

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Інституту високих технологій

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ
проф. Валерій Антонович Скришевський
Протокол № ____ засідання кафедри
від “ ____ ” _____ 20__ р.

Дослідження нерівностей для літографії з спрямованою самозбіркою

Студента магістратури 2 року
навчання
Спеціальності: «Прикладна фізика
та наноматеріали»
Дудаша Віктора Арпадовича

Науковий керівник:
канд.фіз.-мат.наук, доцент
Іванов Іван Іванович

Dr. Hyo Seon Suh
Senior researcher, imec

Оцінка захисту роботи

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 40 с., 20 рис., 21 посилання.

У роботі досліджувалися нерівності ліній для шаблонів створених за допомогою літографії, що базується на методі спрямованої самозбірки. Розглянуто вплив параметрів самозбірки на нерівності країв ліній та нерівності ширини ліній. Запропоновано підходи для зменшення нерівностей, зокрема шляхом використання оптимальних параметрів блок-сополімеру, хімічного шаблону, товщини плівки блок-сополімеру та умов відпалу.

Нерівності ліній оцінювалися за допомогою аналізу спектральної густини потужності знімків скануючого електронного мікроскопу.

Ключові слова: літографія, блок-сополімери, спрямована самозбірка, спектральна густина потужності.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	9
1.1 Самозбірка диблок-сополімеру	9
1.2 Спрямована самозбірка	11
1.3 Нерівності країв ліній.....	12
1.4 Аналіз спектральної густини потужності	15
1.5 Нерівності країв ліній для DSA-літографії.	17
РОЗДІЛ 2. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	18
2.1 Технологічний процес та матеріали.	18
2.2 Метрологія.....	20
РОЗДІЛ 3. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	24
3.1 Вплив періоду хімічного шаблону.....	24
3.2 Вплив природнього періоду блок-сополімеру.....	26
3.3 Вплив товщини плівки блок-сополімеру	28
3.4 Вплив параметрів відпалу.....	30
3.5 Оптимізація процесу.....	34
ВИСНОВКИ	37
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	38

ПОДЯКА

Цей розділ не є необхідною частиною кваліфікаційної роботи магістра, проте мені складно уявити як я можу презентувати нижче наведену роботу не виразивши свою глибоку вдячність людям, які зробили це можливим.

А саме:

- Hyo Seon Suh, Gian Lorusso, Jan Doise, Paulina Rincon, Nadia Vandebroek, Seung Won Song – *imec*
- Chris Mack – *Fractilia*
- Dries Maheiu, Toru Ideguchi, Makato Muramatsu – *TEL*
- Youngjun Her, Jin Li, Victor Monreal, Durairaj Baskaran, Boaz Alperson, Karl Skjonnemand – *EMD performance materials*
- Takumichi Sutani, Takeshi Kato – *Hitachi High-Tech*

А також адміністрації Інституту високих технологій та зокрема Галині Петрівні Грабчук, за те що дозволили і допомагали оформити довге та надзвичайно важливе для мене стажування, протягом якого і була написана ця дипломна робота.

Дякую!

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

DSA: directed self-assembly

L_0 : природний період блок-сополімеру

LER: line edge roughness (нерівності країв ліній)

LiNe: Liu-Nealey

L_s : період хімічного шаблону

LWR: line width roughness (нерівності ширини ліній)

N_2 : азот

PMMA: poly(methyl methacrylate)

PS: poly(styrene)

P(S-*b*-MMA): poly(styrene-block-(methyl methacrylate))

(P(S-*r*-MMA): poly(styrene-random-(methyl methacrylate))

SADP: self-alignment double patterning

SAQP: self-alignment quadrupole patterning

Si: кремній

SiN: нітрид кремнію

xPS: перехресно зшитий poly(styrene)

χ : параметр взаємодії Флурі – Хаггінса

σ : стандартне відхилення

БСП: блок-сополімер

СГП: спектральна густина потужності

СЕМ: скануючий електронний мікроскоп

ВСТУП

В 1965 році Гордон Мур, базуючись на спостереженнях розвитку напівпровідникової галузі, передбачив, що кількість транзисторів наступні 10 років буде щороку зростати вдвічі. Він прогнозував, що інтегральні мікросхеми до 1975 року будуть налічувати близько 65 000 транзисторів [1]. Завдяки фотолітографії, збільшенню розмірів пластин, та удосконаленню технологічних процесів це передбачення справдилось, а Мур в 1975 році скоректував свій прогноз, написавши, що кількість транзисторів буде подвоюватись кожні два роки [2] – цей прогноз називають законом Мура. В сучасних інтегральних мікросхемах кількість транзисторів може сягати більше 30 000 000 000. І цей неперервний прогрес виявився можливим в тому числі завдяки розвитку фотолітографії.

Для того аби забезпечити таку велику кількість компонентів на одній схемі, необхідно зменшувати їх критичний розмір (відстань між двома краями однієї лінії) та період (відстань між центрами двох недотичних ліній). Сучасні літографічні процеси дають змогу створювати структури з критичним розміром менше 10 нм. Загалом збільшення кількості елементів в мікросхемах дає змогу збільшувати швидкодію приладу та знижувати його споживчу потужність. При цьому слід підкреслити, що важливим лімітуючим фактором мініатюризації електроніки на ряду з фізичними обмеженнями є вартість процесу. Виробники інтегральних мікросхем намагаються зменшити вартість розробки та виробництва своїх продуктів, саме тому постійно продовжується робота над альтернативними підходами в фотолітографії в тому числі.

Літографія спрямованої самозбірки, або просто DSA-літографія (від англ. directed self-assembly), є одним з таких альтернативних підходів, що останні кілька років розглядається як альтернатива до SAQP (від англ. self-alignment quadrupole patterning) та SADP (від англ. self-alignment double patterning) літографії.

На відміну від класичних підходів згори-вниз, DSA-літографія поєднує в собі обидва підходи згори-вниз та знизу-вгору. Використовуючи блок-сополімери, та правильно модифікувавши поверхню пластини, можна за допомогою самозбірки досягнути бажаних топографічних структур з періодом ліній співрозмірним до періодів отриманих SAQP-літографією. При цьому, оптимізувавши процес з точки зору вартості, DSA-літографія виявляється дешевшою порівняно з SAQP, завдяки зменшенню кількості технологічних кроків.

На якість сучасної літографії мають вагомий вплив нерівності країв ліній (LER, від англ. line edge roughness) та нерівності ширини ліній (LWR, від англ. line width roughness). Для введення DSA-літографії в серійне виробництво, нерівності потрібно зменшувати на ряду з зменшенням дефектів кінцевого шаблону.

Метою даної роботи було покращення ефективності літографічного процесу саме з точки зору зменшення нерівностей ліній на лінійних шаблонах. В DSA-літографії вони можуть бути викликані різними чинниками, такими як: нерівності ліній хімічного шаблону, власне самозбіркою блок-сополімеру, процесом сухого травлення, що дає змогу перенести шаблон до нижніх шарів.

Головним завданням було визначення параметрів спрямованої самозбірки, що впливають на нерівності та їх оптимізація з метою досягнення мінімально можливого значення LER та LWR. Для цього було досліджено вплив наступних факторів: товщини плівки блок-сополімеру, геометричного неспівпадіння періоду хімічного шаблону та природнього періоду БСП, параметрів відпалу для самозбірки. Запропоновано додатковий технологічний крок у вигляді повторного відпалу пластини для зменшення нерівностей на фінальному шаблоні.

В роботі використано технологічний процес LiNe (Liu-Nealey) з фактором примноження рівний трьом для системи полі(стирол-блок-метилметакрилат) P(S-*b*-MMA). 3σ параметри для LER та LWR було виміряно за допомогою аналізу спектральної густини потужності знімків знятих за допомогою скануючого електронного мікроскопу.

Апробація результатів роботи

Результати представлено на «5th DSA Symposium», Мілан, Італія та «SPIE Advanced Lithography conference 2020», Сан Хосе, США.

Опубліковано в збірнику «Proceedings of SPIE»:

Hyu Seon Suh, Viktor Dudash, Gian Lorusso, and Chris Mack "*Roughness study on line and space patterning with chemo-epitaxy directed self-assembly*", Proc. SPIE 11326, Advances in Patterning Materials and Processes XXXVII, 113260X (23 March 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2552354>

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Самозбірка диблок-сополімеру

Блок-сополімер – це композит з двох або декількох мономерів, що повторюються і згруповані в дискретні блоки вздовж полімерного ланцюга [3]. Полімерні ланцюги складаються з компонентів різної природи, що зв'язані між собою сильним ковалентним зв'язком. Оскільки природа блоків різна, вони схильні до мікрофазового розділення та прагнуть мінімізувати площу контакту між собою [4]. Проте повного (макрофазового) розділення не відбувається, адже ковалентний зв'язок між різними блоками зберігається. Надалі розглядатимемо диблок-сополімери – сополімери утворені з двох блоків.

Фазова структура блок-сополімерів показана на рис.1.1. Тут f - це об'ємна частка одного з блоків, χ – це параметр Флорі-Хагінса, що описує енергію взаємодії між двома блоками для рівняння ентропії змішування розчинів, N – ступінь полімеризації. Встановлено, що параметр χ – обернено пропорційний до температури [5]:

$$\chi = 0.028 + \frac{3.9}{T} \quad (1)$$

Іншими словами параметр χ характеризує сили притягування та відштовхування між полімером та розчинником, або між двома полімерами.

