

УДК 621.382.8

С.П. Новосядлий
**Амплітудно-фазозсувні маски для ПФО проекційної літографії
субмікронної технології ВІС**

*Прикарпатський університет імені Василя Стефаника
вул. Шевченка, 57 м. Івано-Франківськ, 76000 Україна*

Розроблена технологія формування прозорих і просвітлюючих покриттів для амплітудно-фазозсувних фотошаблонів оптичної проекційної літографії.

Ключові слова: оптична літографія, амплітудна маска, фазозсувна маска, контраст зображення, проміжний фотооригінал.

Стаття постуила до редакції 17.08.2002; прийнята до друку 23.09.2002

Проекційна літографія в своєму процесі використовує так звані проміжні фотооригінали (ПФО), за допомогою яких переноситься зображення від об'єкта-фотошаблону на фоторезист-зображення. Тепер зупинимось на процесі передачі зображення від ПФО на фоторезист. Всякий об'єкт в площині зображення описується як функція яскравості $B(x,y)$ в площині

об'єкта. По теорії перетворення Фур'є будь-яку періодичну функцію освітленості (яскравості) $B(x,y)$ можна представити як послідовність синусоїдних розподілів яскравості на різних просторових частотах від 0 до ∞ :

$$B(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(R_x, R_y) e^{2\pi i(R_x \cdot x + R_y \cdot y)} dR_x dR_y, \quad (1)$$

де $\tau(R_x, R_y)$ – частотна функція передачі, яка визначається через освітленість $B(x,y)$ та просторову частоту

у вигляді:

$$\tau(R_x, R_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} B(x,y) e^{-2\pi i(R_x \cdot x + R_y \cdot y)} dx dy. \quad (2)$$

Тобто частотна функція $\tau(R_x, R_y)$ є результат перетворення Фур'є функції освітленості $B(x,y)$:

$$\tau(R_x, R_y) = F[B(x,y)] \quad (3)$$

Аналогічно записується розподіл яскравості в

полі зображення на плівці фоторезисту при його експонуванні:

$$B^1(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tau^1(R_x, R_y) e^{2\pi i(R_x \cdot x + R_y \cdot y)} dR_x dR_y, \quad (4)$$

для якої частотна функція $\tau^1(R_x, R_y)$ визначається че-

рез функцію освітленості $B^1(x,y)$:

$$\tau^1(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} B^1(x, y) e^{-2\pi i(R_x x + R_y y)} dx dy = F [B(x, y)] \quad (5)$$

Між частотними функціями об'єкта і зображення є залежність через функцію оптичної передачі $D(R_x, R_y)$:

$$\tau^1(x, y) = D(R_x, R_y) \tau(R_x, R_y) \quad (6)$$

Перетворення Фур'є для цієї функції визначається виразом:

$$D(R_x, R_y) = F(B^1(x, y)) = T(R_x, R_y) e^{i\theta(R_x, R_y)}, \quad (7)$$

де $T(R_x, R_y)$ – амплітуда яскравості або функція модуляції передачі (ФМП); $\theta(R_x, R_y)$ – зсув фаз при передачі зображення або функція фази передачі (ФФП) зображення.

Або $\tau^1(R) = D(R) \tau(R)$, що значить, що зображення отримує спектр частот $\tau^1(R)$, який визначається частотною характеристикою об'єкта $D(R)$ і його частотним спектром, тобто $D(R)$ – це частотно-контрастна характеристика об'єкта-шаблону:

$$D(R) = T(R) e^{i\theta(R)}.$$

Звідки фотошаблони ПЛ, для яких виконується залежність $T(R)$, називають Т-шаблонами, а фотошаблони, для яких виконується $D(R)$ називають Ф-шаблонами.

Таким чином, частотно-контрастна характеристика об'єкта-шаблону $D(R)$ визначається спектральною характеристикою покриття фотошаблону, яке визначає як передачу модуляції $T(R)$, так і передачу фази $\theta(R)$.

