

ОПТИЧНИЙ АКТИНОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В МІКРОЕЛЕКТРОННІЙ ТЕХНОЛОГІЇ

На прикладі плазмохімічного травлення структур p-Si/SiO₂/Si проаналізовані можливості і перспективи використання оптичного актинометричного методу контролю плазмохімічного травлення при виготовленні приладів сучасної мікро- та наноелектроніки. Наведені результати експериментальних досліджень процесу травлення мікроструктур. Показано, що застосування в процесі моніторингу процесу плазмового травлення фазового детектування сигналу дозволяє значно зменшити шумову його складову і дає практичну можливість використовувати оптичний актинометричний метод для контролю процесу травлення малих площин.

For example, the plasma chemical etching of structures p-Si/SiO₂/Si analyzed the possibilities and prospects of optical actinometric plasma chemical etching method of control in the manufacture of devices of modern micro- and nanoelectronics. The experimental results digestion microstructures. It is shown that the application of the process monitoring of plasma etching phase detection signal can significantly reduce the noise component and makes it practical to use optical actinometric method to control the digestive process of small planes.

Ключові слова: мікро- та наноелектроніка, плазмохімічні процеси, актинометричний метод контролю, фазове детектування сигналу.

Вступ

Плазмові технології, об'єм яких при виготовленні інтегрованих мікросхем високого ступеня інтеграції досягає 50 % від загальної кількості технологічних операцій, що використовуються при їх виготовленні, не мають на даний час альтернативи в сучасній мікро- та наноелектроніці [1, 2]. Подальше зменшення функціональних розмірів елементів потребує не тільки модернізації основних технологічних засобів технологічного їх відтворення, зокрема, плазмових реакторів [2, 3], але й модернізації методів контролю таких процесів [4 – 8].

Інтегровані схеми наноелектроніки, які містять технологічні шари, товщина яких спів розмірна зі сталою кристалічної ґратки, потребують контролю процесів *in situ* (миттєвого) їх виготовлення [7, 8]. Розробка та використання таких методів повинні забезпечувати прецизійне травлення відповідних структур і точне перенесення на напівпровідникову пластину рисунку маски з точністю, яка забезпечувала б прецизійність на рівні 6 – 10 нм [7].

Вирішення даної проблеми можливе лише за умови використання вбудованих засобів контролю, що використовують фізичні явища або ефекти, які не вносять елементів збурення в потоки хімічно активних частинок з плазми на підкладку. Методи діагностики плазмових процесів повинні бути незбурюючими по відношенню до технології і мати достатню чутливість. Особливо жорсткими є умови до чутливості методів контролю *in situ* при травленні контактних отворів в діелектриках багатопшарової металізації надвеликих (НВІС) і ультравеликих інтегрованих схем (УВІС), де загальна площа вікон травлення досить часто не перевищує 1 % площі пластини [3, 4]. Перевага повинна надаватися засобам контролю, для реалізації яких не потрібно створювати спеціальні тестові структури на самих пластинах, а засоби моніторингу повинні

забезпечувати високу ефективність, можливість як автоматичної зупинки процесу, так і (в перспективі) управління його параметрами, наприклад, швидкістю травлення. В останньому випадку *in situ* детектори повинні включатися кола зворотного зв'язку управління технологічною установкою.

Мета даної роботи – аналіз тенденцій розвитку методів контролю процесу плазмохімічного травлення мікроструктур і шляхи підвищення їх ефективності.

Аналіз проблеми

Аналіз проблеми будемо проводити на прикладі дослідження *in situ* швидкості плазмохімічного травлення шарів на структурах кремній (полікремній) – SiO₂ актинометричними методами [9, 10]. *In situ* спектральна діагностика проводилась на партії пластин діаметром 100 мм в ICP-реакторі ВЧ-плазми (13,56 МГц). Моніторинг здійснювався з використанням емісійних ліній плазми робочої суміші SF₆/O₂(5%) / Ar (3%) «Кварц-2000» в режимі запису цих ліній в реальному часі. Для актинометричних вимірювань було використане емісійне випромінювання плазми в ближній ІК-області. Вид спектру з завантаженою кремнієвою пластиною в реакторі (в процесі травлення) наведено на рис. 1.

