

Д.т.н., професор Петренко А. І., аспірант Молявко О. С.

**Національний технічний університету України
«Київський політехнічний інститут»**

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПОЗИЦІЇ РЕЗИСТУ В ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ЛІТОГРАФІЇ

Вступ

Через безперервне зменшення геометричних розмірів елементів інтегральних схем їх формування шляхом експонування резисту за допомогою електромагнітного випромінювання (ультрафіолетового світла з різними довжинами хвиль) стикається з усе більшими складнощами. Хоча ці складнощі можуть бути зменшені шляхом застосування спеціальних прийомів (імерсійна літографія, подвійне експонування зі зсувом тощо), ведуться інтенсивні дослідження альтернативних варіантів літографії, більш придатних для експонування елементів нанометрових розмірів – з використанням для експонування резисту рентгенівських променів (рентгенівська літографія), електронних потоків (електронно-променева літографія) [1] або потоків іонів (іонно-променева літографія). Ці технології на даний час носять характер експериментальних і не застосовуються у масовому виробництві, крім того, процеси експонування резисту в цих варіантах літографії порівняно мало вивчені.

Постановка задачі

Електронно-променева літографія в якості заміни звичайної оптичної має як переваги (відсутність потреби у масках, висока роздільна здатність), так і недоліки ("послідовний" характер експонування зображення, специфічні ефекти, пов'язані з розсіюванням електронів у резисті). Оскільки устаткування для електронно-променевої літографії дороге і малодоступне, виникла потреба розробити програму, яка б дозволила моделювати процес експонування резисту із урахуванням основних факторів, що впливають на отримуване "зображення".

Опис програми моделювання

Для вивчення цих ефектів та їх впливу на процес експонування було розроблено програму, яка дозволяє проводити моделювання для елементів довільної геометричної конфігурації при різних параметрах електронно-променевих систем. Як вхідні дані в програмі використовуються параметри електронно-променевої системи (діаметр променя, його інтенсивність, крок ліній растру та параметри розподілу інтенсивності електронного потоку у промені), а також тестова топологія, експонування якої моделюється. На даний час програма підтримує лише моделювання експозиції в режимі з послідовним проходженням променя по паралельних лініях растру з постійним кроком між лініями. Для обчислення інтенсивності електронного потоку в різних точках резисту застосовується запропонована Чангом у 1975 році модель, що представляє розсіювання електронів у промені у вигляді згортки розподілу доз з функцією близькості. Функція близькості описує розподіл отриманої дози на деякій глибині під поверхнею резисту для точкового електронного променя. У працях Чанга [2] функція близькості є сумою двох гаусових функцій, причому більш вузька гаусова функція описує пряме розсіювання електронів у резисті, а більш широка – обернене розсіювання. Для врахування додаткових ефектів і більш точного моделювання розподілу щільності потоку електронів у програмі передбачена можливість застосування додаткових гаусових функцій. Поверхня резисту в програмі представлена у вигляді прямокутної сітки з постійним кроком по двох координатах, для вузлів якої розраховуються дози експозиції.

Програма не враховує ряд складних для формального опису ефектів. Наприклад, вважається, що поверхня резисту є ідеально рівною площиною, що електронний промінь завжди падає на неї перпендикулярно. Також не враховано, що у резисті, який є поганим провідником струму, може накопичуватись залишковий заряд, який робить рівень експонування нелінійно залежним від отриманої дози експозиції.

Моделювання експонування резисту проводиться у декілька етапів [3]. На першому етапі виходячи з даних про електронно-променеву систему розраховується траєкторія, за якою промінь буде рухатись по поверхні резисту. На другому етапі з розрахованої траєкторії обирається множина (послідовність) точок на поверхні резиста, які центр променя проходить через рівні проміжки часу. На третьому етапі обчислюються рівні експонування точок на поверхні резисту у вигляді суми вкладів у експозицію від кожної з точок, обраних на другому етапі. Програма дозволяє зберігати отримані при моделюванні результати в файлі, а також

візуалізувати результати експонування у вигляді плоских зображень, де яскравість пікселів пропорційна до рівня експонування відповідних областей резисту (рис. 1).