Вперше ідея використання Ф-шаблонів, які міняють фазу падаючого на них світла, була запропонована авторами [3,4] для підвищення роздільної здатності оптичної контактної фотолітографії. На відміну від звичайних Т-шаблонів, які модулюють освітлювальний потік тільки по амплітуді (коефіцієнту пропускання) у відповідності до топологічних шарів структур ВІС, фазові Ф-шаблони представляють собою транспаренти, які модулюють як амплітуду, так і фазу світлового потоку по площі модуля експонування. Це дозволяє підвищити контрастність зображення і роздільну здатність, як мінімум, на 30-40%. Крім цього, вони покращують стійкість оптичних проєкційних систем до дефокусування.

Нами розроблені оригінальні методи формування зносостійких покриттів Ф-шаблонів, які мають невисоку поглинаючу здатність (10% проти 50% для хромових) і малий коефіцієнт відбивання, що дозволяє уникнути інтерференційних та дифракційних ефектів і отримати мінімальні топологічні розміри структур ВІС (0,25-0,35 мкм). Функція передачі $D(R)$ для більш коротких УФ хвиль (193-254 нм) збільшується від 0,45 до 0,9, що зменшує розмитість краю мінімального топологічного елемента до величини 0,1-0,15.

Зміна коефіцієнта заломлення діелектричних та металевих плівок Ф-шаблонів дозволяє формувати як транспарентні, так і просвітлюючі покриття шаблонів [5].

Таке транспарентне покриття в виді легованих плівок тугоплавких, перехідних і рідкоземельних металів (РЗМ) або їх оксидів чи легованих плівок оксиду заліза формується на скляних оптичних підкладках К-8 методами іонно-плазмового магнетронного розпилення мішені із легованого тугоплавкого металу і піролізу пентакарбонілу заліза $Fe(CO)_5$ в реакторі атмосферного тиску при $T = 120-180^\circ C$ з використанням добавок тугоплавких, перехідних металів, які зміщують спектральну характеристику поглинання в область коротких хвиль [6]. Такі покриття на основі оксидів заліза і тугоплавких металів мають пропускання в області видимого спектра на рівні 75-80%, а в області коротких хвиль ≤ 420 нм пропускання в ньому відсутнє. Легуючі добавки у виді тугоплавких, перехідних і РЗМ та їх оксидів і оксиду заліза зміщують не тільки амплітудну характеристику $T(\lambda)$ в короткохвильову область, але і змінюють фазову характеристику $\theta(\lambda)$, яка складає $\theta = 1,26-2,48$ для довжин хвиль $\lambda = 193-465$ нм.

Основними матеріалами для формування таких транспарентних плівок використовують карбоніли $Me_n(CO)_n$: Ni, Co, Fe, Ru, Mo, W, Os, Nb, V і сполуки металу з галогенами $Me\Gamma_n$: Ta, Ti, Cr, Sn, In, Al, Fe, Co, Zn а також сплави ВХ 2К і ВХ 2У. Правильно вибравши склад оксидів, що відповідає певному значенню коефіцієнта заломлення, можна встановити спектральну характеристику таку, що не будуть пропускатись більш короткі хвилі. Тобто, діелектрична оксидна плівка діє як фільтр низької частоти на пропускання ультрафіолетового світла в залежності від величини коефіцієнта заломлення плівки. Крім цього, змінюється також коефіцієнт відбивання плівки в залежності від величини коефіцієнта заломлення:

$$R = \frac{(n_1 n_3 - n_2^2)^2}{n_1 n_3 + n_2^2}, \quad (8)$$

де n_1, n_2, n_3 – коефіцієнти заломлення скляної підкладки, діелектричної (металевої) плівки і повітря.

Легування діелектричної плівки Fe_2O_3 оксидами

тугоплавких та перехідних металів відбувається в процесі піролізу пентакарбонілу заліза $\text{Fe}(\text{CO})_5$ в реакторі атмосферного тиску на установці ЕТМ2.039.000. Коефіцієнти поглинання, відбивання і заломлення ультрафіолетових променів, які визначають амплітудну і фазову модуляції зображення, залежать від співвідношення оксидів в даній плівці і при її оптимальній товщині збільшують роздільну здатність таких фазових шаблонів на 35-50 %.

Описаний спосіб формування прозорих плівок для Ф-шаблонів не є високотехнологічним процесом, бо, з однієї сторони, є певна трудність в легуванні плівки Fe_2O_3 оксидами рідкоземельних (Sc, Y, La, Ho) та напівпровідникових матеріалів (Si, Sb, Sn, Ge) і, з другої сторони, карбонати – це шкідливі хімічні речовини і їх використання потребує певного екологічного захисту.