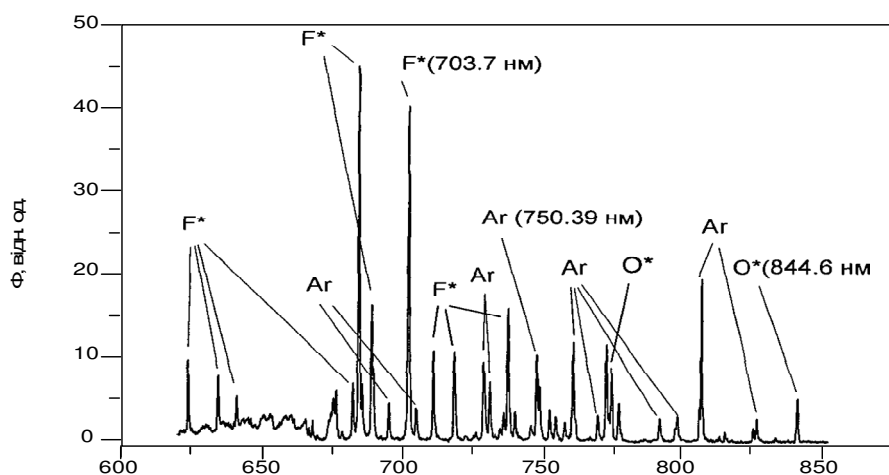


Рис. 1. Емісійний спектр плазми SF₆/O₂/ Ar в ближній ІК-області в ході травлення структур p-Si/SiO₂/Si

Спектр представлений атомними лініями нейтрального (атомарного) фтору, аргону і кисню. Вибір ліній саме цих компонентів плазми зумовлений тим, що F* – основний реагент в поверхневій реакції при іонно-стимульованого травлення кремнія, O* – специфічний продукт травлення SiO₂. Умовам кількісної актинометрії задовольняють пари ліній F* ($\lambda = 703,75$ нм; перехід $3p^2P_{3/2} \rightarrow 3s^2P_{3/2}$) – Ag ($\lambda = 750,39$ нм; перехід $4p'[1/2]_0 \rightarrow 4s'[1/2]_1$) і O* ($\lambda = 844,6$ нм; перехід $3p^3P \rightarrow 3s^3S$) – Ag ($\lambda = 750,39$ нм).

Загальна картина спектрального моніторингу травлення структур p-Si/SiO₂/Si наведена на рис. 2. В даному випадку наведені ненормовані на актинометр (лінія Ag зображена на цьому ж рисунку) значення інтенсивностей радикалів плазми; часова роздільність моніторингу 0,1 – 0,2 с.

Часова роздільність метода дозволяє встановити момент переходу до травлення SiO₂ по традиційному збільшенню інтенсивності ліній F* і O* внаслідок зміни поверхневих реакцій на границі шарів p-Si/SiO₂ і зміни балансу фтору та кисню в об'ємі плазми (ділянка a-b).

Слід зазначити, що в проведеному експерименті час наростання інтенсивності ліній F^* і O^* на момент проходження границі p-Si/SiO₂ (ділянка *a-b*) був завжди меншим за час спаду інтенсивності цих ліній (ділянка *c-d*). Даний ефект можна пояснити, якщо врахувати, що селективність процесу $S_{12} = ER_{p-Si}/ER_{SiO_2}$ набагато більша за одиницю на першій границі, а селективність $S_{21} = 1/S_{12}$ набагато менша за неї.

