

1. Быстрые алгоритмы обучения нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации / [Малыгин А.Ю., Волчихин В.И., Иванов А.И., Фунтиков В.А.]. – К. : "Монография", 2005. – 273с. – (Издательство Пензенского государственного университета).

2. Малыгин А.Ю. Нейросетевое преобразование биометрического образа человека в код его личного криптографического ключа / Малыгин Александр. – К. : Москва, 2008. – 87 с.

3. Фунтиков В.А. Биометрико-нейросетевое управление криптографическими механизмами защиты информации. «Нейрокомпьютеры: разработка, применение» / Фунтиков В.А. Ефимов О.В.; пер. с англ. Иванов А.И. – М. : Буквица, 2007. – 6– 8 с.

Надійшла 24.9.2012 р.

Рецензент: д.т.н. Снитюк В.Е.

УДК 621.382

Ю.С. КРАВЧЕНКО, С.Ю. КРАВЧЕНКО

Вінницький національний технічний університет

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕМІСІЙНО-СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ В ПЛАЗМОВІЙ ТЕХНОЛОГІЇ

*Досліджена можливість організації контролю плазмохімічних процесів в мікроелектронній технології на основі використання сумарного інтегрального випромінювання декількох спектральних ліній або смуг, зміна інтенсивності яких відображає хід технологічного процесу травлення мікроструктур, зокрема, спектральних ліній збуджених атомів хлору в діапазоні довжин хвиль 725,6– 754,4 нм.*

*The possibility of controlling plasma processes in microelectronic technology on the basis of the total integral radiation of several spectral lines or bands change in intensity which reflects the technological process of digestion microstructures, in particular, the spectral lines of excited chlorine atoms in the wavelength range 725.6 – 754.4 nm*

Ключові слова: плазмохімічна технологія, емісійно-спектральний контроль, чотирихлористий вуглець, ефективність.

### Вступ

Питання ефективності контролю в мікроелектронній плазмохімічній технології, яка на даний час практично безальтернативно забезпечує точність відтворення функціонального рельєфного рисунку на кремнієвих пластинах до Ø300 мм на рівні  $\leq 0,13$  мкм [1], пов'язане з суттєвим зменшенням розмірів функціональних елементів інтегральних мікросхем і їх ущільненням в межах самої мікросхеми. 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 [2– 3], сутність якого полягає в реєстрації та дослідженні оптичного спектру власного випромінювання збуджених атомів та молекул [4– 6], а переваги забезпечуються можливістю відносно простого оперативного отримання інформації про хід цільового технологічного процесу і його безконтактність.

При достатньо великому співвідношенні сигнал/шум відносно прості задачі управління, наприклад, визначення моменту закінчення цільового процесу травлення, вирішуються на основі візуальної інтерпретації кінетичних кривих сигналу реального часу і порівнянням зі зразковими записом сигналу. Складності для розв'язання цієї простої задачі виникають по мірі зменшення площі пластини, яка піддається плазмовому травленню (в такому випадку складова шуму у співвідношенні сигнал/шум збільшується) [1, 7]. Проблеми виникають також при здійсненні багатостадійних процесів, які пов'язані зі зміною плазмоутворюючих газів та механізму взаємодії хімічно активних частинок плазми з поверхнею твердого тіла.

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.

Підвищення ефективності емісійно-спектрального контролю плазмохімічних процесів на даний час вирішується різними методами: підвищенням чутливості відповідних фотоелектронних сенсорів, введенням частотного перетворення інформаційного сигналу [8], запровадженням багатоканального контролю [9– 12], використанням сучасної мікропроцесорної техніки [11].

Мета даної роботи – аналіз можливостей підвищення ефективності контролю плазмохімічних процесів в мікроелектроніці за рахунок спрощення структури контролюючих приладів і використання в якості інформаційного сигналу інтегрального власного випромінювання декількох спектральних ліній або смуг продуктів розкладання основної молекули плазмоутворюючого газу.

### Аналіз проблеми

Аналіз проблеми будемо проводити на прикладі використання в якості плазмоутворюючого газу чотирихлористого вуглецю або тетрахлорметану ( $CCl_4$ ). Цей газ широко використовується в мікроелектронній плазмовій технології при плазмохімічному травленні мікроструктур з арсеніду галію, металевих плівок (Al, Cu), інших матеріалів, що знайшли застосування в сучасній мікро- та наноелектроніці [12].

Дослідження плазми чотирихлористого вуглецю [13, 14] показали, що в первинних актах розкладання в плазмі основної молекули утворюються радикали  $\text{CCl}_3$ ,  $\text{CCl}_2$ , атоми та молекули хлору. Радикали  $\text{CCl}$  утворюються лише у вторинних хімічних реакціях і їх концентрація в плазмі не є значною (приблизно 1–2%). В той же час найбільшу концентрацію в такій плазмі мають радикали  $\text{CCl}_2$ , які є достатньо хімічно активними, і атоми хлору [15].