Нами розроблений і апробований більш ефективний метод формування легованої плівки Fe_2O_3 оксидами тугоплавких, перехідних і рідкоземельних металів плазмовим реактивним магнетронним розпиленням комбінованої мішені сплаву ВХ 2К (ВХ 2У), в яку запресовані штирі легуючих домішок, на установці “Ораторія 5” в аргонній плазмі, що легується киснем (0-50 %). Це дозволяє в широких межах регулювати як співвідношення оксидних (металевих) фаз, так і використовувати більш широкий спектр оксидів рідкоземельних і напівпровідникових матеріалів, що зробити піролізним методом практично неможливо. Особливу увагу заслуговує метод металізації фотошаблонних заготовок, на яких реалізуються Ф-шаблони, – метод іонно-плазмового розпилення хромової мішені, легованими домішками тугоплавких, рідкоземельних і напівпровідникових елементів. Введення цих домішок змінює як поглинання, заломлення і відбивання в ультрафіолетовій області, так мікрозернистість плівки (або їх диспергованість), що дає змогу перетворити Т-шаблони в Ф-шаблони. В металооптиці на відміну від діелектричної оптики коефіцієнт заломлення n вже є комплексною величиною \bar{n} і визначається через коефіцієнт екстинкції k :

$$\bar{n} = n (1 + ik) \quad (9)$$

$$\bar{n}^2 = n^2 (1 + 2ik - k^2) \quad (10)$$

через які коефіцієнти поглинання χ і відбивання R визначаються наступними співвідношеннями:

$$\chi = \frac{2\pi}{\lambda} k \quad (11)$$

$$R = \left| \frac{\bar{n} - 1}{\bar{n} + 1} \right|^2 = \frac{n^2(1+k^2) + 1 - 2n}{n^2(1+k^2) + 1 + 2n} \quad (12)$$

Поглинання зменшує величину дифракційних максимумів і викликає зміщення їх в напрямі менших товщин плівок. Такі металеві плівки, які зменшують R , називають ще просвітлюючими на відміну від діелектричних прозорих.

Реактивне магнетронне розпилення мішені із сплаву ВХ 2К, ВХ 2У із запресованими штирями РЗМ чи напівпровідникових матеріалів проводилось

з використанням круглого планарного магнетрона на установці “Ораторія 5”.

Плівки оксидів металів, що містились в хромовій мішені, наносились в аргонній плазмі при тиску 0,27-0,45 Па при різному ступені її легування киснем (від 0 до 45 %). Вони формувались в таких режимах: при повністю окисненій мішені, частково окисненій мішені і не окисненій мішені, що відповідало різним ділянкам ВАХ магнетронного розряду. Величина струму і напруги визначались потужністю розряду (250-450 Вт), при якій швидкість формування плівки досягала 1,2-3,6 мкм/год при тиску $P = 0,27-0,35$ Па. Якість плівок оцінювалась по оптичній густині і оптичних втратах. Леговані хромові оксидні плівки, отримані з оптичною густиною 1,2-1,6 та оптичними втратами $\alpha = 0,5$ дБ/см, мали дефектність $\leq 0,05$ см² в режимі частково окисненої поверхні. Аргонна плазма розряду легувалась киснем у межах 0-28 %. Для забезпечення оптичної густини в межах 1,2-1,8 вміст кисню складав 22-28 %. Електронно-графічний аналіз поверхні оксидних плівок проводився на відбивання на електронному мікроскопі ЕМ-125 з дифракційною ґраткою ДП-1. Спектри аморфних плівок оксидів знімались від ультрафіолетових до інфрачервоних областей на спектрофотометрах ІКС-29, “Spicord-75”. Плівки отриманих оксидів прозорі в широкому діапазоні хвиль від 0,5 до 10,5 мкм. Причому нижня границя спектра в залежності від ступеня легування їх тугоплавкими, рідкоземельними чи напівпровідниковими елементами зміщується в далеку ультрафіолетову область з довжиною хвилі менше 420 нм. Тобто, в залежності від довжини хвилі ультрафіолетового опромінення джерела проводиться підбір прозорого покриття. Коефіцієнт заломлення плівок вимірювався на еліпсометрі ЕЗ. Слід відмітити високе значення напруги пробою таких плівок, яке складало більше $3 \cdot 10^6$ В/см. Для заданих значень коефіцієнтів заломлення повітря і оптичного скла $n_1 = 1$ і $n_3 = 1,59$ можна підібрати режими формування і металеві просвітлюючі плівки, які забезпечують її коефіцієнт заломлення $n_2 = 2,5$, достатній як для поляризації відбитих променів, так і для зменшення їх дифракції і інтерференції.