Довжина домену, або природній період L_0 , блок-сополімеру визначається формулою:

$$L_0 \sim N^{\frac{2}{3}} \chi^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

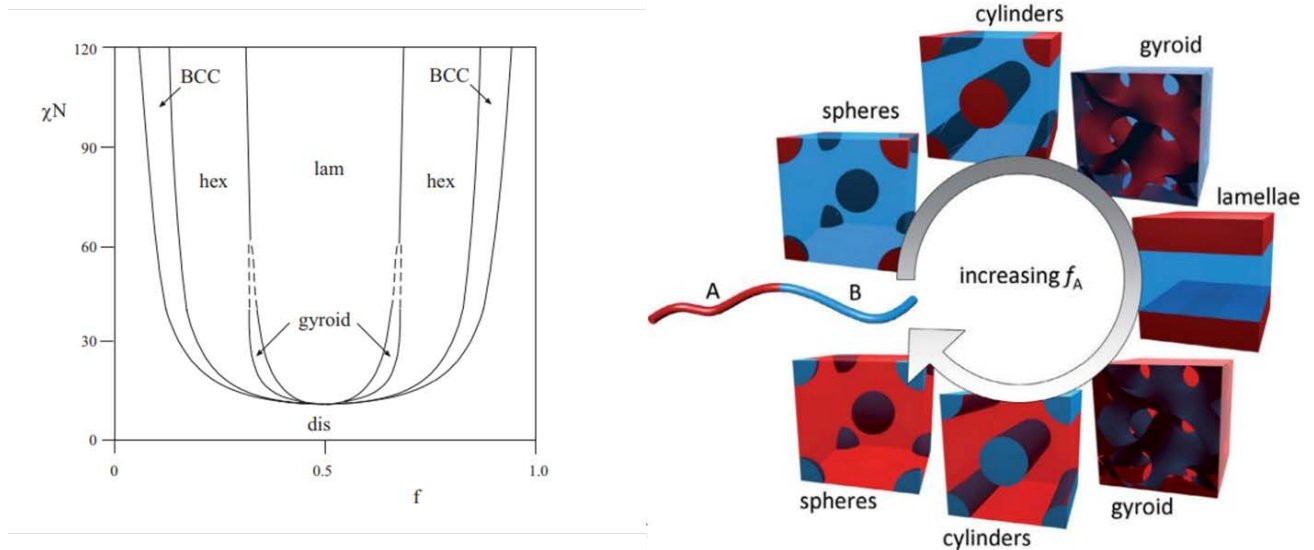


Рис.1.1 Типова фазова діаграма диблок-сополімеру[6].

Коли добуток χN починає бути більшим за певне значення, сополімер починає впорядкований-невпорядкований перехід і структура стає впорядкованою. Якщо збільшувати об'ємну частку одного з блоків, а добуток χN при цьому залишати константою вище значення впорядкованого-невпорядкованого переходу, то розпочнеться впорядкований-впорядкований перехід.

Впорядкований-впорядкований перехід починається з формування тісно упакованих сфер (CPS), зі збільшенням об'ємної частки одного з блоків структура переходить до об'ємноцентрованих кубічних сфер (S), до гексагонально запакованих циліндрів (C), до гіроїдів (G) та до ламел (L). Поведінка блок-сополімеру в об'ємі залежить від двох параметрів: міжфазової енергії між двома блоками (ентальпійний внесок) та пружної енергії, що пов'язана з стисненням або розтягненням домену блок-сополімеру (ентропійний внесок). Для того аби зайняти стан, що відповідає найнижчому значенню міжфазової енергії два блоки починають

розділюватись, аби мінімізувати площу взаємодії, що призводить до мікрофазового розділення [7].

1.2 Спрямована самозбірка

Розглянемо спрямовану самозбірку для системи блок-сополімеру полі(стирол-блок-метилметакрилат) P(S-*b*-MMA). На рис.1.2 зображено технологічний процес, що має назву LiNe, за допомогою якого виконують хемо-епітаксійну спрямовану самозбірку для сучасної літографії. Перехресно зшитий полістирол (xPS) наноситься на шар нітриду кремнію, який було попередньо осаджено на 300 мм кремнієву пластину. Після цього за допомогою 193-імерсійного сканеру (сканер, що експонує пластини електромагнітною хвилею довжиною 193 нм) на фоторезисті утворюють шаблон ліній. Далі проводиться травлення та змивання залишків фоторезисту, таким чином утворюється шаблон ліній xPS. Після цього проміжки між лініями заповнюються полімерною щіткою, яка є рівно нейтральною до PS та PMMA блоків. Щітка прививається, і не активні залишки щітки змивають. Отриманий шаблон називатимемо далі хімічним шаблоном. При виборі періоду хімічного шаблону (періодом лінійного шаблону називають відстань між центрами двох сусідніх ліній) слід враховувати природній період блок-сополімеру, який буде наноситися далі. Взагалі кажучи, прийнято використовувати період хімічного шаблону L_s :

$$L_s \approx nL_0 \quad (3)$$

де n – фактор примноження DSA процесу. Після цього методом центрифугування наноситься блок-сополімер P(S-*b*-MMA), і пластина

відпалюється.

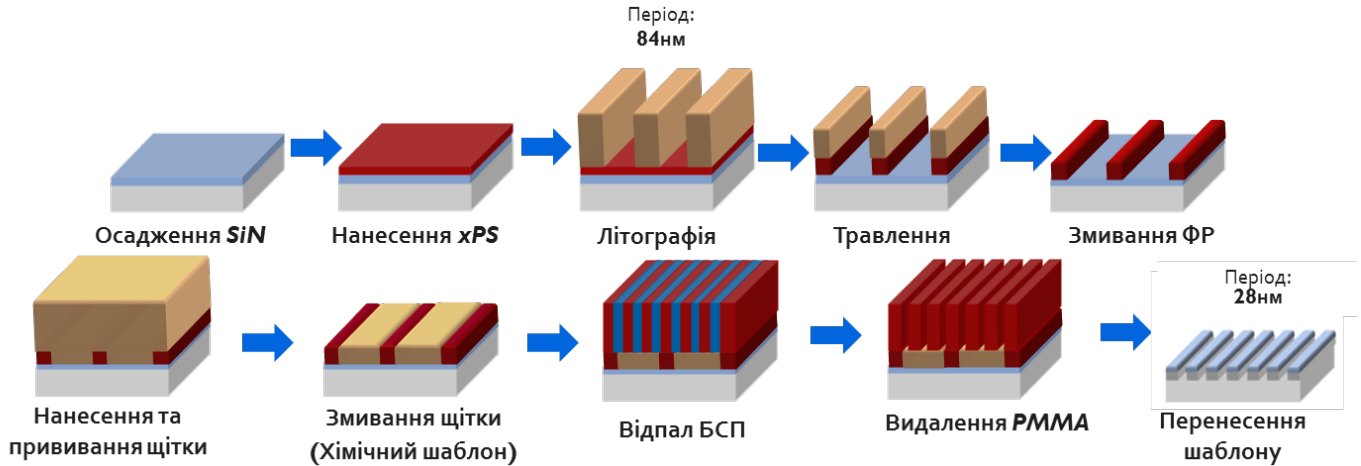


Рис.1.2 3X DSA LiNe технологічний процес.

Під час відпалу відбувається мікрофазове розділення блоків, та досягається впорядкована структура. Мінімуму вільної енергії Гіббса, який прагне зайняти система відповідатиме стан за якого PS блок знаходиться на xPS лінії хімічного шаблону, а відповідно три PMMA і два PS блоки знаходитимуться на нейтральній до обох блоків полімерній щітці. Слід зауважити, що середовище камери відпалу також є рівно нейтральним до обох блоків, що дає змогу уникнути необхідності покривати плівку блок-сополімеру додатковим нейтральним шаром.

Після відпалу видаляється PMMA блок, після чого за допомогою сухого травлення шаблон переноситься до нижніх шарів, наприклад SiN/Si, як це зображено на рис.1.2.

1.3 Нерівності країв ліній

Типовий СЕМ знімок шаблону після перенесення до SiN/Si зображено на рис.1.3.

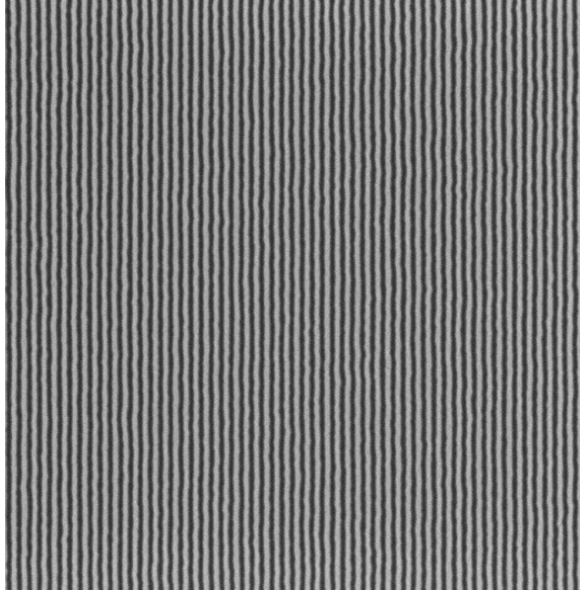


Рис.1.3 Вигляд згори лінійного шаблону після перенесення до шарів SiN/Si. Знімок виконано за допомогою скануючого електронного мікроскопу.

Такі шаблони ліній характеризуються не лише періодом та критичним розміром ліній, а і нерівністю країв ліній (LER, від англ.: line edge roughness) та нерівністю ширини ліній (LWR, від англ.: line width roughness). LER та LWR прийнято характеризувати параметром 3σ відхилень, що відповідно для LER є трьома стандартними відхиленнями положення краю лінії від середнього значення, а для LWR - трьома стандартними відхиленнями критичного розміру від середнього значення вздовж ліній, як це показано на рис.1.4.

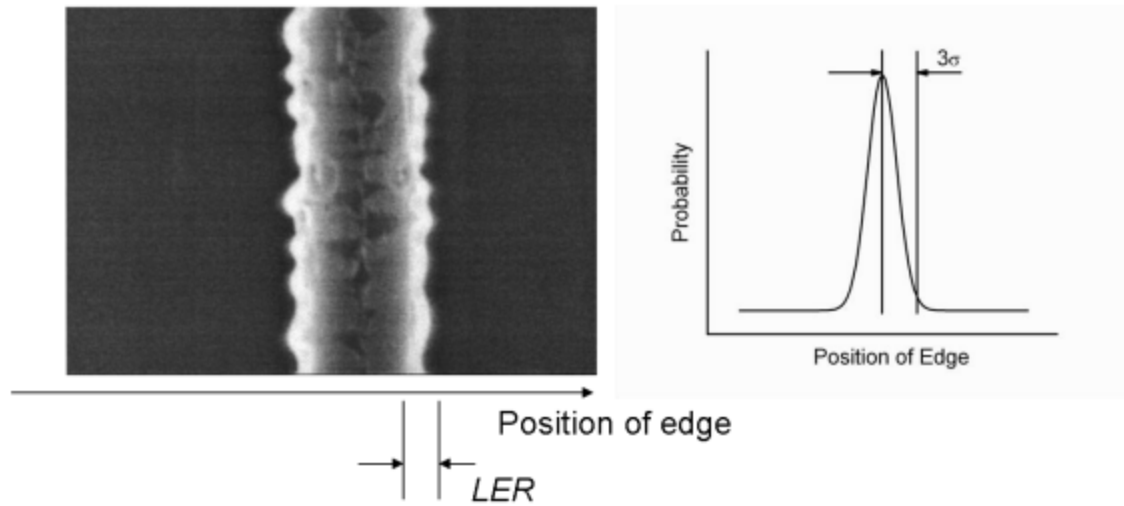


Рис.1.4 Параметр 3σ , що характеризує нерівність краю лінії.[6,8]

Нерівності для найменших структур (наприклад затвор польового транзистора) створених за допомогою літографічного процесу, можуть суттєво впливати на електричні характеристики, якість, надійність та ефективність роботи відповідних пристроїв. Так наприклад для польових транзисторів в інтегральних мікросхемах збільшуються струми втрат, змінюється порогова напруга, та можуть змінюватися параметри запису/зчитування для елементів пам'яті, якщо 3σ набуває критично великих значень [9,10,11].

