

PACS 07.50.EK

С.П. Новосядлий

Аероіонізація ламінарних потоків чистих приміщень субмікронної технології великих інтегральних схем

*Прикарпатський університет імені Василя Стефаника, фізичний факультет,
вул. Галицька, 201, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна*

В даній статті проведено комплекс досліджень по зниженню запиленості ламінарних повітряних потоків в чистих технологічних зонах і на цій основі розроблені конструкції аероіонізаторів, які не тільки підвищують на порядок клас чистоти, але і нейтралізують електростатичний заряд та стабілізують вологість і температуру в чистих технологічних зонах формування субмікронних структур ВІС.

Ключові слова: аероіонізатори, електростатичний заряд, субмікронні структури ВІС.

Стаття постуила до редакції 07.03.2002; прийнята до друку 23.05.2002.

Вихід придатних структур ВІС, сформованих на кремнієвих пластинах визначається дефектністю функціональних шарів. На останню безпосередньо впливає як чистота газового потоку в реакторі осадження, так і чистота ламінарних потоків чистих приміщень технологічного модуля [1,2]. Підвищення температури на 10 С в чистій зоні проекційної літографії викликає лінійне збільшення розміру кремнієвих пластин діаметром 100 мм на 0,24 мкм, що знижує роздільну здатність літографічного процесу. Тому для реалізації субмікронних топологічних розмірів структур ВІС необхідно забезпечити не тільки низьку дефектність функціональних шарів ($< 0,05 \text{ см}^{-2}$), але і високу роздільну здатність і анізотропію проекційної літографії (в межах 0,18-0,25 мкм). Її можна досягти лише аероіонізацією ламінарного повітряного потоку, яка забезпечить стабільність температурно-вологісного режиму чистих зон проекційної літографії класу 0,1 по температурі в межах $\pm 0,10 \text{ С}$ та по вологості в межах $\pm 3 \%$, бо інші методи мають дуже високу інерційність.

Найбільш багаточисельні дефекти, викликані прилипанням частинок до поверхні кремнієвих пластин з топологією структури ВІС, утворюються в процесі літографії, в тому числі і проекційної. Вони є причиною дефектів при формуванні структурних шарів і їх плазмохімічного травлення. Коли мікрочастинки діаметром 0,1-0,5 мкм прилипають до поверхні кремнієвої пластини в процесі формування функціональних шарів, у тому числі епітаксійних, то це приводить до локальних дефектів в структурах ВІС, що знижує не тільки вихід придатних, але і їх надійність. Тому вивчення впливу різних дефектів на вихід придатних і надійність здійснюється

комп'ютерним моделюванням процесів з використанням багаточинної цільової функції дефектності D через відповідні розподіли дефектів в тестових структурах технологічного САПРу [3]:

$$Y = \int_0^{\infty} e^{-AD} f(D) dD \quad (1)$$

$$\int_0^{\infty} f(D) dD = 1, \quad (2)$$

у вигляді моделей:

Пуассона:

$$Y = e^{-AD}, \quad (3)$$

Мерфі:

$$Y = \left(\frac{1 - e^{-AD}}{AD} \right)^2, \quad (4)$$

Бозе-Ейнштейна:

$$Y = \left(\frac{1}{1 + AD/n} \right)^n, \quad (5)$$

Сідса:

$$Y = e^{-\sqrt{AD}}, \quad (6)$$

Гаусса:

$$Y = \prod_{i=1}^N Y_n = \prod_{n=1}^N (1 + S_n A_n D_{n0})^{-1} S_n = \exp(-AD), \quad (7)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^N A_n D_{n0}$$

де D_{n0} – середня густина дефектів певного типу, S_n – коефіцієнт форми розподілу дефектів, A_n – площа топології структури n -функціонального шару.

В загальному дефектність визначається такими факторами:

- чистотою ламінарного повітряного потоку в локальних чистих зонах;
- дефектністю процесів формування функціональних шарів;
- чистотою матеріалів, газів, деіонізованої води;
- чистотою спецодягу працюючого персоналу в чистих зонах.