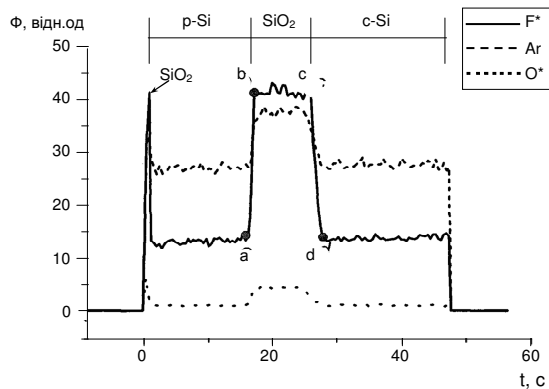


Рис. 2. Результат моніторингу інтенсивності вибраних емісійних ліній плазми F^* ($\lambda = 703,75$ нм), O^* ($\lambda = 844,6$ нм) та Ar ($\lambda = 750,39$ нм) в ході травлення структури p-Si/SiO₂/Si

При мікроскопічному розгляді це означає наступне. Внаслідок латеральних мікро- або макронеоднорідностей плазми у поверхні пластини швидкість видалення шару в різних її точках може суттєво відрізнятися. Нееднорідність товщини плівки по площі пластини дає свій вклад. При цьому на ділянці *a-b* поверхня – це ділянки SiO₂ з острівками полікремнію, площа яких прямує до нуля в момент часу, що відповідає точці *b*. На границі SiO₂/Si (ділянка *c-d*), навпаки, виникають острівки, які є залишками шару SiO₂, швидкість травлення якого набагато менша за швидкість травлення кремнію і час видалення якого суттєво більший. Острівці SiO₂, що залишились, грають роль маски, а тому $t_{c-d} > t_{a-b}$.

Зрозуміло, що режими травлення з селективністю $S < 1$ не повинні використовуватись для багатшарових структур, оскільки така ситуація, навіть при латеральній макроскопічній однорідності плазми, призводить до розвитку мікрожорсткості міжшарової границі, що може виявитися неприпустимим для нанорозмірних приладів.

Додаткова мікрожорсткість p-Si, яка виникає на цьому етапі, може відбитися на границі p-Si/SiO₂. Це припущення підтверджується дослідженнями властивості поверхні на інтерференційному аналізаторі високої роздільності NewView500 (Zygo GmbH). Морфологія нанорозмірних неоднорідностей показана на рис. 3.

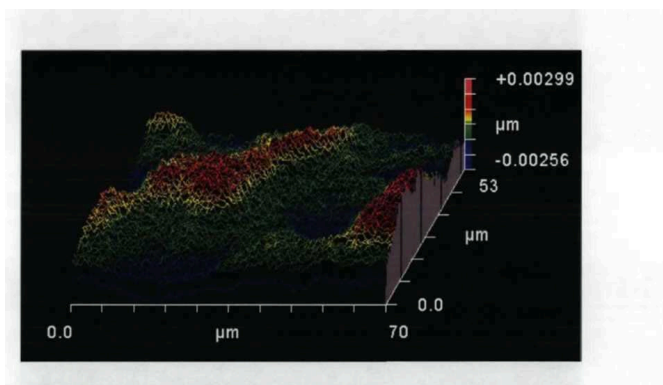


Рис. 3. Морфологія поверхні p-Si/SiO₂/Si після плазмохімічного травлення в SF₆/O₂/Ar

Виходячи з результатів проведеного експеримента ми бачимо, що емісійна лінія Ar (750,39 нм) задовольняє актинометричним вимогам як для визначення щільності атомарного фтору F* ($\lambda = 703,75$ нм), так і атомарного кисню O* ($\lambda = 844,6$ нм). Це дає можливість визначити значення щільності обох цих радикалів з використанням актинометричного нормування:

$$n_{F^*} = K_{act F^* / Ar} \cdot n_{Ar} \frac{\Phi_{F^*}}{\Phi_{Ar}}; \quad n_{O^*} = K_{act O^* / Ar} \cdot n_{Ar} \frac{\Phi_{O^*}}{\Phi_{Ar}},$$

де $K_{act F^* / Ar}$, $K_{act O^* / Ar}$ – відповідні актинометричні коефіцієнти [11 – 13];

n_{Ar} – концентрація аргону у плазмі, яка задається вхідним потоком у камеру.