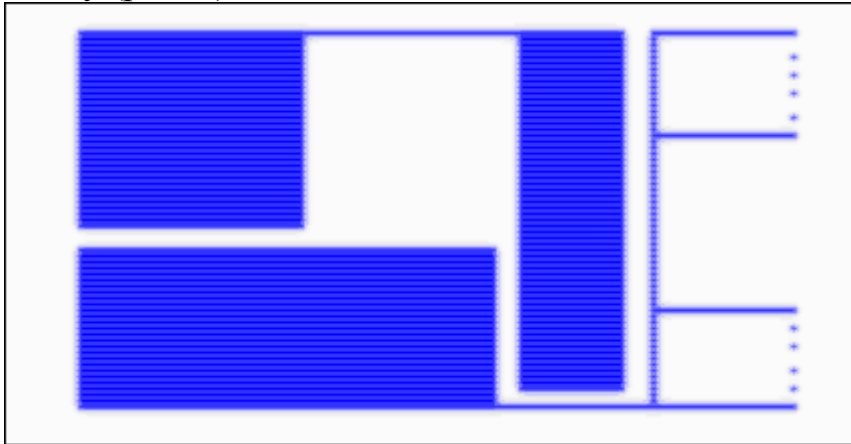


Рис. 1. Результати моделювання процесу експонування (850x450 точок)

Крім того, програма дозволяє аналізувати отримані результати моделювання, виділяючи області резисту, де рівні експонування нижчі або вищі за задане порогове значення, або області, у яких рівень експонування лежить між двома заданими значеннями.

Програма також дозволяє виконувати корекцію рівнів експонування за рахунок керування інтенсивністю променя у рівномірно розміщених на його траєкторії точках. Корекція рівнів експонування має за мету якнайточніше відтворення заданої структури елементів на поверхні резисту і зменшення впливу ефектів, які погіршують якість цього відтворення (злиття близько розташованих елементів або зменшення геометричних розмірів елементів, розташованих далеко від інших). При корекції шляхом керування інтенсивністю всередині елементів з великими геометричними розмірами або при експонуванні близько розташованих елементів інтенсивність електронного променя знижується, а при експонуванні малих за розміром елементів - підвищується. Оскільки досягти ідеально точного відтворення елементів топології на резисті неможливо, перед виконанням корекції обираються числові критерії, за якими вона виконується. На даний момент програма дозволяє виконувати корекцію за такими критеріями:

- Мінімальний рівень фонові експозиції (програма буде коректувати інтенсивність променя так, щоб рівень експонування резисту поза елементами, що повинні бути експоновані, не перевищував заданого порогового значення).
- Необхідний рівень експозиції елементів (програма буде коректувати інтенсивність променя так, щоб рівень експонування усіх елементів був не нижче заданого порогового значення).

- Адаптивна корекція (у програмі передбачено знаходження компромісу між двома попередніми критеріями, збільшенням інтенсивності променя при експонуванні малих окремо розташованих елементів і зменшенні цієї інтенсивності при експонуванні великих або близько розташованих елементів).

При виконанні корекції програма застосовує метод простої ітерації, послідовно змінюючи інтенсивності променя у точках його траєкторії для якнайточнішого наближення результатів до заданих критеріїв.

Висновки

Розроблена програма може з певними обмеженнями використовуватись для моделювання процесу експонування резисту в електронно-променевої літографії та для перевірки методів корекції, які використовуються для поліпшення результатів експонування і отримання більш якісного зображення елементів на поверхні резисту.

У перспективі до програми будуть додані підтримка методів корекції, що модифікують геометрію елементів, а також підтримка довільних траєкторій променя при експонуванні.

Література

1. *Tseng, A.A.; Kuan Chen; Chen, C.D.; Ma, K.J.* Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development. – IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Volume 26, Issue 2, April 2003. – P. 791-799.
2. *Chang T. H. P.* Proximity effect in electron-beam lithography. – J. Vac. Sci. Technol, 1975. – Issue 1271. – P. 208-219.
3. *Rau Richard, James H. McClellan, Timothy J. Drabik.* Proximity effect correction for nanolithography, 1996. – P. 71.