LER та LWR стали важливими факторами для літографії відколи структури стали меншими за 100 нм. Для класичної фотолітографії нерівності зазвичай викликані неоднорідністю потоку фотонів під час експонування, статистичним розподілом хімічних частинок в фоторезисті, та ненульовим розміром полімерів резисту, що розчиняються протягом проявлення [12].

1.4 Аналіз спектральної густини потужності

3σ відхилення, дає далеко не повну інформацію про нерівності країв ліній, адже сам по собі цей параметр не дає частотної характеристики для LER та LWR. Наприклад, рис.1.5 показує чотири різні краї ліній з однаковим значенням стандартного відхилення. Очевидно, що краї цих ліній різні і відповідно їх вплив на якість та ефективність роботи пристроїв буде різним. Таким чином для повної характеристики нерівності країв ліній необхідно розуміти і просторово-частотні властивості ліній [13].

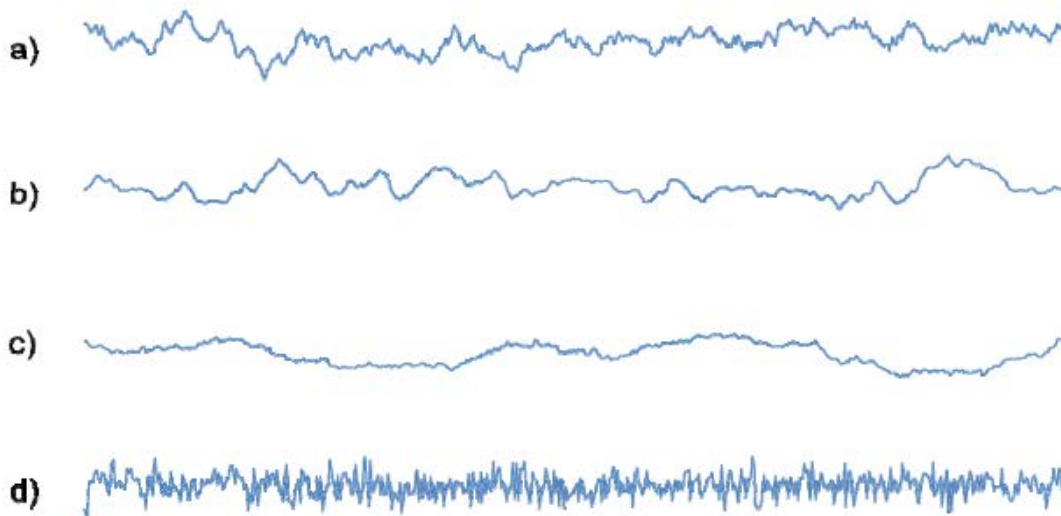


Рис.1.5 Чотири довільно нерівні лінії з однаковим значенням 3σ , проте з різними частотними характеристиками [13].

Залежність нерівностей від просторової частоти можна описати за допомогою спектральної густини потужності. Спектральна густина потужності (СГП) – це дисперсія краю ліній на інкремент зростання частоти, і розраховується вона як квадрат коефіцієнтів Фур'є перетворення відхилення країв. Типову функцію СГП показано на рис.1.6.

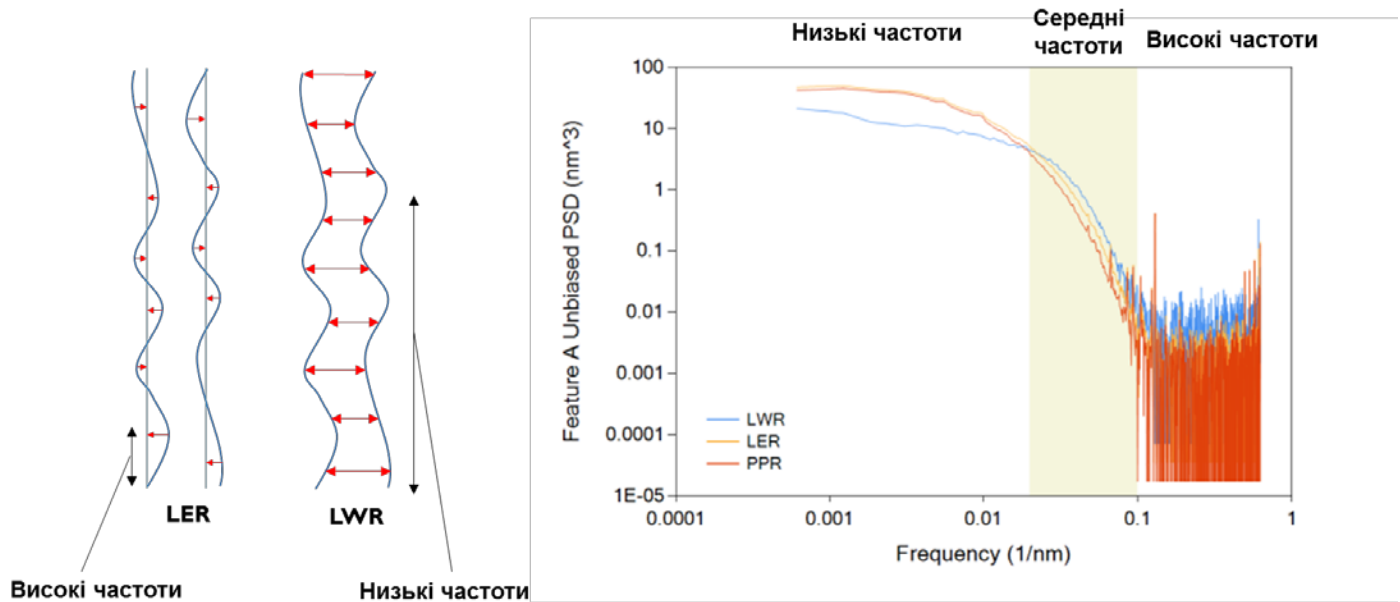


Рис.1.6 Типовий вигляд функції спектральної густини потужності.

З лівої частини рис.1.6 видно, що низькі частоти є характеристикою нерівностей, що виникають на великих довжинах лінії, а відповідно високі частоти описують нерівності на малих довжинах.

Слід також зауважити, для отримання коректних даних потрібно враховувати вплив шумів та систематичних похибок скануючого електронного мікроскопу на знімки. Таким чином слід правильно підбирати параметри мікроскопу, такі як: розмір та кількість пікселів, кількість кадрів на знімок, енергія пучка [14]. Використовуючи оптимальні параметри, можна мінімізувати вплив шумів мікроскопу на виміри, та використовуючи фізичні моделі видалити шуми з частотних характеристик і таким чином отримати не спотворені результати [15,16].

1.5 Нерівності країв ліній для DSA-літографії.

Нерівності країв ліній для фінального шаблону DSA-літографії можуть бути знижені за допомогою оптимізації параметрів сухого травлення і використовуючи нижній антирефлексивний шар (шар під блок-сополімером) з вмістом кремнію та нанесений шар карбону (SOC, від англ.:spin-on-carbon) [17].

Нерівності ліній в DSA-літографії можуть бути також викликані нерівностями xPS ліній на хімічному шаблоні, проте цей фактор має обмежений вплив [18]. Також важливою особливістю DSA-літографії є те що параметр 3σ для LER є вищим за параметр 3σ для LWR[19], на відміну від класичної фотолітографії.

Також раніше запропоновано модель для опису LER та LWR шаблонів саме з точки зору природи збірки блок-сополімерів [20]. Так, наприклад, встановлено, що LWR не залежить від зміни природнього періоду блок-сополімеру L_0 , на відміну від LER. Також в цій же роботі показано, що помилка розміщення шаблону для PS блоку завжди вища порівняно з PMMA блоком, саме тому параметр LER для PS блоків, а отже і для ліній після перенесення шаблону до нижніх шарів, вищий за параметр LWR. Також було показано, що підвищення параметру Флорі- Хагінса може призводити до зменшення нерівностей країв ліній [20,21].

РОЗДІЛ 2. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Технологічний процес та матеріали.

В даній роботі використовувався описаний вище LiNe технологічний процес з фактором примноження $3X$, для трьох блок-сополімерів типу: полі(стирол-блок-метилметакрилат) P(S-*b*-MMA). В якості полімерної щітки використовувався полі(стирол-*r*-метилметакрилат) з кінцевими гідроксильними групами (P(S-*r*-MMA)-OH). Всі процеси та технологічні кроки було виконано в середовищі чистої кімнати в науково-дослідницькому центрі іmes, Бельгія. Досліджувані зразки – це кремнієві пластини діаметром 300 мм і осаджені нітридом кремнію методом хімічного осадження з парової фази. Плівка xPS, наносилась методом центрифугування і відпалювалась протягом 5 хвилин в атмосфері N₂. Після чого наносився фоторезист, і пластина піддавалася експонуванню довжиною хвилі 193 нм, за допомогою імерсійного сканеру, та проявленню за допомогою треку зв'язаного з сканером. Таким чином отримувалася лінійний шаблон, на якому під час експонування за допомогою маски встановлювався різний період ліній. Після чого шляхом сухого травлення видалявся xPS з областей, де не було фоторезисту, після цього рештки фоторезисту змивались. (P(S-*r*-MMA)-OH) полімерна щітка наносилась методом центрифугування і прививалась за допомогою відпалу в атмосфері N₂. Не активовані залишки полімерної щітки після цього змивались. Після чого, методом центрифугування наносився блок-сополімер і відпалювався в атмосфері N₂.