Логічно було б передбачити, що інтенсивність випромінювання цих частинок повинна бути найбільшою і придатною для використання відповідних спектральних ліній або смуг в якості інформаційних сигналів при організації емісійно-спектрального контролю за ходом цільового технологічного процесу, оскільки інтенсивність спектральних ліній і смуг напряму залежить від концентрації відповідних збуджених частинок плазми [14–15], а зміна цієї концентрації внаслідок взаємодії хімічно активних частинок плазми з поверхнею твердого тіла буде опосередковано відображати в часі хід процесу травлення тої чи іншої структури.

Спектр випромінювання розряду (рис. 1) [13] реєстрували за допомогою монохроматора МДР-4 (ФЭУ-85, ФЭУ-100) на самописному приладі ЛКС-4 в діапазоні тисків 25–70 Па та густин струму розряду 4–20  $\text{mA/cm}^2$ .

Як бачимо, що в області 450–650 нм на фоні досить інтенсивного континууму, який відносять до випромінювання збуджених радикалів  $\text{CCl}_3$ , спостерігаються чіткі спектральні лінії атомів хлору (перша і друга позитивні системи), а також смуги радикалу  $\text{CCl}_2$ , інтенсивність яких зростає по відношенню до інтенсивності континууму зі зростанням густини струму. Збуджені радикали  $\text{CCl}$ , які є результатом вторинних хімічних реакцій, випромінюють переважно в ультрафіолетовій області ( $\lambda = 278 \text{ нм}$ ).

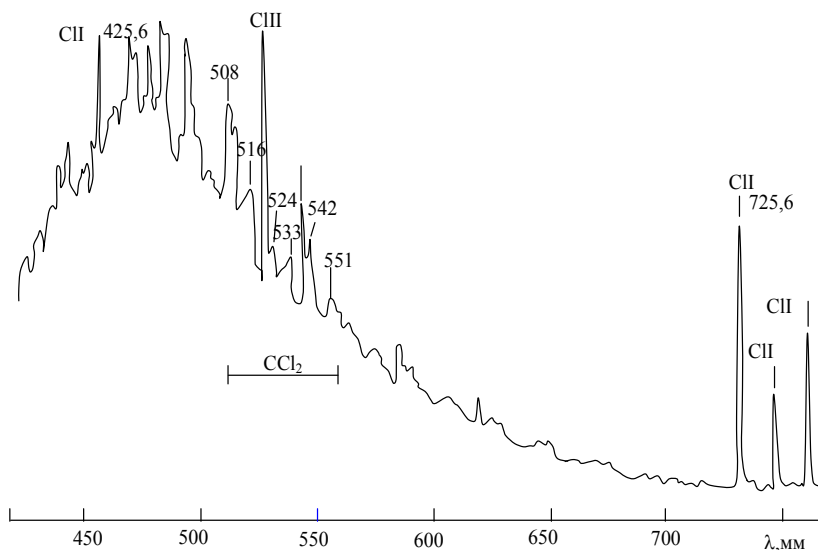


Рис. 1. Спектр випромінювання плазми постійного струму в  $\text{CCl}_4$ , в області 400–800 нм;  $p = 60 \text{ Па}$ ,  $j = 4 \text{ mA/cm}^2$

Аналіз спектру випромінювання нерівноважної плазми, що збуджується в газовій суміші на основі чотирихлористого вуглецю показує, що використання в якості джерел інформаційного сигналу для здійснення емісійно-спектрального контролю випромінюючих переходів збуджених радикалів  $\text{CCl}_2$  є недоцільним, оскільки відповідні спектральні смуги не є достатньо інтенсивними на фоні континууму і не вирізняються хорошою роздільною здатністю. Використання ж спектральних смуг радикалів  $\text{CCl}_3$  та  $\text{CCl}$  недоцільне крім того внаслідок малої відносної концентрації цих радикалів в плазмі.

В той же час, в області довжин хвиль 725,6–754,4 нм спостерігаються спектральні лінії атомарного хлору (перша позитивна система), які є достатньо інтенсивними і відокремленими від інших спектральних ліній або смуг. Атоми хлору при розкладанні в плазмі основної молекули плазмоутворюючого газу мають одну з найбільших концентрацій, хімічно дуже активні при взаємодії такої плазми з поверхнею твердого тіла, а значить, вступаючи в хімічні реакції з матеріалом поверхні напівпровідникової пластини, змінюють свою відносну концентрацію, що безперечно змінить інтенсивність випромінюючих переходів для збуджених атомів хлору. Крім того, розташування цих спектральних ліній на спектральній характеристиці і їх відокремленість і в той же час компактність дозволяє використовувати для організації спектрального контролю не одну з цих ліній, а їх сукупність, тобто, використовувати сумарне інтегральне випромінювання кількох спектральних ліній, що безумовно суттєво підвищить чутливість відповідних фотоперетворювальних сенсорів.

Треба зазначити, що ефективність контролю не пов'язана лише зі збільшенням чутливості фотодетекторів, але й із апаратною складністю розробляємих пристроїв та ступенем універсальності методики контролю.

