку).

Функції відгуку надають широкі можливості для управління процесом шляхом зміни всіх доступних параметрів регулювання.

насамперед, тих, які визначають задану точність відтворення функціонального рельєфного рисунку на кремнієвих пластинах. Високий рівень прецизійності плазмового процесу травлення може бути забезпечений впровадженням нових підходів в реалізації контролю на основі сучасних досягнень в цій області, зокрема, за рахунок впровадження методів частотного перетворення інформаційних сигналів, а також побудови систем управління плазмохімічними процесами в реальному часі, розробки сучасних контролерів на основі моделі процесу з використанням сучасних сенсорів в колі зворотного зв'язку, розробка нових типів контролерів управління, наприклад, на основі моделі нейронних мереж.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Таруи Я. Основы технологии СБИС: Пер с япон. — М.: Радио и связь, 1985. — 480 с.
2. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 264 с.
3. Орликовский А. А., Руденко К. В., Суханов Я. Н. Диагностика *in situ* плазменных технологических процессов микроэлектроники: Современное состояние и ближайшие перспективы. Часть IV // Микроэлектроника. — 2001. — Т. 30. — № 6. — С. 403—433.
4. Орликовский А. А., Словецкий Д. И. Проблемы плазмохимического травления в технологии микроэлектроники // Микроэлектроника. — 1987. — Т. 16. — № 6. — С. 497—512.
5. Данилин В. С., Киреев В. Ю., Каплин В. А., Лебедев Э. А., Федоров Н. Н. Контроль процессов травления материалов в низкотемпературной газоразрядной плазме // Приборы и техника эксперимента. — 1980. — № 1. — С. 13—28.
- Юдина Н. К., Чупахин М. С., Лебедев Э. А., Федоров Н. Н. Исследование и контроль плазмохимических процессов // Зарубежная электронная техника. — 1980. — Вып. 3 (223). — С. 3—54.
7. Даниленко О. О., Кравченко Ю. С., Осадчук В. С. Оптический эмиссионно-спектральный контроль процесів травлення в низькотемпературній плазмі // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології — 2005. — № 2 (10). — С. 173—180.
8. Rietman E. A., Lee J. T. — C. Dynamic images of plasma processes: Use of Fourier blobs for endpoint detection during plasma etching of patterned wafers // J. Vac. Sci. Technol. A. — 1998. — V.16. — № 3. — P. 1449—1453.
9. Rietman E. A., Layadi N., Downey S. W. Use of orthogonal polynomial functions for endpoint detection during plasma etching of patterned wafers // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2000. — V. 18. — № 5. — P. 2500—2504.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1984. — 831 с.
11. Wong K., Boning D. S., Sawin H. H., Butler S. W., Sachs E. V. Endpoint prediction of polysilicon plasma etch via optical emission interferometry // J. Vac. Sci. Technol. A. — 1997. — V. 15. — № 3. — P. 1403—1408.
12. Sarfaty M., Baum C., Harper M., Hershkowitz N., Shohet J. L. Real-Time Monitoring and Control of Plasma Etching // Jpn. J. Appl. Phys., Part 1. — 1998. — V. 37. — № 4B. — P. 2381—2387.
13. Ding J., Hershkowitz N. Symmetric rate model for fluorocarbon plasma etching of SiO<sub>2</sub> // Appl. Phys. Lett. — 1996. — V. 68. — № 12. — P. 1619—1621.
14. Rauf S., Kushner M. J. Controller design issues in the feedback control of radio frequency plasma processing reactors // J. Vac. Sci. Technol. A. — 1999. — V. 17. — № 3. — P. 704—712.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 14.11.07  
Рекомендована до друку 26.11.07

**Кравченко Юрій Степанович** — доцент; **Осадчук Володимир Степанович** — завідувач кафедри; **Кравченко Сергій Юрійович** — студент Інституту автоматики, електроніки та комп'ютерних систем управління.

Кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет