

С.П. Новосядлий, Р.Б. Атаманюк, Т.Р. Сорохтей, Л.В. Мельник, Ю.В. Возняк

Технологічні особливості сухої вакуумної літографії для формування субмікронних структур ВІС

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника (76025,
м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57, каф. Радіофізики і електроніки, тел. (71-48-48))
e-mail : kre@pu.if.ua*

Важлива проблема сучасної мікроелектроніки – це створення нових матеріалів та вакуумних процесів на їх основі, які б дозволили об'єднати технологічні операції виготовлення субмікронних структур в єдиному автоматизованому циклі і досягнути ступені інтеграції 10^{-7} – 10^{-8} елементів на кристалі з використання кластерного обладнання. Саме проблема технологічної інтеграції в значній ступені стримується літографічними процесами, з допомогою яких формується необхідна конфігурація окремих елементів мікросхеми. Сьогодні ці процеси здійснюються хімічними методами, які ґрунтуються на рідинних процесах, що і порушує єдність замкнутого технологічного циклу і вимагає великих витрат високо отруйних розчинників. Тут треба підкреслити, що на обробку єдиної кремнієвої пластини витрачається 5л органічних розчинників. Рідинні процеси літографії є серйозним бар'єром в отриманні субмікронних розмірів (<1мкм) внаслідок ізотропності процесів проявлення і травлення. Таким чином, існуюча літографія не відповідає сучасним вимогам технології формування структур ВІС. Матеріали даної статті визначають сучасні методи сухої літографії в контексті формування суб-і наномікронних структур швидких ВІС.

Стаття постуила до редакції 10.11.2011; прийнята до друку 15.12.2011.

Вступ

По суті сьогодні методи літографії розвиваються по двох основних напрямках: Створення інструментальної бази кластерного обладнання для суміщення і експонування і розробки чутливих матеріалів (резистів), які б відповідали вимогам сучасної технології виробництва швидкодійних субмікронних структур ВІС. Підвищення роздільної здатності літографії стало можливим завдяки розробці обладнання з такими джерелами експонування, як електронні, іонні, рентгенівські промені. У фотолітографії здійснюється перехід в область глибокого і середнього ультрафіолету довжин хвиль (<365нм), як їх називають «deep-UV» у зв'язку з тим, що теоретична роздільна здатність фотолітографічного метода обмежена величиною 2λ . Зупинимось на особливостях таких систем при виборі технологічного процесу.

Створено багато електронно-променевих систем виробничого призначення, в тому числі скануючих, проєкційних, багатопроменевих. Електронно-променевий метод рахується перспективним для експонування пластин. В його користь свідчить висока роздільна здатність електронних променів і можливість управління системою від ЕОМ. Проте існує і обмеження електронно-променевих систем –

це ефект близькості від оберненорозсіяних електронів. Для його компенсації необхідно додатково вводити певні корегуючі програми.

Рентгенолітографія є аналогічна звичайній УФ-літографії, бо рентгенівські промені є електромагнітним випромінюванням з дуже малою довжиною хвилі. Проте вони взаємодіють з речовиною, яка або пропускає, або поглинає рентгенівські промені в залежності від товщини пластин і атомного номера. Головною перевагою даного методу є прозорість невеликих критичних дефектів, а рентгенолітографія представляє собою вид літографії із зазором (10-25 мкм), а роздільна здатність не є обмеженою дифракційними дефектами

внаслідок малої довжини хвилі джерела ($4-20 \text{ \AA}$) і може перевищувати роздільну здатність електронно-променевої літографії.

За допомогою іонних пучків можна отримувати зображення або шляхом експонування пучка, або експонуванням через прозорий для іонів шаблон. Тут головна проблема полягає в розробці інтенсивних джерел випромінювання і високочутливих нанорезистів. Перевагою іонної літографії є те, що іони в практиці мають меншу величину пробігу в резисті і тому в ній відсутній ефект близькості як у електронному промені. До того ж пучки іонів

Таблиця 1

Чутливість в області			Термостійкість	Стійкість до реактивно-іонного травлення	Сухе травлення
Глибокій УФ $\lambda=220-440\text{nm}$	Рентгенівське опромінення при АСК 2 і $E_{\text{max}} = 1\text{keV}$	Електронного опромінення $10-20\text{keV}$			
$10-30\text{мДж}/\text{см}^2$	$1-10\text{мДж}/\text{см}^2$	$10^6\text{ Кл}/\text{см}^2$	Топологічний рисунок не плавиться при $180-220^\circ\text{C}$	Швидкість травлення $1/2 - 1/5$ швидкості травлення Si і SiO_2	Повністю суха обробка, а проявлення в кисневій чи іншій газовій камері.