Так в свій час практичні технологічні пристрої емісійно-спектрального контролю були позбавлені універсальних і відповідно дорогих вимірювальних приладів (спектрографів, монохроматорів), а натомість в систему контролю були введені відносно прості і значно дешевші оптичні інтерференційні фільтри [6, 7, 9], які давали можливість при незначних втратах інтенсивності виокремлювати на відповідній довжині хвилі із смугою пропускання 10–12 нм ту чи іншу частину загального спектру випромінювання плазми, що

представляла інформаційний інтерес для контролю плазмохімічного технологічного процесу.

В той же час застосування таких оптичних фільтрів не завжди було простим, оскільки випромінювання збуджених продуктів взаємодії плазми з поверхнею твердого тіла дуже часто, як, наприклад, при травленні алюмінію [16], відбувалось поза межами видимого діапазону, а саме на довжині хвилі  $\lambda = 261,4$  нм (спектральна смуга молекули  $AlCl$ ).

Особливістю ж запропонованої концепції організації емісійно-спектрального контролю плазмохімічних процесів є можливість відмовитись від спектральних приладів, які, зазвичай використовуються для виділення певної спектральної лінії або смуги, придатної для використання в якості джерела інформаційного сигналу, оскільки максимум спектральної чутливості деяких фотодетекторів на основі кремнію або селеніду кадмію [17] як раз і знаходиться у вказаному діапазоні, а область чутливості таких детекторів практично співпадає з зазначеним діапазоном довжин хвиль.

#### Висновок

На основі аналізу метода емісійно-спектрального контролю і експериментальних даних щодо спектру випромінювання нерівноважної плазми чотирихлористого вуглецю запропоновано нову концепцію організації контролю плазмохімічних процесів в мікроелектронній технології на основі використання сумарного інтегрального випромінювання декількох спектральних ліній або смуг, зміна інтенсивності яких відображає хід цільового технологічного процесу травлення мікроструктур. Згідно з цією концепцією при використанні в якості плазмоутворюючого газу чотирихлористого вуглецю рекомендовано використовувати в якості джерела інформаційного сигналу спектральні лінії збуджених атомів хлору в діапазоні довжин хвиль 725,6–754,4 нм.

#### Література

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. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольдгревена. – М. : Мир, 1971. – 552 с.
3. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хадлстоуна, С. Леонарда – М. : Мир, 1967. – 515 с.
4. Контроль процессов травления материалов в низкотемпературной газоразрядной плазме / В.С.Данилин, В.Ю.Киреев, В.А.Каплин та ін // Приборы и техника эксперимента. – 1982. – № 1. – С. 13–28.
5. 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.
6. Даниленко О.О. Оптичний емісійно-спектральний контроль процесів травлення в низкотемпературній плазмі / О.О.Даниленко, Ю.С.Кравченко, В.С.Осадчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології – 2005. – № 2 (10). – С. 173–180.
7. 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.
8. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі структур з від'ємним опором / Осадчук О.В. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2001. – 303 с.
9. 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. – 2007. – Бюл. 16.
10. Диагностика плазмохимического травления  $SiO_2/Si$  и определение момента окончания травления / Ю.П. Барышев, А.П. Ершов, К.Ш. Исаев и др // Микроэлектроника. – 1996. – Т. 25. – № 5. – С. 373–379.
11. Багатоканальна система реєстрації спектру випромінювання нерівноважної плазми / В.М.Білілівський В.М., С.Ю.Кравченко, Ю.С.Кравченко, В.С.Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 173–178.
12. Кравченко С.Ю. Багатоканальні системи для оптичного емісійно-спектрального контролю плазмохімічних процесів травлення мікроструктур / С.Ю. Кравченко, Ю.С. Кравченко, В.С. Осадчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології – 2011. – № 1 (21). – С. 127–135.
13. Кравченко Ю.С. Начальные стадии разложения тетрахлорметана в неравновесных электрических разрядах / Ю.С. Кравченко, В.С. Осадчук, Д.И. Словецкий, В.Н. Коровянок // Химия высоких энергий. – 1989. – Т. 23. – № 5. – С. 444 – 449.
14. Кравченко Ю.С. Релаксацийний метод дослідження плазмохімічних процесів / Ю.С. Кравченко, В.С. Осадчук, С.Ю. Кравченко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 1 (11). – С. 215–121.
15. Кинетика образования и гибели атомов и молекул хлора, хлоруглеродных радикалов в тлеющем разряде в тетрахлорметане / Ю.С. Кравченко, В.С.Осадчук, Д.И.Словецкий, С.В.Таранов // Химия высоких энергий. – 1989. – Т.23. – № 6. – С. 539–544.
16. 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.
17. Справочник по приемникам оптического излучения / В.А. Волков, В.К. Гассанов и др. – К. : Техніка, 1985. – 216 с.

Надійшла 18.9.2012 р.  
Рецензент: д.т.н. Білінський Й.Й.