Головною метою досліджень було з'ясування впливу параметрів спрямованої самозбірки блок-сополімеру на нерівності країв ліній. Для цього в роботі використано три блок-сополімери одного сімейства з різним

природнім періодом L_0 (з різницею $\pm 0,5$ нм). Це дає змогу зрозуміти чи впливає геометричне неспівпадіння періоду хімічного шаблону та природнього періоду блок-сополімеру (порушення строгої рівності в формулі (3)) на нерівності країв ліній. Це проілюстровано на рис.2.1 для випадку з однаковим БСП і різним періодом хімічного шаблону.

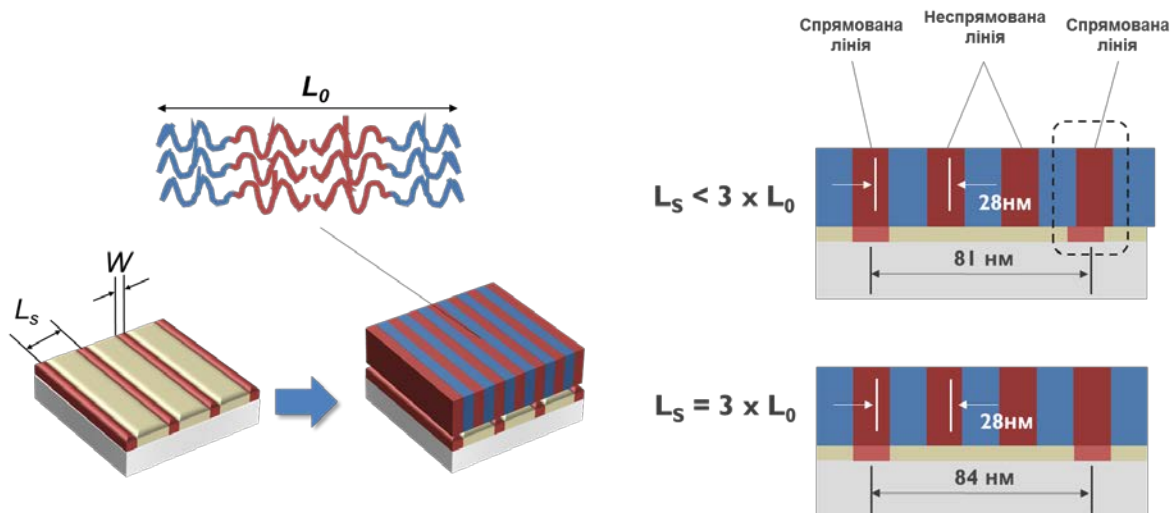


Рис.2.1 Ілюстрація неспівпадіння між періодом хімічного шаблону L_s та природнім періодом блок-сополімеру L_0

Також підготовано пластини з різними товщинами плівок блок-сополімеру (35 нм та 42 нм), зроблено це за допомогою зміни швидкості обертання пластини під час центрифугування. Температуру відпалу змінювали в межах від 250 °С до 320 °С. Запропоновано зменшити нерівності країв ліній за допомогою другого відпалу в атмосфері N_2 аналогічно першому відпалу, температуру другого відпалу також змінювали, в межах від 170 °С до 290 °С. Другий відпал при температурі 170 °С проводився з різним часом від 30 хвилин до 120 хвилин. Після самозбірки проводили перенесення шаблону до нижніх шарів SiN/Si за допомогою травлення. Параметри травлення для всіх зразків були однаковими.

Загалом план експерименту з представленими контрольованими факторами показано на рис.2.2.

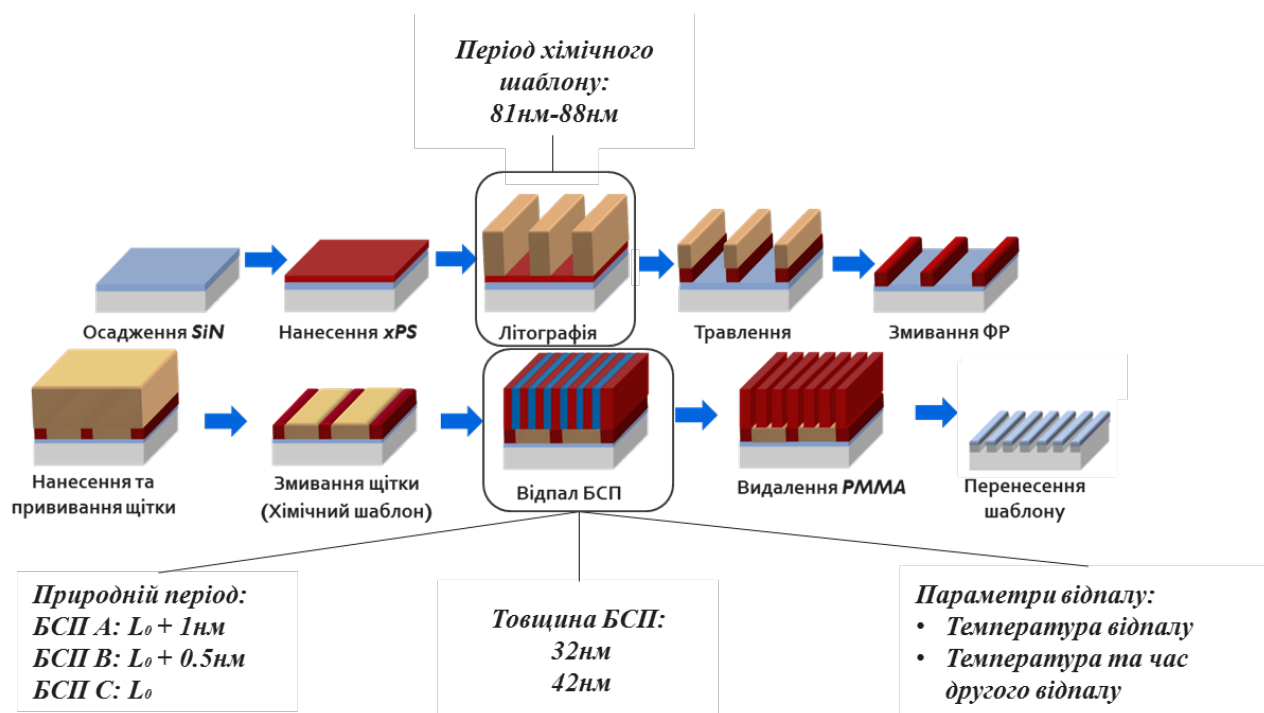


Рис.2.2. Параметри процесу спрямованої самозбірки, що досліджувались протягом експерименту.

2.2 Метрологія

Для дослідження шаблонів використовувався скануючий електронний мікроскоп. Всі знімки скануючого електронного мікроскопу було виконано після перенесення шаблону до шарів SiN/Si.

Ключовим для вимірювання нерівностей країв ліній є видалення шумів SEM з отриманих результатів. Параметри SEM було встановлено відповідно до стандартного протоколу визначеного в [12], а саме:

- Розмір пікселів – 0.8нм X 0.8нм

- Число пікселів - 2048
- Кількість кадрів для знімку – 32 кадри
- Енергія пучка – 800 еВ
- Фільтри не використовувались
- Щонайменше 40 знімків було проаналізовано для кожного випадку, для отримання статистично значимих усереднених даних

Як зазначалось в розділі 1.4 метою підбору цих параметрів є мінімізація впливу шумів та систематичних похибок скануючого електронного мікроскопу на якість знімків. В цьому випадку шуми все ще мають значний вплив на функцію спектральної густини потужності, але встановивши параметри так як зазначено вище, шуми будуть сталими зі зміною частоти, і набудуть характеру білого шуму, як це показано на рис.2.3.

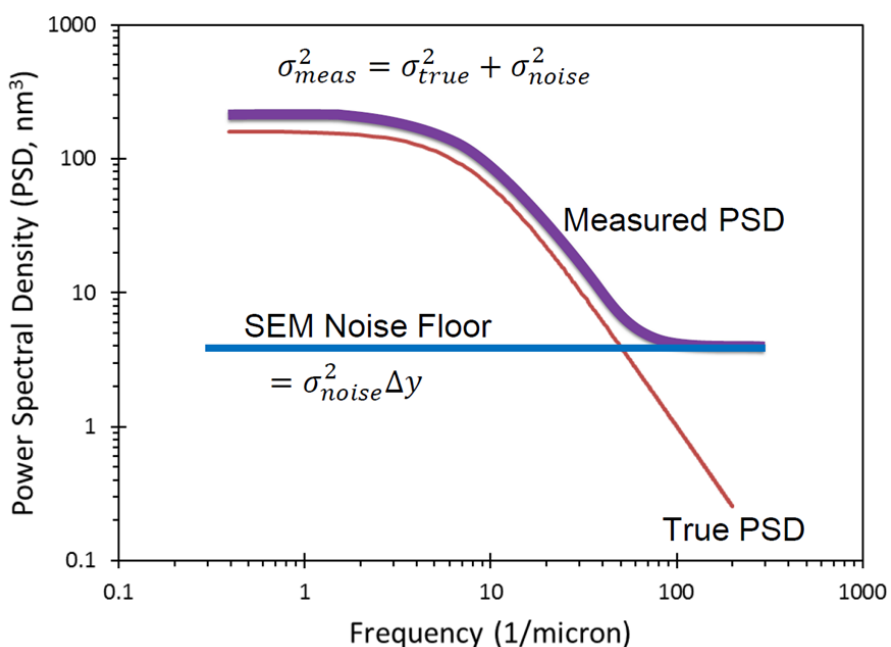


Рис.2.3 Вигляд реальної (неспотвореної), та вимірної (спотвореної шумами СЕМ) функції СГП [13].

На рис.2.3 видно, як в області високих частот функція СГП виміряна на пряму (без віднімання шумів) починає відхилятися від реальної, неспотвореної функції СГП, яка з підвищенням частоти продовжує спадати. Таким чином параметр 3σ нерівностей країв ліній також буде спотвореним, адже дисперсія країв визначається як інтеграл функції СГП. Це в геометричному трактуванні означає, що дисперсія країв ліній рівна площі під кривою СГП. Отже на пряму виміряний 3σ параметр буде вищим за реальний. Кінцевою метою встановлення вищезазначених параметрів СЕМ є отримання саме сталого білого шуму СЕМ, адже його можна видалити з функції СГП і у підсумку отримати реальний, неспотворений вигляд функції.

Шуми скануючого електронного мікроскопу та систематичні похибки було видалено з даних за допомогою програми MetroLER™, також за допомогою цієї програми виконано аналіз спектральної густини потужності, обчислено реальне значення 3σ для LER та LWR. Всі значення 3σ представлені далі в розділі 3 є неспотвореними реальними значеннями обчисленими після видалення шумів.

Використовуючи спеціальний режим роботи програми з розділенням ліній на групи, ми змогли отримати окремі набори даних для спрямованих та неспрямованих ліній (Рис.2.4).

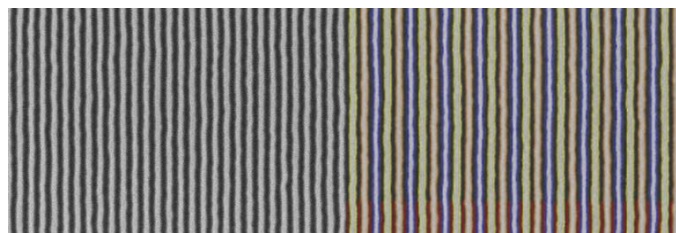


Рис.2.4 Приклад типового знімку СЕМ лінійного шаблону після перенесення до шарів SiN/Si (зліва), та знімок після детектування

країв ліній з розділенням на три групи за допомогою програми MetroLER™ (зправа).

При аналізі даних ми розділили функцію спектральної густини потужності на три частотні області:

- Низькі частоти, що відповідають довжинам більше 50 нм.
- Середні частоти – від 10 нм до 50 нм.
- Високі частоти – менше 10 нм.

Базувалось це розділення на припущенні, що зміна/оптимізація параметрів спрямованої самозбірки матиме більший вплив на низькочастотну область, тоді як для високочастотної області вирішальним є вплив травлення. Надалі ми будемо використовувати параметри 3σ окремо для відповідних трьох частотних областей.

РОЗДІЛ 3. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Вплив періоду хімічного шаблону.

Для дослідження впливу періоду хімічного шаблону на нерівності підготовано зразок з товщиною блок-сополімеру 35 нм, що приблизно відповідає $1,25L_0$. Пластина відпалювалась 10 хвилин при температурі 290 °C. Період хімічного шаблону змінювали під час експонування, за допомогою маски, таким чином, що на одну пластину в різні місця було нанесено шаблони з різним періодом в діапазоні від 81 нм до 88 нм, при цьому доза та фокус були однаковими.

Зб значення нерівностей країв ліній та нерівностей ширини ліній в залежності від періоду хімічного шаблону показано на рис.3.1.

Як видно з рис.3.1 (d)-(f), значення LWR залишається сталим для всіх періодів хімічного шаблону. Цей тренд зберігається для всіх просторових частот. Ми пояснюємо це тим, що критичний розмір (ширина) лінії в DSA-літографії визначається довжиною полімерного ланцюга, саме тому вплив змін параметрів хімічного шаблону матиме обмежений вплив на нерівності ширини ліній. Що стосується нерівності країв ліній, то видно, що для високих частот залежності від періоду не спостерігалось (рис.3.1 (c)). Починаючи з середніх частот (рис.3.1 (b)), хоча залежності від періоду все ще не має, уже видно, що спрямовані лінії (лінії, що до перенесення шаблону знаходилися на xPS спрямовуючій лінії хімічного шаблону (Рис.2.1)), мають менше значення 3σ , отже є рівнішим в порівнянні з неспрямованими (лінії, що до перенесення шаблону знаходилися на полімерній щітці (Рис.2.1)). Для низько частотної області виявлено залежність параметра LER, а саме, як видно з рис.3.1 (a), отримано рівніші лінії для меншого періоду хімічного

шаблону. Якщо повернутися до рис.2.1, можна зробити висновок, що зі збільшенням різниці між природнім періодом блок-сополімеру та періодом хімічного шаблону покращується ефективність процесу і можна отримати рівніші лінії.

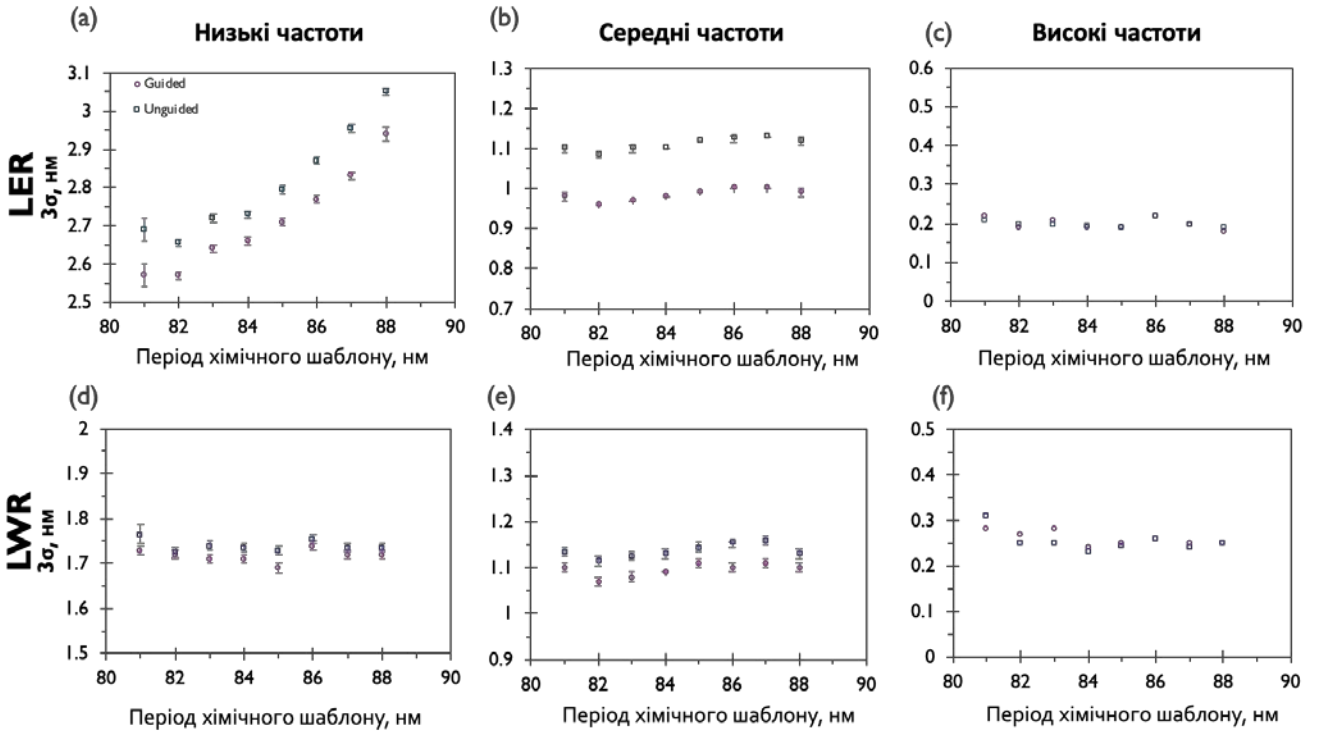


Рис.3.1 Залежність нерівностей країв ліній (LER) (a), (b), (c) та нерівностей ширини ліній (LWR) від періоду хімічного шаблону (d), (e), (f).

Це спостереження є специфічною властивістю саме DSA-літографії, адже для класичної літографії «згори-вниз», зі зменшенням періоду шаблону 3σ параметр LER збільшується. Також можна зробити висновок, що зміни параметрів самозбірки мають суттєвий вплив саме на низькочастотні характеристики нерівності країв ліній, тоді як для вищих частот, та взагалі для нерівностей ширини ліній такий вплив мінімальний. В подальших розділах ми детально будемо розглядати вплив різних факторів на нерівності

країв ліній для низькочастотних областей, надалі будуть показані результати для неспрямованих ліній.

3.2 Вплив природнього періоду блок-сополімеру

Таким чином, припустимо, що одним з можливих способів покращити ефективність літографічного процесу, а саме зменшити нерівність країв ліній, є використання блок-сополімеру з більшою молекулярною масою, а отже і більшим значенням природнього періоду L_0 . Для того аби перевірити це припущення, було підготовано три зразки, з блок-сополімерами одного сімейства, але з різними значеннями природнього періоду.

Природній період було попередньо визначено, за допомогою програми Hitachi High-Technology DSA-APPS. Зразки для визначення L_0 , також було підготовлено на 300 мм кремнієвих пластинах, проте без осадженого шару нітриду кремнію. Безпосередньо на кремній наносилась нейтральна полімерна щітка, після чого наносився і відпалювався блок-сополімер. Температури відпалу були різними для різних пластин в межах від 230 °C до 290 °C. Таким чином було отримано плівку з візерунком типу відбитка пальця (блок-сополімер зайняв впорядкований стан, але не був спрямований). Далі було видалено PMMA блок, і зроблено знімки СЕМ, які можна було проаналізувати за допомогою вище зазначеної програми. Як видно з рис 3.2 різниця між значенням L_0 для трьох досліджуваних блок-сополімерів становить 0.5 нм для всіх значень температури відпалу.

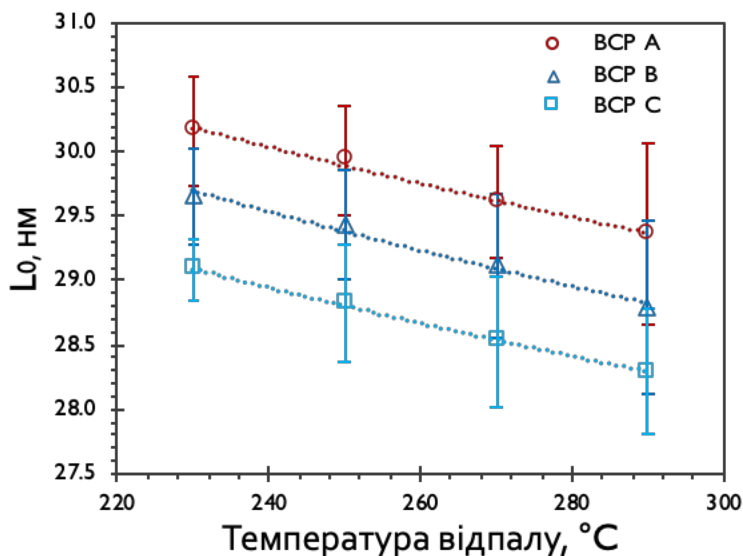


Рис 3.2 Залежність природнього періоду блок-сополімерів від температури відпалу.

Для того аби визначити вплив розміру блок-сополімеру (L_0) на нерівності підготовано три зразки з однаковими параметрами, окрім молекулярної маси БСП: відпал проводився за температури 290 °C протягом 10 хвилин, товщина плівки БСП становила 35 нм. Результати вимірів нерівностей країв ліній для низьких частот показано на рис.3.3. Слід зауважити, що межі допустимих значень періоду хімічного шаблону для вирівнювання блоків в лінії, для БСП з різними молекулярними масами різні. Так, наприклад, БСП С може вирівнятись (утворити, шляхом самозбірки, лінійний шаблон протягом відпалу) лише на хімічному шаблоні з періодом не більше 85 нм. Тому на графіку лише для БСП А наявні значення для всіх періодів хімічного шаблону від 81 нм до 88 нм. Тим не менше для всіх БСП можемо порівняти низькочастотні значення 3σ для LER для періодів хімічного шаблону від 81 нм до 85 нм.

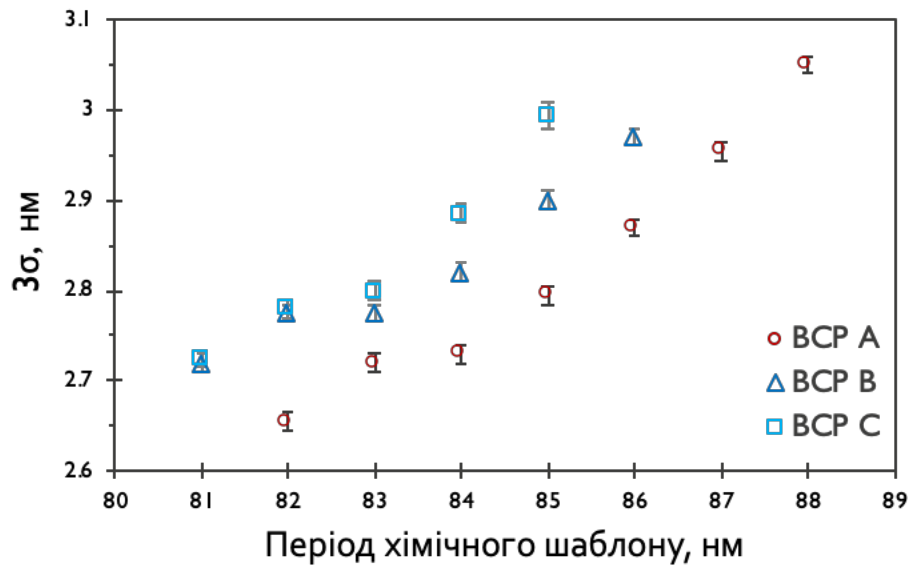


Рис.3.3 Залежність нерівностей країв ліній від періоду хімічного шаблону для блок-сополімерів з різним природнім періодом.

З графіка видно, що дійсно, як і очікувалось з огляду на результати представлені в розділі 3.1, використання БСП А з більшим значення L_0 (а отже і більшою різницею між природнім періодом БСП та періодом хімічного шаблону) дає можливість отримати рівніші лінії на фінальному шаблоні.

У наступних розділах завжди використовувався БСП А.

3.3 Вплив товщини плівки блок-сополімеру

Також в даній роботі розглянуто вплив товщини плівки блок-сополімеру на нерівності країв ліній. Порівнювалось два зразки з товщинами БСП 35 нм та 42 нм. На рис.3.4 показано результати вимірювань періоду

блок-сополімеру для різних товщин плівки, що проводилися тією ж методикою, що описана в розділі 3.2. Як видно з графіку для більшої товщини плівки БСП отримано більше значення L_0 , таким чином можна очікувати, що зміна цього параметру, може вплинути на параметр LER.

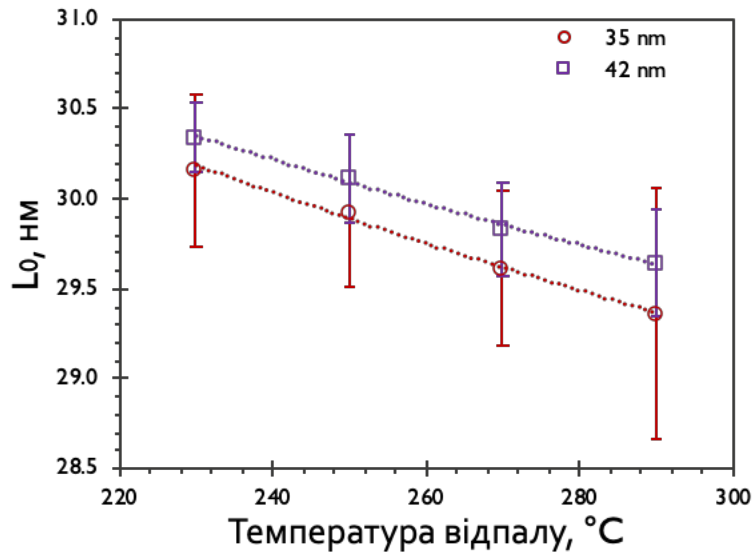


Рис.3.4 Залежність природнього періоду БСП від температури для різних товщин плівки БСП.

Зразки для цього експерименту відпалювались при температурі 250 °C протягом 30 хвилин. В цьому випадку ми порівнювали значення LER для періоду хімічного шаблону 86 нм, оскільки для такої низької температури відпалу блок-сополімер товщиною 42 нм не здатен утворювати лінійний шаблон на хімічних шаблонах з меншим періодом.

Результати показано на рис.3.5. Як видно з графіків для високих та середніх частот, суттєвої залежності 3σ LER від товщини плівки БСП не спостерігалось. Проте для низьких частот спостерігалось суттєве зменшення нерівності країв ліній для товстішої плівки БСП, що узгоджується з попередніми результатами, адже для цієї товщини природній періоду блок-

сополімеру більший. Також імовірним поясненням такого тренду є наближення властивостей плівки БСП до властивостей в стані великого об'єму, для моделей великого ж об'єму очікується досягнення мінімального значення нерівностей.

В подальших дослідженнях товщина плівки БСП становила 42 нм.

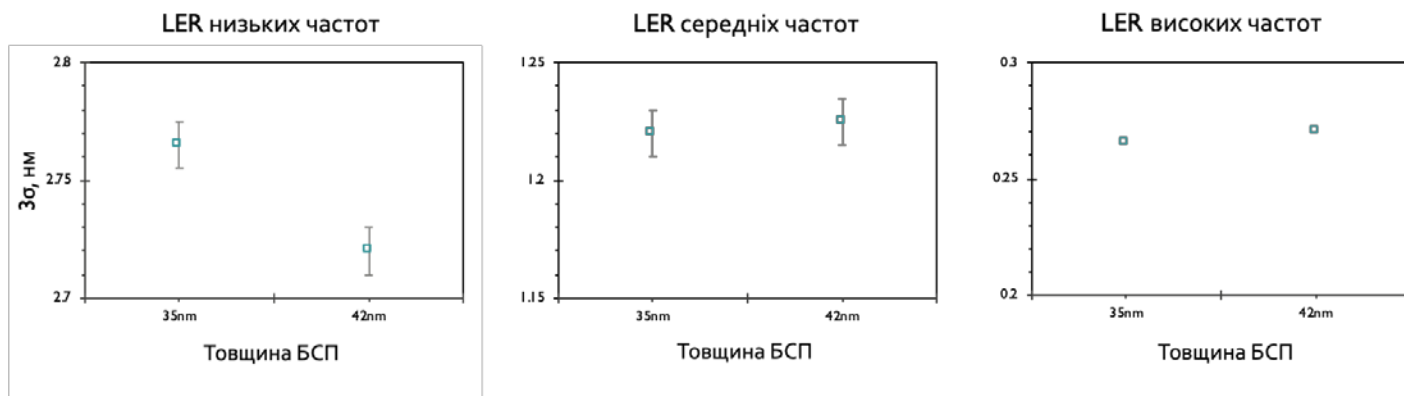


Рис.3.5 Залежність нерівностей країв ліній від товщини плівки блок-сополімеру.

3.4 Вплив параметрів відпалу

Як зазначено в розділі 3.2 та показано на рис.3.2 природний період блок-сополімеру залежить від температури відпалу. З огляду на це ми припускали, що зміна температури відпалу також впливатиме на нерівності країв ліній. Для цього було підготовано зразки, що відпалювались за різних температур в діапазоні від 250 °С до 320°С. Залежність 3σ параметру LER показано на рис.3.6, для періоду хімічного шаблону 86 нм. Зауважимо, що температура відпалу впливає на швидкість самозбірки, отже для менших температур потрібно відпалювати блок-сополімер довше, аби досягнути лінійного шаблону з прийнятною кількістю дефектів. Тому для відпал при

температурі 250 °С проводився 30 хвилин, а для вищих температур 10 хвилин. Як видно з рис.3.6, на противагу нашим очікуванням, залежності значення 3σ від температури не спостерігалось в межах від 250 °С до 290 °С. Натомість значне зменшення відбулося для температури відпалу 320 °С.

Ми припускаємо, що імовірно під час відпалу за такої високої температури пошкоджується РММА блок шляхом надмірного окиснення. За рахунок цього збільшується параметр χ (параметр взаємодії Флурі – Хагінса), це фактично означає, що різниця в хімічних властивостях РММА та PS блоків стає більшою. Збільшення χ призводить до обмеження просторових флуктуацій на межі двох блоків протягом відпалу і наслідком цього є рівніші лінії після перенесення шаблону.