відповідних хімічних елементів дозволяють безпосередньо виконувати імплантацію домішок, в тому числі багатозарядних.

В літографічних процесах використовуються спеціальні матеріали, які є чутливими до дії іонізуючого випромінювання (резисти), призначення яких захищати матеріал підкладки при проведенні різних операцій (травлення, імплантації) виготовлення структур ВІС. Дослідженнями розробників резистів направлені на введення особливих зв'язків в полімерну ланку молекул для підвищення їх степені деструкції при експонуванні (позитивні резисти) або радіаційно-чутливих, які зшиваються в групи в головну або бічну ланку полімера (негативні резисти). В результаті проведення таких досліджень [1], зшивання поперечних зв'язків при експонуванні негативних і деструкції при експонуванні позитивних резистів, встановлено, що чутливість негативних так і позитивних резистів зростає при збільшенні молекулярної ваги полімера. Для підвищення стійкості отриманих на основі резистів захисних масок є необхідним введення більш міцних зв'язків в полімерну ланку молекули, а це веде відповідно до зниження чутливості.

Резисти і методи їх обробки постійно удосконалюються у відповідності із зростаючими вимогами до технології субмікронних структур ВІС. В табл.1 приведено вимоги до перспективних резистів, які є необхідними для нового кластерного літографічного обладнання.

Для забезпечення вказаних вимог в останні роки в технології літографії появилось декілька нових напрямків, які дають можливість формувати суб-і наномікронні структури ВІС, а саме: силілірування рельєфу, взривна літографія, багат шарові резистини, резисти, дія яких оснований вже на нових механізмах взаємодії з випромінюванням, а також неорганічні і плазмопроявляючі.

По суті, весь літографічний процес можна розділити на два етапи: створення топологічного рельєфу в шарі резиста, що здійснюється експонуванням і проявленням, і перенос рисунка в матеріал підкладки, що вже здійснюється травленням незахисних резистором дільниць, або взривною літографією

І. Силілірування рельєфа в плівці фоторезисту ФП-О51 МК [1,2]

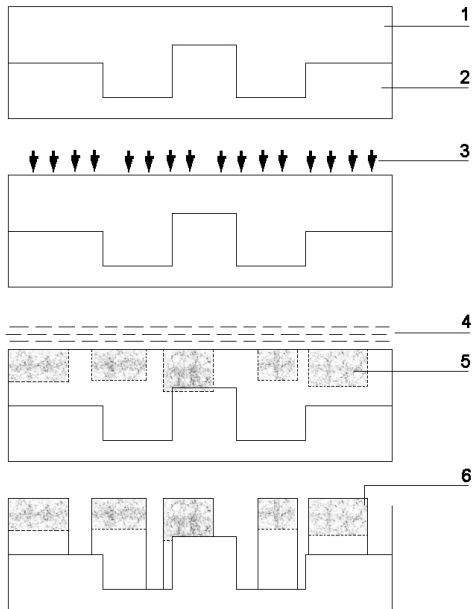
Одним із найбільш перспективних процесів субмікронної літографії є метод локальної модифікації експонованих плівок фоторезистів і іонно-плазмового проявлення захищеного модифікованого зображення. А основі методу лежить використання відомих в хімії високомолекулярних сполук, реакцій модифікування полімерів, які застосовуються в електронолітографії. Сутність методу полягає в наступному (рис 1):

- сильне поглинання актиничного випромінювання резистом і запис захищеного зображення в тонкому поверхневому шарі відносно товстої плівки;
- фіксація захищеного зображення шляхом модифікування експонованих (або неекспонованих) областей плівки резисту неорганічними або органічними сполуками, які вступають в хімічну взаємодію (локальне модифікування);

Такий процес забезпечує в субмікронній літографії:

- виключення утворення стоячих хвиль і неконтрольованих за світло резисту відбитими променями.
- можливість використання високороздільних оптичних систем з високою числовою апертурою, бо глибина експонування може бути $<0,25\text{мкм}$, а товста плівка фоторезисту має квазіпланарну структуру.
- можливість підвищення контраста захищеного зображення операцією силілірування, як мінімум в 2 рази.

- простота і висока продуктивність операції, яка може виконуватись як груповим, так і індивідуальним способом обробки.



1. фоторезист

2. підкладка

3. антиінічне покриття

4. пари модифікатора (ГМДС) - $(CH_3)_6Si_2NH$

5. заховане модифіковане покриття

6. захисний шар SiO_2

Рис. 1. Схема локального модифікування фоторезисту і плазмового проявлення модифікованого зображення

Базовим процесом методу є локальне хімічне модифікування (ЛХМ). В даному випадку воно полягає в заміні одних функціональних груп полімера-плівкоутворювача резиста другим без зміни його структури і довжини ланки, в результаті чого значно змінюється стійкість резиста до дії кислотної плазми. Зазвичай для процесу ЛХМ застосовується реакція силілірування: введення триметилсилільної групи в ланки ланки полімерного ланцюга замість активного водню, а в ролі силіліруючого реагента використовується гексаметилдисилазан $(CH_3)_6Si_2NH$ (ГМДС). Сама модифікація в парах ГМДС проводилась при кімнатній температурі (можна проводити і рідинне силілірування при $T=100^\circ C$). Це підвищило роздільну здатність вдвоє.

На рис.2. поданий негативний рельєф, сформований в плівці позитивного фоторезисту ФП-051МК. Це відкриває великі можливості у зменшенні кроку металізації субмікронних структур по дисиліциду титану та алюмінієвому сплаві АКГо-1-1 менше 1мкм. Як бачимо - це унікальний процес. Крім цього ГМДС прекрасним адгезивом, що підвищує контактність і роздільну здатність за рахунок

збільшення адгезії фоторезисту до поверхні структур ВІС.

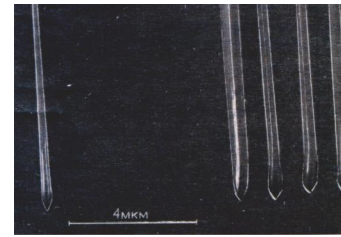
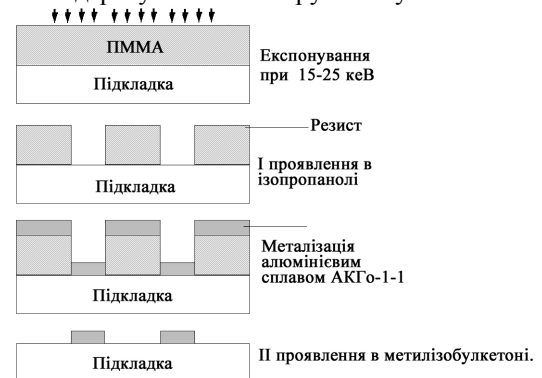


Рис. 2. Тестова структура для визначення роздільної здатності модифікованого позитивного резисту ФП-051МК.

II. Взривна фотолітографія як метод формування металізованої розводки у субмікронних арсенід галієвих структурах

Взривна літографія – новий метод формування топології металізованої розводки, за допомогою якої вдалось отримати крок металізації субмікронних розмірів. В електронній літографії було виявлено, що поліметилметалкрилат (ПММА) при експонування електронами з енергією 15-20 кеВ і наступним рідинним проявленням починає відшаровуватись. Якщо резист є покритий шаром металу ($d=1\text{мкм}$), то відшарування (взривання) проходить разом з металевим шаром, який знаходиться в ньому (рис.3). Отримати високе роздільня в товстих шарах звичайною фотолітографією є неможливим із-за ефекта підтраву товстого шару металу.



а



б

Рис. 3. Схема технологічного процесу взривної літографії (а), рельєф в 0,5мкм отриманий взривною літографією в алюмінієвому сплаві АКГо-1-1 (б).

Взрив резисту може здійснюватись і температурним впливом, при якому нижній шар

резиста піддається термодеструкції, а утворені газоподібні пробукти взривають верхній шар металу і видаляються разом з ним. Тут слід зробити певну примітку: В багатошаровій літографії де повторна літографія проводиться вже на пластинах із сформованим рельєфом, то відношення товщини (h) елемента до ширини (l) в проявленому резисті збільшується при зменшенні літографічних розмірів. Як ми знаємо, високе аспектне відношення $h/l = 10 - 10^2$ вимагається і при хвильовій оптиці. Це вказує на те, що технологічні можливості взривної літографії є обмеженими, бо від фоторезиста вимагається висока контрастність. Це свідчить, що при проявленні слід використовувати висококонтрастні проявники. Цей недолік також можна усунути використанням багатошарового резисту.