Другим способом створення А-Ф ПФО для проекційної літографії є формування двошарової плівки: хромової як амплітудної маски елементів ПФО так просвітлюючої як фазозсувної маски. Остання забезпечує зниження втрат на відбивання в ультрафіолетовій області до 0,5-8 %. Параметри просвітлюючого шару (коефіцієнт заломлення та товщину плівки) вибирають виходячи з умови, щоб світлова хвиля, що відбилась від поверхні покриття в результаті інтерференції, гасилась хвилею вже відбитою від границі розділу хромове-просвітлююче покриття. Крім цього, просвітлююче покриття внаслідок зміни коефіцієнта заломлення додатково міняє і фазу світлової ультрафіолетової хвилі, що подавляє їх дифракцію.

В ролі просвітлюючих покриттів використовувались плівки SiO_2 ($n = 1,44$), Si_3N_4 ($n = 2,2$), SiO_xN_y ($n = 1,7$), SnO_2 ($n = 1,6-1,9$), ІТО ($\text{In}_x\text{Sn}_y\text{O}_z$) ($n = 2,0-2,1$), ZnS ($n = 2,3$), Ta_2O_5 ($n = 2,2$), TiON ($n = 2,3$),

In_2O_3 ($n = 2,1$), а також двошарові просвітлюючі покриття у виді $\text{ZnS} + \text{MgF}_2$ ($n = 1,48$), $\text{ZnS} + \text{ITO}$ ($n = 1,7-1,8$), $\text{SiO}_2 + \text{MgF}_2$ ($n = 1,65$), $\text{TiO}_x + \text{Al}_2\text{O}_3$ ($n = 2,5$). Самі способи формування таких плівок повинні забезпечувати високу однорідність, швидкість формування, адгезію, конформність покриття, заданий стехіометричний склад і коефіцієнт заломлення. Такими способами формування просвітлюючі плівки є піроліз в реакторах РАТ та РПТ і методи хімічного осадження. Перший метод нами детально поданий в [2,7].

Для отримання плівок оксидів металів чи напівпровідників на нагріту підкладку використовували реактор атмосферного тиску установки ЕТМ2. 039. 000. Коефіцієнти поглинання, відбивання і заломлення ультрафіолетових променів, які визначають амплітудну і фазову модуляції зображення, залежать від співвідношення оксидів в даній плівці і при її оптимальній товщині збільшують роздільну здатність таких фазових шаблонів на 35-50 %. Для перевірки роздільної здатності транспарентних і просвітлюючих покриттів для ПФО проекційної літографії відповідно розроблена тестова структура, з допомогою якої можна формувати топологічні розміри 1,5; 1,0; 0,8; 0,7; 0,5 і 0,4 мкм [7,8]. Така тестова структура складає основу технологічного САПР ВІС.

Самим високоекономічним і перспективним методом формування амплітудно-фазозсувного транспарентного (наприклад, Fe_2O_3) та просвітлюючого покриття (наприклад, ZnO , In_2O_3 або SnO) є формування відповідної оксидної плівки на фотшаблонних заготовках гомогенною реакцією самопоширюючого фронту горіння суміші, що містить неорганічну чи органічну сполуку Fe, In чи Zn в кількості 4 % об в киснево-водневій атмосфері у відношенні 46:50 % об та температурі $60 \pm 10^\circ\text{C}$. В ролі таких сполук гомогенної суміші можна використовувати пентакарбоніл заліза $\text{Fe}(\text{CO})_5$, метил-, диметилцинку $\text{Zn}(\text{CH}_3)_2$, $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$, ацетилацетонат індію $\text{In}(\text{C}_5\text{H}_2\text{O}_2)$, дибутилоловодиацетат $(\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{Sn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ [6].