Для кожного з процесів травлення визначались миттєві (*in situ*) та середні значення щільності атомів фтору F* та кисню O* в плазмі за час, що відповідає видаленню кожного з шарів: полікремнію, підзатворного шару (SiO₂) та монокристалічного кремнію. Щільності фтору і кисню в плазмі під час травлення шарів були сталими (з невеликими флуктуаціями), як це видно з поведінки інтенсивності радикалів і актинометра (Ar) (рис. 2). Отримані дані були співставлені зі швидкостями травлення шарів в кожному з процесів, які підраховувались за відомою товщиною шарів і часом їх травлення (моменти закінчення травлення визначались за перепадами інтенсивностей F* та O* на відповідних границях шарів).

На рис. 4 та 5 показані залежності швидкості іонно-стимульованого травлення p-Si від об'ємної концентрації атомарного фтору.

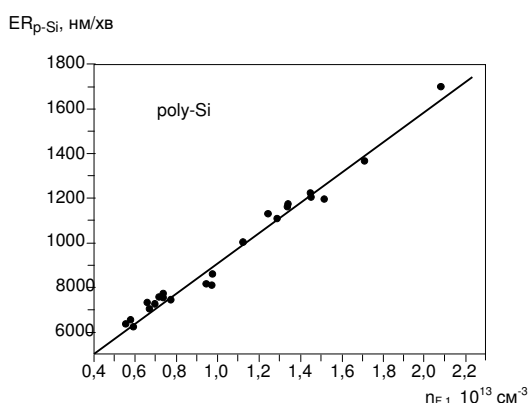


Рис.4. Залежність швидкості травлення p-Si

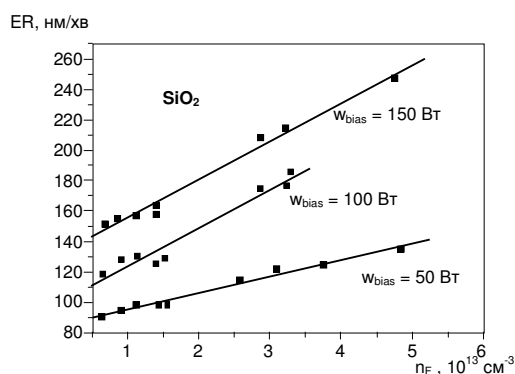


Рис. 5. Залежність швидкості травлення SiO₂

Точки на цих рисунках відповідають індивідуальним технологічним процесам в просторі заданих параметрів.

Ефект зміни інтенсивності емісійних ліній хімічно активних частинок на границі шарів при травленні структур в плазмі залежить як від конкретного технологічного процесу, так і від площі вікон травлення на пластині. Зменшення площі вікон призводить до зниження величини корисного сигналу, який стає співрозмірним з шумовою складовою емісії [14]. Тому, зазвичай, спектральний моніторинг в реальному часі використовується якщо площа вікон не менша за (3 ÷ 5) % від площі пластини. Між тим, в процесі травлення контактних отворів в SiO₂ при виготовленні міжшарової металізації сучасних УВІС площі часто не перевищують 1 %, і відсутність надійного контролю *in situ* на цьому етапі може призводити до виникнення складностей в достовірному визначенні моменту закінчення процесу.

Відомі спроби вирішення цієї проблеми з використанням нейромережових методів обробки сигналу [14, 15], математичної обробки сигналу в реальному часі (представленням спектральних даних дискретними фур'є-образами) [16, 17], частотного перетворення інформаційного сигналу [18], але не зважаючи на певний

прогрес, досягнутий в даному напрямі, вирішеною задачу моніторингу плазмового травлення у вікнах малої площі вважати неможливо.

Покращити показники моніторингу процесів плазмохімічного травлення на малих площах можна в рамках оптичного актиметричного методу за рахунок виділення корисного сигналу емісії атомарного фтору F^* на фоні шумів розряду в процесі плазмового травлення SiO_2/Si за допомогою синхронного (фазового) детектування спектрального сигналу [9, 10], промодульованого частотою генератора плазми.