Виходячи з вище наведеного, головними чинниками дефектності структур ВІС є запиленість ламінарних повітряних потоків чистих зон технологічного модуля. Власне, зупинимось на проблемі чистоти класів 10,1/0,1 технологічних зон. Для отримання такого класу чистоти кратність повітряного обміну повинна складати не менше 600-900 год¹. Проте проблему чистоти класу 0,1 та зниження електростатичного потенціалу з 10-15 кВ до рівня менше 100 В методами фільтрації і кратністю обміну реалізувати не можна. Крім цього, існує тісний зв'язок між прилипанням пилинок і величиною електростатичного заряду, причому зниження вологості повітряного потоку знижує коефіцієнт прилипання частинок. Зниження вологості до 30 % стабілізує коефіцієнт прилипання на рівні 0,22-0,25, а з використанням аероіонізації ламінарного повітряного потоку – до 0,12-0,15 (рис. 1.).

Виникнення електростатичних зарядів в процесі формування структур ВІС є важливим фактором погіршення стану чистого середовища, що приводить до зниження виходу придатних структур ВІС. Робота по дослідженню причин виникнення електростатичних зарядів в напівпровідниковому виробництві і розробка методів запобігання його утворення та ліквідації статзарядів посилилось у зв'язку з тенденцією до підвищення степені інтеграції великих інтегральних схем. Нами ця задача вирішена аероіонізацією ламінарного повітряного потоку в чистій зоні, яка дозволила вийти на клас чистоти 0,1 в технологічному модулі формування субмікронних структур ВІС топологічних розмірів

0,25-1,0 мкм.

В даній статті запропонована модель підвищення класу чистоти в локальній зоні обробки кремнієвих пластин аероіонізацією ламінарних повітряних потоків, основаної на броунівському русі та механіці Стокса, електростатичних силах і показано, що частинки, які забруднюють поверхню хімічно оброблених Si-пластин є зарядженими і електростатичний потенціал може досягати 10-15 кВ. Це суттєво понижує електричну стабільність та надійність структур ВІС.

Електростатичний заряд, зв'язаний з тертям частинок, генерується завжди, коли два об'єкти контактують один з одним, а потім роз'єднуються. Величина генерованого заряду залежить як від фізичних і електричних властивостей самих матеріалів, так і швидкості їх роз'єднання. Електрична енергія, зв'язана з зарядом на поверхні Si-пластин, по відношенню до землі описується квадратичною залежністю від електростатичного потенціалу:

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2},$$

де Q – електричний заряд на поверхні Si-пластин; C, U – ємність поверхні Si-пластин і напруга на їх поверхні по відношенню до землі.

Таки чином, накопичена енергія електростатичного потенціалу зменшує вихід придатних структур ВІС завдяки:

1) притягання частинок до поверхні Si-пластин завдяки електростатичним силам між частинками і їх поверхнею, що прискорює генерацію дефектоутворення функціональних шарів структур ВІС;

2) швидке розсіяння накопиченої енергії приводить не тільки до збільшення дефектності функціональних шарів, але і до деградації електричних параметрів із-за підвищення нестабільності зарядового стану міжфазної межі Si-SiO₂ та надійності структур ВІС.