III. Багатошаровий резист для субмікронної літографії [3]

В багатошарових літографіях, коли вимагається створити зображення на уже сформованому рельєфі, висота окремих елементів яких досягла 1мкм, нанести рівномірний шар резисту є неможливо технологічно. А нерівномірні за товщиною шари резиста є вже критичними до режимів як експонування, так і плазмохімічного травлення, що і не дозволяє отримати якісно зображення топології.

Друга проблема, яка зв'язана з товщиною резисту – різка стійкість сформованого рисунку до дії плазмового травлення або реактивно-іонного травлення. В таких процесах проявлений резист використовується в ролі маски, яка захищає невикриті області від дії травника. Таким чином, неоднорідна товщина приводить до ерозії більш тонких ділянок захисної маски при плазмовому травленні.

Один із можливих варіантів планаризації поверхні підкладок із структурами полягає в наступному.

На підкладку наносять товстий шар (1-2 мкм) органічного полімера (не чутливого до дії іонізуючого випромінювання, наприклад полііміда) основне призначення якого згладити шоруховатості поверхні. Потім плазмовим осадженням (при $T < 150^\circ\text{C}$) формують шар SiO_2 (0,1 мкм), а зверху тонкий шар високочутливого резисту. Зображення топології відповідно формують у верхньому шарі, а потім переносять на буферний шар SiO_2 , а вже

після цього здійснюється травлення нижнього полімера кисневою плазмою, а шар SiO_2 вже служить захисною маскою. Цей процес ілюструє рис.4.

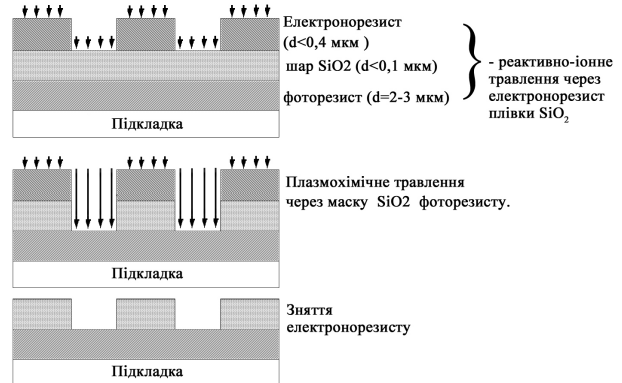


Рис.4. Схема електронографічного процесу з використанням 3-х шарової системи резистів.

Переваги даного способу при електронно-променевому експонуванні полягає також в тому, що понижується дефектність із-за відсутності ефекту близькості від відбитих підкладкою електронів, бо на ній знаходиться товстий органічний шар з більш низьким атомним номером(2).

З метою отримання якісного зображення в товстих шарах (тобто за рахунок зниження ефекту розсіювання електронів) використовують також комплексні методи експонування багатошарових систем. Тут вже використовують гібридне електронно-променеве і рентгеновське експонування в двошаровій системі резистів з металевою маскою, сформованою між ними. Метод реалізується наступним чином (рис.5), на підкладку наноситься

шар рентгенорезисту, потім тонкий шар (200 \AA) металу з високим коефіцієнтом поглинання рентгеновського випромінювання (наприклад, золота), а зверху вже тонкий шар електронорезисту. Спочатку формується зображення топології і верхньому шарі і переноситься на шар металу. Сформований таким чином в металевому шарі топологічний рельєф вже служить рентгеношаблоном при експонуванні нижнього шару в тому, що в тонкому верхньому шарі електронорезиста формується дуже якісне зображення, яке потім переноситься без спотворень в нижній шар. Це дозволяє отримати захисний рельєф з високим аспектним відношенням ширини лінії до довжини і підвищити стійкість до реактивно-іонного чи плазмового травлення захисних масок.

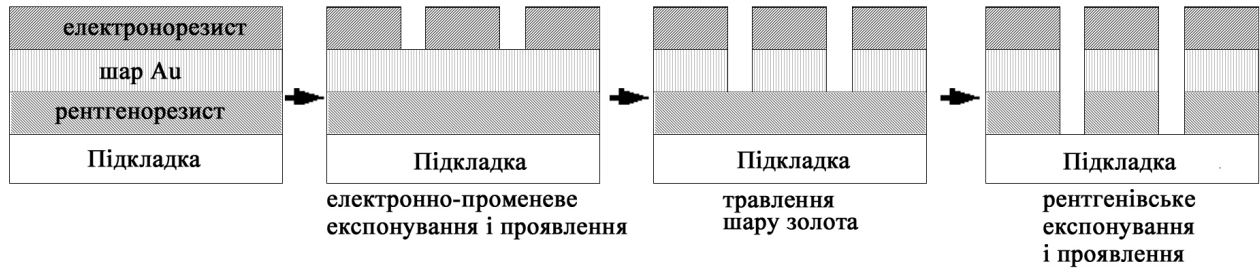


Рис.5. Гібридна технологія експонування в двошаровій системі резистів з металевою маскою (Au, Cr, W) між ними.