Часові флуктуації інтенсивності емісії плазми стаціонарного режиму травлення (при постійному складі газової суміші) можуть бути викликані цілим рядом причин. Так в низькочастотних газових розрядах це можуть бути процеси, які пов'язані з періодичністю розвитку процесів іонізації або зміною потенціалу плазми. Певний вклад в ці процеси дають і адсорбційно-десорбційні процеси плівкоутворення на стінках реактора.

До зовнішніх причин, які призводять до зашумленості емісійного випромінювання можна віднести нестабільність вихідної потужності плазмоутворюючого генератора і дрейф електронних регуляторів тиску газу в камері і газових потоків. Системи регулювання зовнішніх параметрів не виключають повністю причин виникнення шумів, оскільки в принципі їх дії лежить принцип зворотного зв'язку, який передбачає компенсацію відхилення параметра з відповідною затримкою. Спектр шуму оптичної емісії плазми, який проходить через реєструючий тракт спектрометра, видозмінюється як при аналоговому перетворенні сигналу, так і при його подальшій дискретизації.

Різноманіття ефектів, які є причиною флуктуації рівня оптичної емісії, не передбачає однозначного рішення для усунення причин шуму, а тому більш ефективним може бути використання загальних підходів виділення корисного сигналу [19]. Для вибору оптимальних способів необхідне вимірювання спектру шумів реального емісійного сигналу, яке і було виконане авторами роботи [20] з використанням даних емісійного моніторингу (лінія F^* ($\lambda = 703,75$ нм)), зареєстрованих при травленні структур poly-Si/SiO₂ (плазма SF₆/O₂/Ar) і SiO₂/Si (плазма SF₆). Спектр низькочастотних шумів оптичної емісії плазми, який пройшов обробку в тракті спектрометра (стандартний режим моніторингу процесу) наведений на рис. 6.

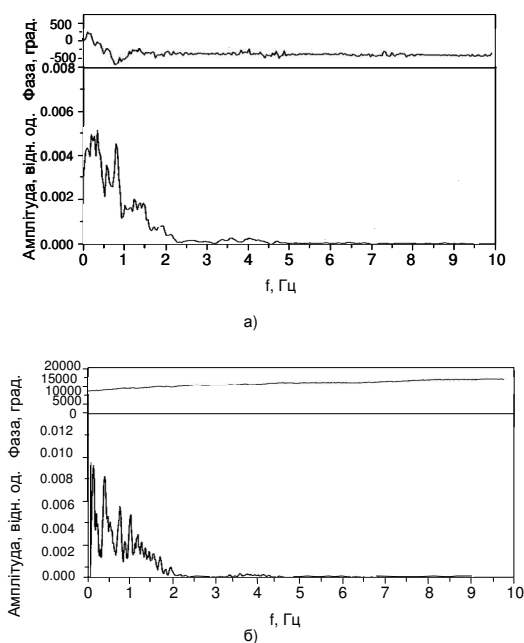


Рис. 6. Спектр емісійних шумів лінії F^* ($\lambda = 703,75$ нм):
а) в стаціонарному режимі травлення шару poly-Si (плазма SF₆/O₂/Ar);
б) в стаціонарному режимі травлення шару SiO₂ (плазма CF₄/He)

Результати, наведені на рис. 6, отримані фур'є-аналізом записів спектрального моніторингу травлення шарів poly-Si і при часовій дискретизації даних 100 мс і містять корисну інформацію в діапазоні – (0 ÷ 5) Гц. Загальним для всіх випадків є характер амплітудно-частотної згинаючої шуму, яка має ви функції $1/f$ («рожевий» шум). Амплітуда шуму максимальна в області інфранизьких частот і спадає на два порядки в області (2 ÷ 3) Гц. Шумовий спектр емісії в цьому діапазоні є широкосмуговим. При травленні полі кремнію смуги частот максимальної амплітуди знаходяться в діапазоні (0 ÷ 1) Гц і більш слабка смуга в діапазоні (3 ÷ 4,5) Гц. Частотний спектр шумів при травленні SiO₂ дещо відрізняється. Тут спостерігаються вузькі максимуми. І хоча загальний діапазон спектру шумів той же, однак кількість смуг більша і вони мають вдвічі більшу інтенсивність ніж при травленні poly-Si.