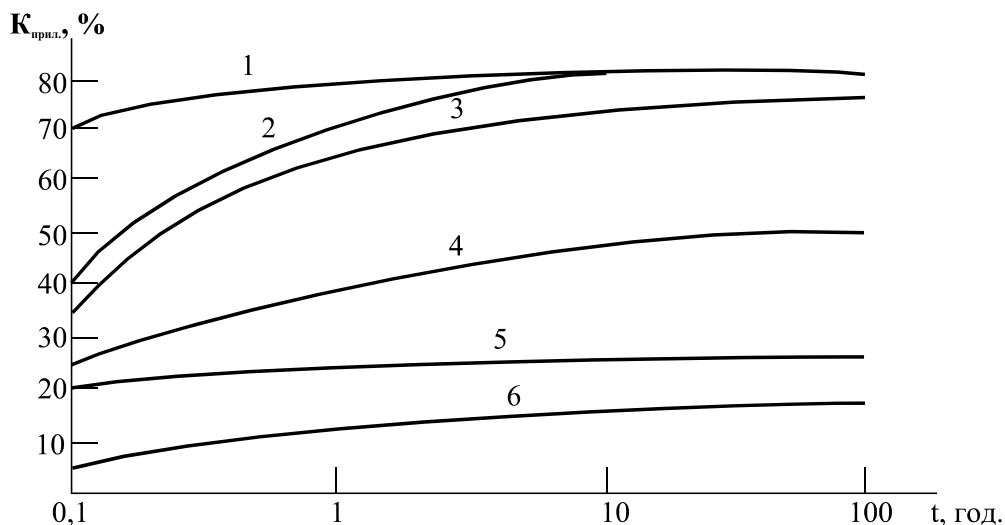


Рис.1. Залежність коефіцієнта прилипання для частинок діаметром 0,5 мкм (криві 1, 2, 3, 4, 5) і 0,1 мкм (крива 6) від відносної вологості ламінарного повітряного потоку: 1-94 %; 2-84 %; 3-60 %; 4-40 %; 5,6-30 % з аероіонізацією.

У проведеній даній роботі показано, що дефектність та нестабільність характеристик структур ВІС зменшується на один-два порядки за рахунок аероіонізації ламінарних повітряних потоків, що формують чисті локальні зони в технологічних модулях. Конструктивно це досягається за рахунок використання іонізаторів як біполярної точкової, так і сіткової конфігурацій [3,4]. В джерелі іонів з біполярною точковою структурою в ролі протилежного електрода використовується заземлена поверхня фальш-підлоги. В іонізаторі з сітковою структурою поле зв'язується через постійний фіксований протилежний електрод, що знаходиться в обезпиленій комірці чистої зони.

Обидві системи живляться імпульсною високовольтною напругою 9-12 кВ частотою 1,5-2,5 Гц і шпаруватістю 0,03 (12/400 ms) для сіткового джерела та частотою 0,8-1,2 Гц і шпаруватістю 0,35 (200/600 ms) для біполярного голчатого джерела. Тривалість імпульсів змінювалась від 0,01 до 1 с. Вимірювання величини електростатичного потенціалу проводилось з використанням монітора фіксації електростатичного заряду (SORBIOS модель ЕМЕ-1000), точність якого складала ± 1 В.

Проведені дослідження базувались на таких експериментальних тестах, що дали змогу:

оптимізувати форму і амплітуду напруги для двох систем аероіонізації іонів відносно часу нейтралізації, шпаруватості і частоти імпульсів;

встановити залежність між часом нейтралізації електростатичних зарядів, коефіцієнтом прилипання частинок та швидкістю і вологістю ламінарних повітряних потоків в межах 0,05-0,5 м/с;

дослідити часову нейтралізацію в різних точках на робочій поверхні стола, на якому обробляються Si-пластини, яка не перевищувала 17-19 с;

дослідити ефективність фінішної фільтрації чистих зон (рис. 2) в залежності від типу фільтрів в обезпиленіх комірках і діаметра частинок ламінарного потоку;

встановити оптимальний час нейтралізації для зменшення величини потенціалу електростатичного заряду до рівня ≤ 100 В, що є важливо для К-МОН структур ВІС. Середній час нейтралізації позитивних зарядів не перевищував 15 с, а від'ємних - ≤ 19 с при оптимальному часі нейтралізації 5-10 с;

провести моделювання аероіонізованого

ламінарного потоку з використанням рівнянь руху газу Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u,$$

де u, v, w – компоненти швидкості газового потоку по осям координат; p – статичний тиск; ρ – густина повітряного потоку; ν – динамічна в'язкість;

провести моделювання дифузійного рівняння Фіка:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \nabla^2 C,$$

де C, D – концентрація і коефіцієнт дифузії частинок в ламінарному повітряному потоці;

визначити розподіл частинок в локальному чистому іонізованому об'ємі;

встановити, що електрзарядженість ламінарного повітряного потоку є таким же важливим параметром мікроклімату технологічного модуля як температура, вологість, тиск, швидкість потоку, запиленість, кратність обміну, величина електростатичного потенціалу і становить (по лічильнику АСІ-1) в межах $2,5 \cdot 10^3 - 6,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ з коефіцієнтом уніполярності $K_y = n(+)/n(-) = 2 \div 0,5$ та дозволяє здешевити вартість чистих приміщень як мінімум на порядок;

розробити аспіраційний лічильник АСІ і методику для вимірювання концентрацій аероіонів в ламінарному повітряному потоці чистих зон технологічного модуля;

підвищити на порядок вологість ($\pm 3\%$) і температурну стабільність ($\pm 0,10$ С) в чистій локальній зоні класу 1/0,1 проекційної літографії;

підвищити ефективність фільтрів тонкої очистки на два порядки і стабільність швидкості ламінарного повітряного потоку до $\pm 0,05$ м/с при зниженні кратності обміну до 250-320 год⁻¹.