IV. Багатошаровий резист ПР-6 із термічною обробкою для субмікронної [4,5] літографії

Розроблено багатошаровий резист ПР-6, що дає можливість формувати субмікронні елементи із складним профілем за рахунок введення спеціальної термічної обробки. Позитивний фоторезист ПР-6, що представляє собою сополімер метилметакрилата з метакриловою кислотою, надає високі результати в субмікронній літографії навіть при традиційному його використанні. Проте його можливості значно розширюються, якщо із нього формують багатошарові плівки, які піддаються спеціальній термообробці, направленої на модифікацію цих шарів резисту в так званий термополімер із заданою чутливістю і контрастом, що дозволяє формувати складні елементи Т і П-профілю. Перевагою цього резисту ПР-6 в порівнянні з традиційними двошаровими системами є, по-перше, простота формування топологічних елементів в ньому – один резист, один проявник для двох шарів і один цикл проявлення, по-друге можливість широкого вибору відношення чутливості шарів простою зміною режиму термообробки (рис 6).

Саме у фоторезисті ПР-6, який призначений для формування складних топологічних профілів є залежність його чутливості від температури термообробки, яка зшиває молекули. Така залежність дозволяє створити багатошарові плівки резисту із змінною від шару до шару чутливістю, що і робить можливим формування складних профілів топології структури ВІС. Зміна швидкості розчинення пояснюється тим, що при нагріві сополімера метакрилата з метакриловою кислотою (МАК : ММА=40:60) при зміні температури в діапазоні 360-430 К утворюються міжмолекулярні ангідридні мостики і фоторезист перетворюється в термополімер, який складається із метилметакрилата, метакрилової кислоти і метакрилового ангідриду, а чутливість визначається ступеню його модифікації температурної обробки. Самою важливою його особливістю є те, що резист ПР-6 наноситься етапами в декілька шарів, кожний із яких проходить свою термообробку.

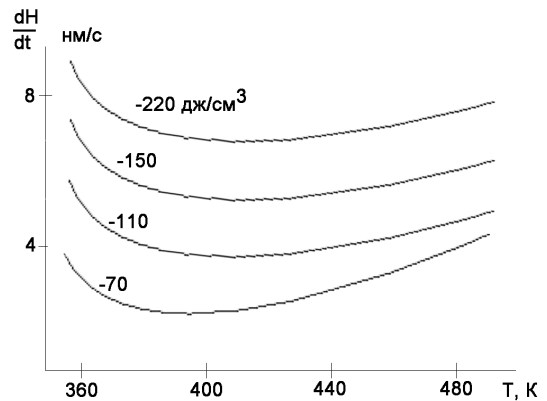


Рис.6. Залежність швидкості розчинення проекспонованого резисту ПР-6 від температури термообробки при зміні експозиції від 70 до 220 Дж/см².

V. Спеціалізовані фоторезисти для сухої літографії [1,3,4]

В останні роки мікроелектроніка субмікронних топологічних розмірів вимагає повної зміни рідинних процесів сухими, такими як плазмова очистка підкладок, видалення захисних плівок, плазмове проявлення резистів. Для цього розроблені спеціальні вакуумні резисти, що забезпечують повністю сухий процес літографії субмікронної роздільної здатності.

Сутність його полягає в напilenні на підкладку радіаційно-чутливого шару з послідовним експонуванням електронним, іонним, рентгеновським або УФ-випромінюванням і проявленням зображення за допомогою ревіпарування (подібно до ПР-6) в негативному або плазмохімічному травленні в позитивному варіанті. Перенос зображення в матеріал підкладок і видалення захисної маски здійснюється плазмохімічним, реактивно-іонним або іонно-променевим травленням. Внаслідок того, що кожна із перерахованих операцій окремо виконується у вакуумі, стає можливим поєднання їх в одну загальну лінію, що представляє собою замкнутий комплекс повністю сухої літографії – це лінія «Основа». Схема повністю сухого вакуумного процесу літографії подана на рис.7.