Суттєвою відмінністю даного процесу від попе-

реднього є те, що даний технологічний процес ведеться при низькій температурі $T = 60 \pm 10^\circ\text{C}$, яка запобігає як термічну деформацію скляних оптичних фотошаблонних підкладок, так і термодифузії домішок в оксидну плівку та забезпечує високу адгезію плівки при використанні в ролі окиснювача воднево-кисневої суміші при тиску 55-75 мм рт.ст. Саму реакцію проводять в реакторі пониженого тиску з гарячими стінками з використанням суміші, наприклад, алкіл похідних цинку в воднево-кисневій суміші. З допомогою генератора електроіскрового запалювання запалюють суміш на початку реактора. Внаслідок проходження реакції окиснення в процесі руху її фронту з швидкістю 8-10 м/с проходить рівномірне осадження оксиду цинку протягом долей секунди. Робочий цикл завершується швидкою евакуацією продуктів реакції вакуумно-відкачним агрегатом з реактора, а температура скляних заготовок піднімається під час реакції горіння не більше 5°C . Газова суміш, що складається із 4 % диметилцинку, 46 % H_2 і 50 % O_2 , створює тиск 70 мм рт. ст. до її запалення. Товщина плівки оксиду цинку при цьому складала 320-580 Å з нерівномірністю по пластині не гірше 3 % і оптичною густиною $1,5 \pm 0,1$. Товщину плівки вибирають із співвідношення $d = \lambda/4(2n-1)$. Висока швидкість гомогенної реакції горіння забезпечує бездефектні плівки з високою зносостійкістю покриття. Даний процес є унікальним для мікроелектроніки субмікронних розмірів і немає аналогів за кордоном.

Таким чином, дана технологія забезпечує формування як транспарентних, так і просвітлюючі плівок, які забезпечують підвищення роздільної здатності А-Ф-шаблонів на 25-50 % для субмікронних топологічних норм 0,25-0,8 мкм, і тим самим дозволяють використовувати оптичну проекційну літографію в широкому діапазоні довжин УФ хвиль 193-405 нм.

С.П. Новосядлий – кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри радіофізики і електроніки

- [1] С.П. Новосядлий. Висококонтрастний однокомпонентний фоторезист для субмікронної технології ВІС // *Фотоелектроніка*, **9**, сс. 39-41 (2000).
- [2] С.П. Новосядлий, І.В. Курило. Фізико-хімічні особливості субмікронної оптичної літографії великих інтегральних схем // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин і їх застосування*, **395**, сс.78-82 (2000).
- [3] R.W. Hill. The future conts of semiconductor lithography // *J. of Vac. Sci. Techno*, **6** (1), pp.1387-1389 (1989).
- [4] J.H. Mc. Coy, Wei Lee, G.L. Varnell. Optical lithography requirements in the early 1990's // *Sol. St. Techn.*, **32** (3), pp.87-92 (1989).
- [5] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики, М.: Наука, С.720 (1973).
- [6] С. Новосядлий, В.Ф. Кочубей, І.М. Гутор, Ю.Л. Бірковий. Спосіб виготовлення транспарентних фотошаблонів. // Позитивне рішення по заявці №В4401255 від 30.01.1994.
- [7] С.П. Новосядлий. Фізико-технологічні особливості плазмохімічних процесів субмікронної системної технології ВІС // *Теоретична електротехніка. Міжвідомчий науково-технічний збірник*, **55**, сс.21-27 (2000).
- [8] С.П. Новосядлий. Шляхи підвищення роздільної здатності оптичної проекційної літографії. // *Металофізика і новітні технології*, **24**,-сс.325-332 (2002).

S.P. Novosyadliy

Transmission and phase-shifting mask layouts in optical lithography for formation submicrometer structures VLSI

*Prekarpathian University named by Vasyl Stefanyk
Shevchenko str., 57, Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine*

Submicrometer optical lithography is possible with conventional projection cameras when the mask controls the phase of the light at the object plane. The phase shifting mask consists of a normal transmission mask that has been with a transparent layer patterned to ensure that the optical phases of nearest apertures are opposite. Thus the phase-shifting mask may be the most desirable device for enhancing optical lithography resolution in the VLSI era.