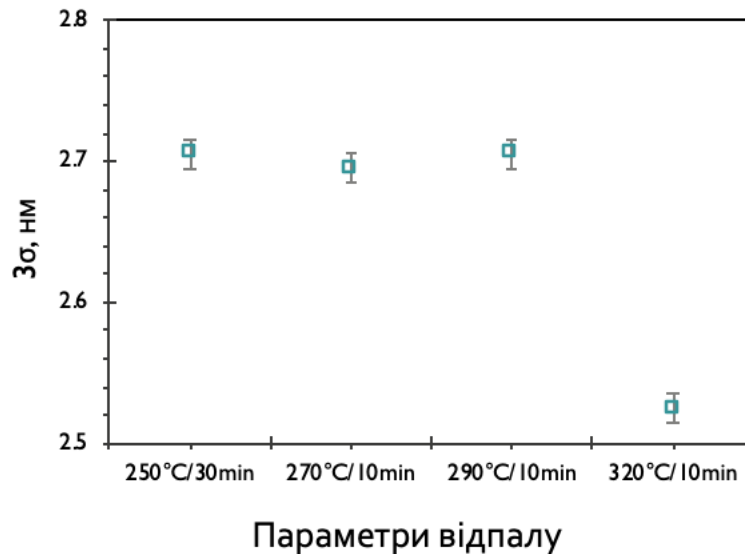


Рис.3.6 Залежність нерівностей країв ліній від температури відпалу.

Далі запропоновано можливий спосіб зменшення нерівностей країв ліній шляхом додавання в технологічний процес додаткового кроку - другого відпалу пластини. Оскільки для нижчих температур відпалу, спостерігається більше значення природнього періоду, ми припустили, що відпаливши

пластину вдруге за значно нижчої температури в порівнянні з температурою першого відпалу, можна буде досягнути покращення якості шаблону. При цьому не має необхідності відпалювати зразок вдруге протягом довгого часу, оскільки протягом першого відпалу самозбірка вже відбулась, а отже шаблон сформовано, метою другого відпалу є лише вирівнювання країв БСП блоків, а не зменшення кількості дефектів. Процес відпалу схематично проілюстровано на рис 3.7.

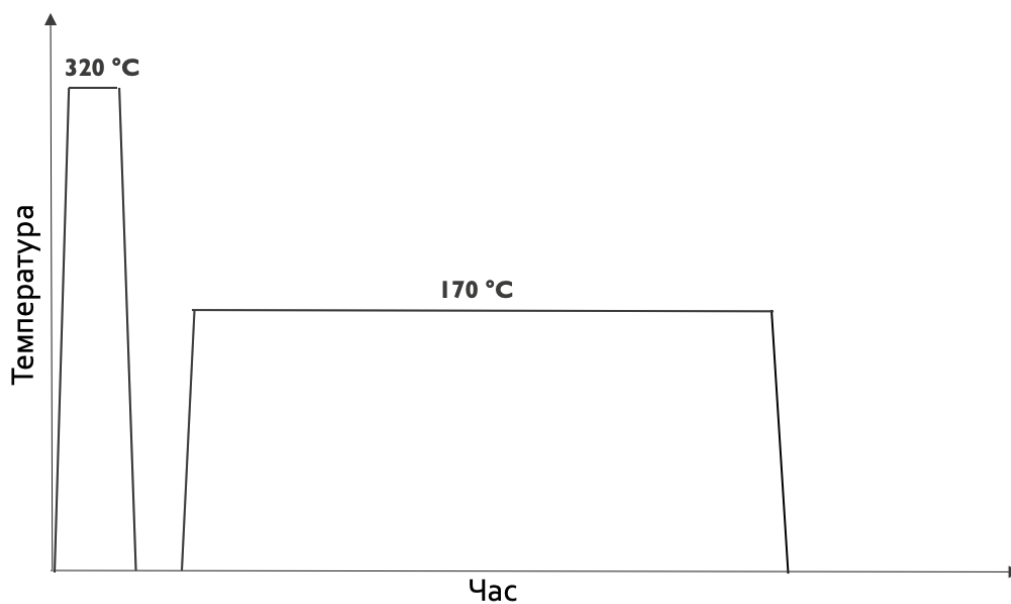


Рис.3.7 Процес подвійного відпалу пластини.

Для першого відпалу обрано температуру 320 °C, що дає змогу:

- Отримати мінімально можливе значення 3σ , як ми переконались з попереднього дослідження;
- Зменшити дефекти шаблону, оскільки збірка в цьому випадку швидша в порівнянні з нижчими температурами;
- Зменшити час першого відпалу до 3 хвилин, що дає змогу зменшити загальну вартість процесу в серійному виробництві.

Одну пластину відпалено один раз (використовувалась як порівняльна пластина), ще чотири пластини відпалено двічі, з однаковою температурою першого, але різними температурами повторного відпалу. Результати вимірів нерівностей країв ліній для періоду хімічного шаблону 84 нм показано на рис.3.8.

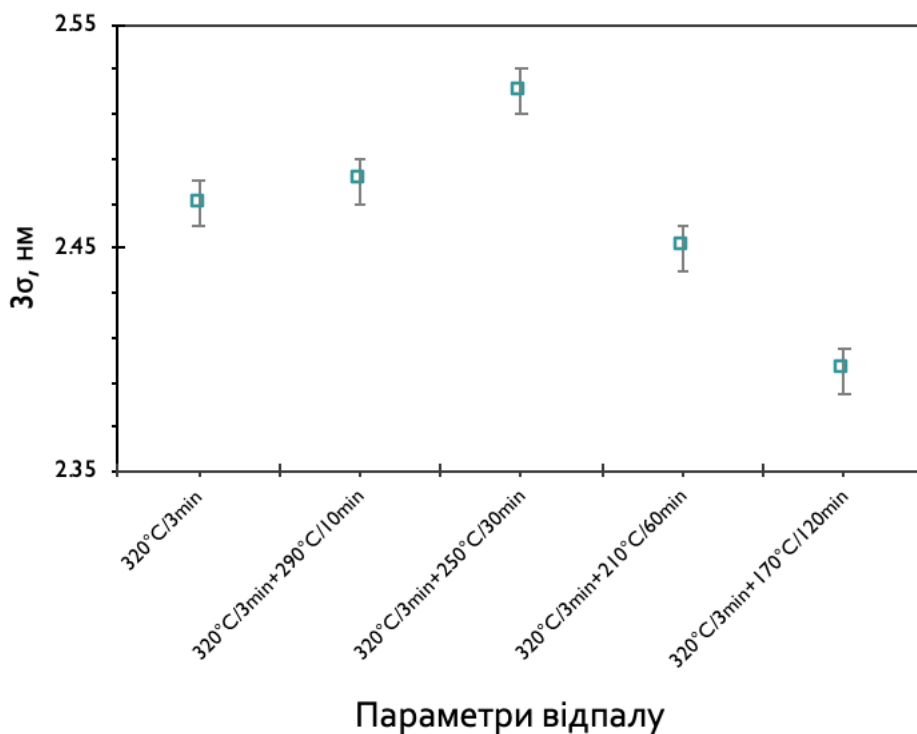


Рис.3.8 Залежність нерівностей країв ліній від температури другого відпалу.

Як видно з рисунку параметр LER не було покращено другим відпалом при температурі 250 °C і вище. Проте невелике зменшення 3σ виявлене для 210 °C. Відпалюючи пластину вдруге при температурі 170 °C спостерігалось значне покращення нерівностей країв ліній.

Далі необхідно було визначити, як довго потрібно відпалювати пластину вдруге. Додатковий технологічний крок у вигляді другого відпалу

приводить до здорожчання процесу загалом, тому потрібно скоротити час другого відпалу якомога сильніше, при цьому не втративши покращення якості шаблону. Для того аби це дослідити ми підготували ще три пластини, та відпаювали їх двічі. Повторний відпал проводився 30 хвилин, 60 хвилин та 120 хвилин з однаковою температурою 170 °С. Як видно з рис.3.9 отримано покращення якості шаблону вже для 30 хвилинного відпалу.

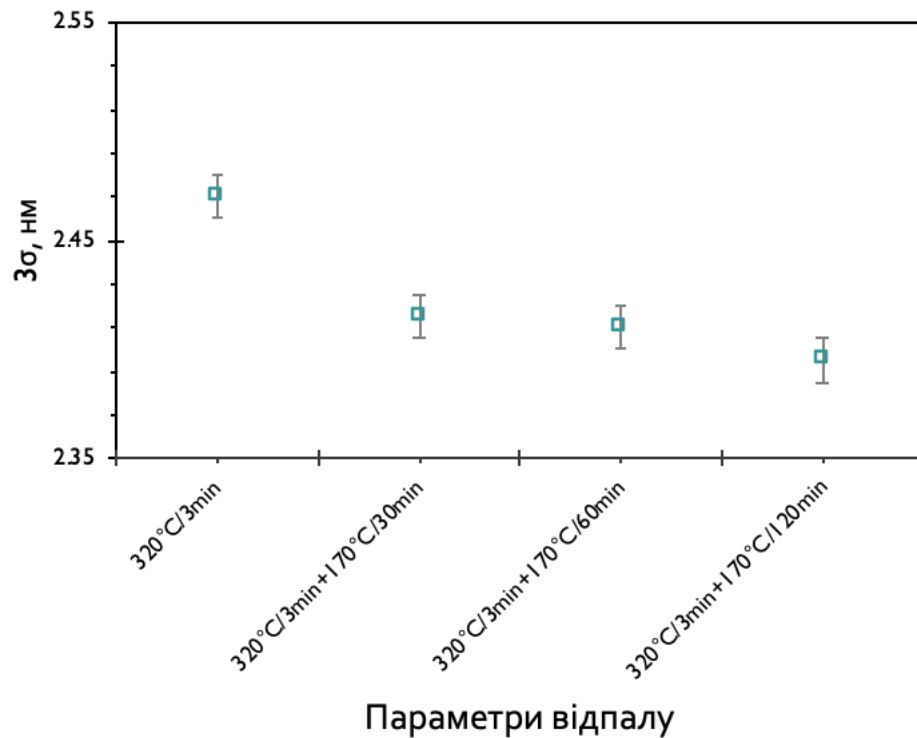


Рис.3.9 Залежність нерівностей країв ліній від часу другого відпалу.

3.5 Оптимізація процесу

Враховуючи всі результати зазначені в попередніх розділах, можна сформулювати концепцію підбору матеріалів та параметрів для процесу спрямованої самозбірки блок-сополімерів з точки зору покращення

нерівностей країв ліній. Кожен з досліджених та оптимізованих факторів послідовно зменшував 3σ параметр LER в низькочастотній області, на невелике значення. Проте якщо використати досвід з попередніх розділів та застосувати всі зміни можна досягнути значного зменшення (близько 0.5 нм) 3σ параметру для області низьких частот. Слід зауважити, що область низьких частот має найбільший внесок до загального значення 3σ у суцільному спектрі, тому покращення в низькочастотній області безумовно приведуть до покращення для загального значення параметру 3σ . На рис.3.10 зображене підсумкове зменшення нерівностей країв ліній та нерівностей ширини ліній для суцільного спектру частот за допомогою оптимізації параметрів спрямованої самозбірки блок-сополімеру.