В момент переходу при травленні від шару poly-Si (Si) до шару SiO₂, і навпаки, спектр шуму буде являти суперпозицію спектрів рис. 6а і рис. 6б. Тривалість фронту моменту end-point (рис. 2, ділянки *a-b* і *c-d*) має порядок (0,2 ÷ 10) с при різній швидкості травлення шарів. Таким чином, частоти корисного сигналу перекриваються шумовими складовими як під час травлення полі- і монокремнієвих шарів, так і під час травлення SiO₂. Це свідчить про те, що застосування простих методів частотної фільтрації емісійного сигналу не дозволить виділити корисний сигнал з маскуючого його шуму. В той же час, синхронне (фазове) детектування оптичної емісії плазми, за умови його контрольованої модуляції, в даних умовах є ефективним засобом виділення корисного сигналу. Підтвердженням цьому є наведені на рис.7 криві емісійного моніторингу процесу травлення SiO₂/Si без фазового детектування і з фазовим детектуванням. Площі вікон травлення 9,2 % і 1,9 % відповідно.

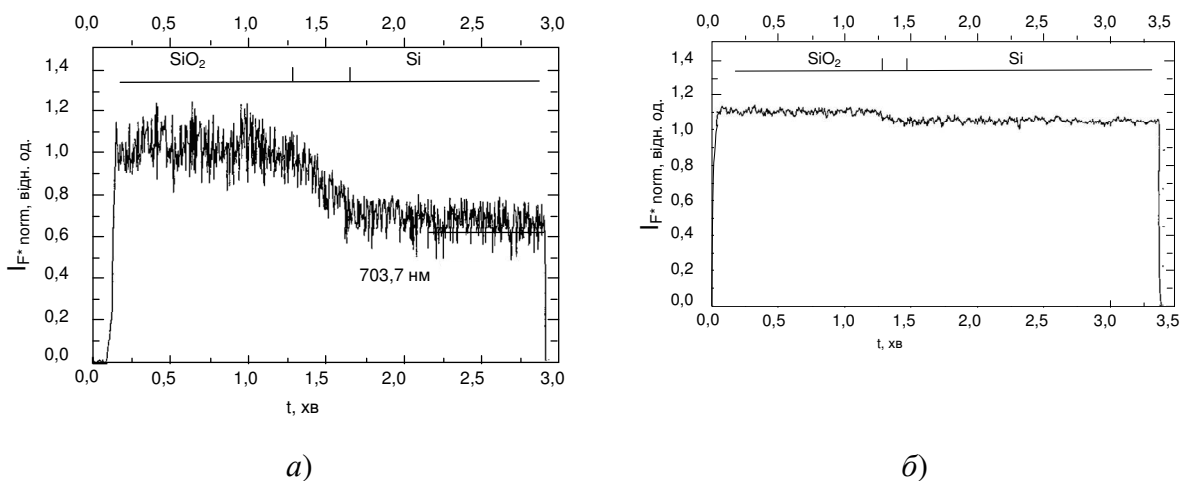


Рис. 7. Криві емісійного моніторингу процесу травлення Si/SiO₂ без фазового детектування (а) і з фазовим детектуванням (б)

Висновок

На прикладі плазмохімічного травлення структур p-Si/SiO₂/Si проаналізовані можливості і перспективи використання оптичного актинометричного методу контролю плазмохімічного травлення при виготовленні приладів сучасної мікро- та наноелектроніки. Наведені результати експериментальних досліджень процесу травлення мікроструктур. Показано, що застосування в процесі моніторингу процесу плазмового травлення фазового детектування сигналу дозволяє значно зменшити шумову його складову і дає практичну можливість використовувати оптичний актинометричний метод для контролю процесу травлення малих площин.