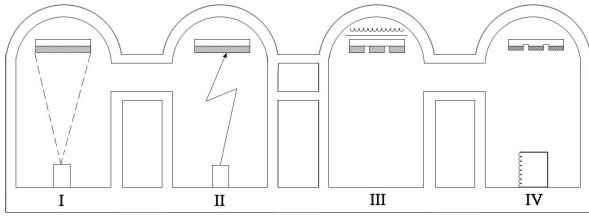


Рис. 7. Схема сухого вакуумного процесу літографії : I - термічне напилення резисту ; II - ел.-пром, рентгеновське, протонне експонування ; III - термічне проявлення ; IV - ПХТ, РІТ, ІПТ - процеси.

Розробка резисту для такого варіанта літографії здійснюється за програмою : джерело випромінювання-резист - вимоги вакуумної технології. Результати аналізу властивостей резистів для сухої субмікронної літографії дозволили визначити основні вимоги до фоторезистів :

- чутливість не нижче $10\text{см}^2 / \text{Дж}$;
- лінійний коефіцієнт поглинання на довжині хвилі 436нм і 220 нм на менше 1мк^{-1} ;
- теплостійкість - не менше 200°C ;
- плазмо стійкість – не гірше 2,5.
- контрастність - не нижче 4,5

Виходячи із вибору літографічного процесу визначаються проектні норми конструкторсько-технологічних обмежень, на основі яких вже

розробляються схемо технічні рішення швидкодіючих субмікронних структур ВІС.

1.Суб - і наномікронні технології ВІС розширюють застосування нових резистів і літографічних процесів в діапазоні топологічних розмірів 0,1-1мкм.

2.Модернізація резистів і літографічних процесів вимагає нових підходів до проектування і виготовлення робочих фотошаблонів і проекційних фотооригіналів для мінімізації дифракційних і інтерференційних явищ.

3.Процес силірування і взивної літографії підвищують, як мінімум, в 2-3 рази роздільну здатність існуючих літографічних процесів і особливо є ефективними при їх застосуванні при формуванні багатшарової розводки.

4.Для формування складних топологічних рельєфів субмікронних ВІС доцільно наладити серійний випуск резисту типу ПР-6 , який може змінювати чутливість в залежності від режиму термообробки.

5.Розробка процесів сухої літографії зумовлює нові вимоги до плазмо-хімічних процесів травлення, осадження, проявлення, іонної імплантації, які б використовувались в замкнутих циклах кластерного обладнання індивідуальної обробки підкладок.

- [1] С.П. Новосядлий. Суб-і наномікронна технологія структур ВІС. // *Івано-Франківськ Місто НВ*, сс. 454 (2010).
- [2] M. Isaacson , A. Muray. In situ vaporization of very low molecular weight resists using 1/2 nm diameter electron beams. *J. Vac. // Sci. Technol.* 19, сс. 1117-1120 (1981).
- [3] Селиванов Г. К., Мозжухин Д. Д., Грибов Б. Г. Электронно- и рентгеночувствительные резисты в современной микроэлектронике // *Микроэлектроника. вип 6*, сс. 517-539(1980).
- [4] G. Taylor, "X-ray Resist Materials," // *Solid State Techno*, сс.23,73(1980).
- [5] V.P. Korchkov, T.N. Martynova, V.S. Danilovich . All-dry vacuum submicron lithography // *Thin Solid Films v101*, сс. 369-372(1983).

S.P. Novosyadlyy, R.B. Atamaniuk, T.R. Sorohthey, L.V. Miller, Yu.V. Wozniak

Technological Features of Dry Vacuum Lithography to Form Submicron VLSI Structures

*Dep. Radiophysics and Electronics at PreCarpathian Vasyl Stefanyk National University
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, e-mail: kre@pu.if.ua*

An important problem of modern microelectronics - is the creation of new materials and vacuum processes on the basis that would combine manufacturing operations producing submicron structures in a single automated cycle and achieve a degree of integration $10^{-7} - 10^{-8}$ of elements on a chip with the use of cluster hardware.

That is the problem of technological integration to a large degree constrained by lithographic processes by which forms necessary configuration of individual elements circuit. Today, these processes are carried out by chemical methods that are based on fluid processes and gives unity closed technological cycle and consuming highly toxic solvents. It should be emphasized that the processing of a single silicon wafer is used 5l organic solvents. Liquid lithography processes is a serious obstacle in obtaining submicron size (<1mkm) due to isotropy of processes of developing and etching. Thus, the existing lithography does not meet modern standards of technology structures forming LSI.

Materials of this article define the modern methods of dry lithography in the context of sub-structures and nanomikronnyh fast LSI.