Слід підкреслити, що при цьому, жодних змін до параметрів травлення не проводилося. Також всі пластини осаджені нітридом кремнію, що має хороші оптичні властивості для аналізу дефективності, проте з точки зору нерівностей країв ліній не є найкращим підшаром. Отже подальша оптимізація цих параметрів в комбінації з змінами запропонованими в цій роботі дасть змогу досягнути більшого покращення ефективності та якості DSA-літографії.

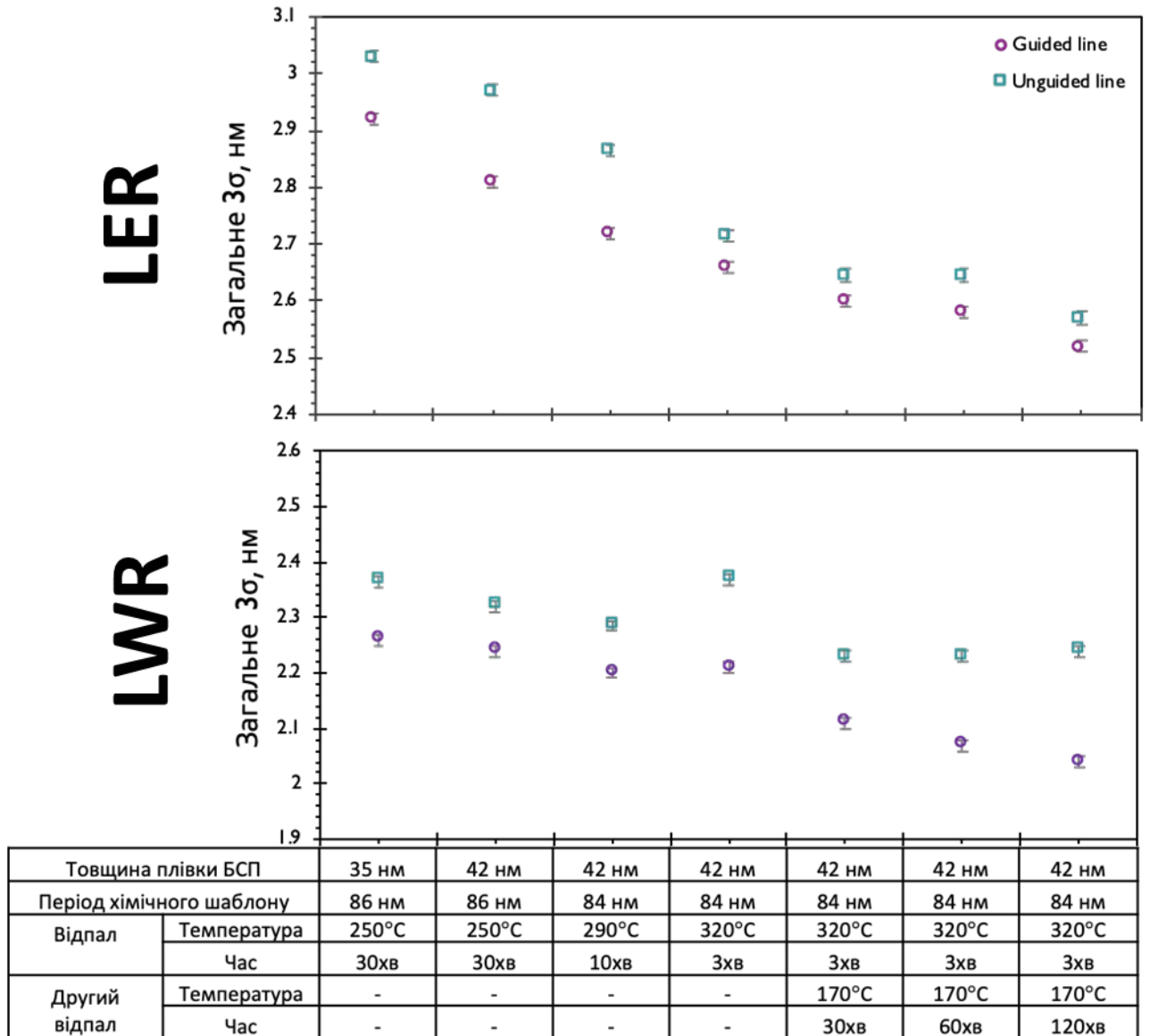


Рис. 3.10 Підсумкове зменшення нерівностей країв ліній (LER) та нерівностей ширини ліній (LWR) для суцільного спектру частот

ВИСНОВКИ

Встановлено набір параметрів процесу літографії спрямованої самозбірки контроль та оптимізація яких дає змогу отримати сумарне зменшення характеристики нерівностей країв ліній LER на 15 % та нерівностей ширини ліній LWR на 10%. А саме проаналізовано вплив на нерівності наступних параметрів:

- Періоду хімічного шаблону
- Природнього періоду блок-сополімеру
- Товщини плівки блок-сополімеру
- Температури відпалу

Запропоновано дієвий підхід для зменшення нерівностей ліній за допомогою повторного відпалу при температурі 170 °C.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Moore, Gordon. “*Cramming More Components Onto Integrated Circuits.*” *Electronics*, Volume 38, Number 8, April 19, 1965
2. Moore, Gordon. “*Progress in Digital Integrated Electronics*” IEEE, IEDM Tech Digest, 1975
3. Hamley, I.W. “*The Physics of Block Copolymers*”; Oxford University Press: New York, NY, USA, 1998; Volume 19
4. Hamley, Ian W. “*Structure and Flow Behaviour of Block Copolymers.*” *Journal of Physics: Condensed Matter* 13, no. 33 , 2001: R643–R671.
5. Thomas P. Russell, Rex P. Hjelm Jr., Phil A. Seeger, “*Temperature Dependence of the Interaction Parameter of Polystyrene and Poly(Methyl Methacrylate), Macromolecules.*” Accessed May 9, 2020.
6. Tseng, Yu-Chih, and Seth B. Darling. “*Block Copolymer Nanostructures for Technology.*” *Polymers* 2, no. 4 ,2010: 470–89.
7. Mai, Yiyong, and Adi Eisenberg. “*Self-Assembly of Block Copolymers.*” *Chemical Society Reviews* 41, no. 18 , 2012: 5969–85.
8. Nelson, C.; Palmateer, S.C.; Forte, A.R.; Lyszczarz, T.M. “*Comparison of metrology methods for quantifying the line edge roughness of patterned features.*” *J. Vac. Sci. Technol. B* 1999, 17, 2488-2498.
9. Xiong, S.Y.; Bokor, J.; Xiang, Q.; Fisher, P.; Dudley, I.; Rao, P. “*Study of gate line edge roughness effects in 50 nm bulk MOSFET devices.*” 1st ed.; Herr, D.J.C., Ed.; SPIE—International Society Optical Engineering: Bellingham, WA, USA, 2002; pp. 733-741.
10. Diaz, C.H.; Tao, H.J.; Ku, Y.C.; Yen, A.; Young, K. *An experimentally validated analytical model for gate line-edge roughness (LER) effects on technology scaling.* *IEEE Electron. Device Lett.* 2001, 22, 287-289.

11. Yu, S.M.; Zhao, Y.N.; Du, G.; Kang, J.F.; Han, R.Q.; Liu, X.Y. *The impact of line edge roughness on the stability of a FinFET SRAM*. *Semiconduct. Sci. Technol.* 2009, 24, 9.
12. C. A. Mack, *Field Guide to Optical Lithography*, SPIE Press, Bellingham, WA 2006.
13. Chris A. Mack "*Reducing roughness in extreme ultraviolet lithography*", Proc. SPIE 10450, International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography, 2017.
14. Gian Francesco Lorusso, Takumichi Sutani, Vito Rutigliani, Frieda van Roey, Alain Moussa, Anne-Laure Charley, Chris Mack, Patrick Naulleau, Chami Perera, Vassilios Constantoudis, Masami Ikota, Toru Ishimoto, and Shunsuke Koshihara "Need for LWR metrology standardization: the imec roughness protocol," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* 17(4), 041009, 2018.
15. Benjamin D. Bunday and Chris A. Mack, "*Influence of Metrology Error in Measurement of Line Edge Roughness Power Spectral Density*", *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVIII, Proc.*, SPIE Vol. 9050, 2014 p. 90500G.
16. Chris A. Mack and Benjamin D. Bunday, "*Using the Analytical Linescan Model for SEM Metrology*", *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXI, Proc.*, SPIE Vol. 10145, 2017, p. 101451R.
17. Muramatsu, Makoto, Takanori Nishi, Gen You, Yasuyuki Ido, and Takahiro Kitano. "*Defect and Roughness Reduction of Chemo-Epitaxy DSA Pattern.*" In *Novel Patterning Technologies 2018*, 21. San Jose, United States: SPIE, 2018.
18. Kato, Takeshi, Junko Konishi, Masami Ikota, Satoru Yamaguchi, Yuriko Seino, Hironobu Sato, Yusuke Kasahara, and Tsukasa Azuma. "*Advanced CD-SEM*

Metrology for Qualification of DSA Patterns Using Coordinated Line Epitaxy (COOL) Process.” 977816. San Jose, California, United States, 2016.

19. Constantoudis, Vassilios, Vijaya-Kumar Murugesan Kuppaswamy, Evangelos Gogolides, Alessandro Vaglio Pret, Hari Pathangi, and Roel Gronheid. “*Challenges in LER/CDU Metrology in DSA: Placement Error and Cross-Line Correlations.*” In *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXX*, 9778:97781X. International Society for Optics and Photonics, 2016.
20. Ruiz, Ricardo, Lei Wan, Rene Lopez, and Thomas R. Albrecht. “*Line Roughness in Lamellae-Forming Block Copolymer Films.*” *Macromolecules* 50, no. 3, 2017.
21. Srinivas, G.; Swope, W.C.; Pitera, J.W. *Interfacial fluctuations of block copolymers: A coarse-grain molecular dynamics simulation study.* *J. Phys. Chem. B* 2007.