Література

1. Таруи Я. Основы технологии СБИС: Пер с япон. / Я. Таруи – М.: Радио и связь, 1985. – 480 с.
2. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. / Б.С.Данилин, В.Ю.Киреев – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.
3. Орликовский А.А. Проблемы плазмохимического травления в технологии микроэлектроники / А.А.Орликовский, Д.И.Словецкий // Микроэлектроника. – 1987. – Т.16. – № 6. – С.497 – 512.
4. Орликовский А.А. Диагностика *in situ* плазменных технологических процессов микроэлектроники: современное состояние и ближайшие перспективы. Часть I. / А.А. Орликовский, К.В. Руденко // Микроэлектроника. – 2001. – Т.30. – № 2. – С. 85 – 105.
5. Орликовский А.А. Диагностика *in situ* плазменных технологических процессов микроэлектроники: современное состояние и ближайшие перспективы. Часть II. / А.А. Орликовский, К.В. Руденко, Я.Н. Суханов // Микроэлектроника. – 2001. – Т.30. – № 3. – С. 163 – 182.
6. Орликовский А.А. Диагностика *in situ* плазменных технологических процессов микроэлектроники: современное состояние и ближайшие перспективы. Часть III. / А.А. Орликовский, К.В. Руденко // Микроэлектроника. – 2001. – Т.30. – № 5. – С. 323 – 344.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Руденко К.В. Метод оптической актинометрии в применении к химически активной низкотемпературной плазме. // В кн.: «Физические основы плазменных и лучевых технологий» / Под ред. А.Ф. Александрова, В.И. Петрова. М., МГУ, 2000. – С. 57 – 64.
11. Granier A. Validity of actinometry to monitor oxygen atom concentration in microwave discharges created by surface wave in O₂-N mixtures / A.Granier, D.Chereau, K.Henda, R.Safari, P.Leprince // J.Appl.Phys. – 1994. – V. 75. – № 1 – P. 104 – 114.
12. Jenq J.S. Absolute fluorine atom concentrations in RIE and ECR CF₄ plasmas measured by actinometry / J.S.Jenq, J.Ding, J.W.Taylor, N. Hershkowitz // Plasma Sources Sci.Technol. – 1994. – V. 3 – P.154.
13. Kawai Y. Comparison of Fluorine Atom Density Measured by Actinometry and Vacuum Ultraviolet Absorption Spectroscopy / Y.Kawai, K.Sasaki, K.Kadota // Jpn. J. Appl. Phys. – Part 2 – 1997 – V.36 – № 9A/B, P. LI261 – LI264.
14. Allen R.L. Application of neural networks to plasma etch end point Detection / R.L.Allen, R.Moore, M. Whelan // J.Vac.Sci.Technol., B. – 1996. – V.14. – № 1. – P. 498 – 503.
15. Rietman E.A. Dynamic images of plasma processes: Use of Fourier blobs for endpoint detection during plasma etching of patterned wafers / E.A.Rietman, J. T.-C.Lee // J.Vac.Sci.Technol., A. – 1998. – V.16. – № 3. – P. 1449 – 1453.
16. Rietman E.A. Use of ortogonal polynomial functions for endpoint detection during plasma etching of patterned wafers / E.A.Rietman, N.Layadi, S.W. Downey // J. Vac. Sci. Technol., B. – 2000. – V.18. – № 5. – P. 2500 – 2504.
17. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2001. – 303 с.
18. Godyak V.A. Measurements of electron energy distribution in low-pressure RF discharges / V.A.Godyak, R.B.Piejak, B.M.Alexandrovich // Plasma Sources Sei. Technol. – 1992. – V. 1. – P. 36 – 58.
19. Рабек Я. Экспериментальные методы в фотохимии и в фотофизике: В 2-х томах. Т. 1./ Пер. с англ. // М., Мир, 1985. – 608 с.
20. Smith T.H., Boning D.S. Artificial neural network exponentially weighted moving average controller for semiconductor processes / T.H.Smith, D.S.Boning // J.Vac.Sci.Technol., A. – 1997. – V.15. – №.3. – P. 1377 – 1384.