Таким чином, використання процесу аероіонізації ламінарного повітряного потоку дозволяє підвищити клас чистоти на 1-2 порядки в ламінарних локальних чистих зонах індивідуальної обробки Si-пластин, точність суміщення оптичної проекційної літографії до $\pm 0,1$ мкм та забезпечує рівень контролю частинок 0,1 мкм замість 0,5 мкм, температури $\pm 0,10$ С та вологості $\pm 3\%$ при формуванні структур субмікронних розмірів (0,25-1,0 мкм) ВІС. Дослідна експлуатація таких чистих зон оптичної проекційної літографії на ВАТ „Родон”

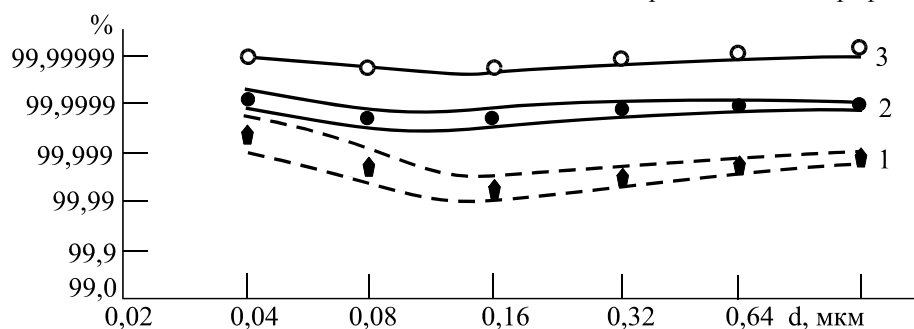


Рис.2. Залежність ефективності фільтрації ультратонких фільтрів Нера з різною фільтруючою коміркою (1-0,3 мкм; 2-0,1 мкм; 3-0,1 мкм з аероіонізатором) від діаметра мікрочастинок ламінарного потоку.

показала дуже високу ефективність. Таке формування параметрів мікроклімату з допомогою аероіонізації ламінарних повітряних потоків з успіхом може бути застосоване в біомедичній, фармацевтичній техніці в технології виготовлення

препаратів та в операційних „чистих кімнатах”.

Новосядлий С.П. – кандидат технічних наук, професор.

- [1] И. Хаякавы под ред. *Чистые помещения*. Мир, М. 423 с (1990).
- [2] М.М. Бубейников. Основы и особенности чистых и ультрачистых производств субмикронных УБИС с индивидуальной обработкой кремниевых пластин. // *Зарубежная радиоэлектроника*, **6**, сс. 34-40 (1996).
- [3] S. Novosiadlyi, M. Mykhalchuk, D. Fedasyuk. Basic Principles and Elements of highly effective System Technology of VLSI Microelectronics // *Proceedings of the 6-th International Conference “Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES’-99”*, Krakov, Poland. pp. 267-270 (1999).
- [4] С.П. Новосядлий, Я.С. Буджак. Формування чистих технологічних зон іонізацією ламінарних повітряних потоків // *Тези доповідей науково-технічної конференції „Проблеми і шляхи реалізації науково-технічного потенціалу військово-промислового комплексу”*, Київ, сс. 132-133 (2000).

S.P. Novosyadlyy

Aeroionization of Laminar Flows of Pure Locations of Sub-Micron Technology of Large Integrated Circuits

‘Vasyl Stefanyk’ Prekarpathion University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

In this paper the offered model of raising the purity class in a local workpiece range of silicon laminas aeroionization of laminar airflows, founded on Brown driving and mechanics of the Stokes, electrostatic forces also is rotined, that parts, which one pollute a surface of the chemically treated Si-laminas are charged and the electrostatic potential can reach 10-15 kV. It essentially reduces electrical stability and reliability of structures VLSI.