

*ПЕТРЕНКО А.И.,
МОЛЯВКО А.С.*

ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСПОНИРОВАНИЯ РЕЗИСТА В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ

Описана программа, позволяющая моделировать процесс экспонирования резиста в электронно-лучевой литографии и использующая в качестве входных данных геометрическое описание маски и параметры электронно-лучевой системы. Приведен пример результатов моделирования и описаны возможности программы.

A program used to simulate resist exposure process in electron-beam lithography is described. As input data the program uses layout geometry and parameters of electron-beam system. An example of simulation results is given, and capabilities and limitations of simulation program are described.

Вступление

Непрерывное уменьшение геометрических размеров элементов интегральных схем делает все более сложным формирование этих элементов путем экспонирования резистов электромагнитным излучением (ультрафиолетовым светом с различными длинами волн). Хотя возникающие при этом сложности могут быть преодолены с помощью специальных методов экспонирования (иммерсионная литография, двойное экспонирование со сдвигом и другие), ведутся интенсивные исследования альтернативных технологий литографии, более подходящих для экспонирования структур нанометровых размеров – с использованием рентгеновского излучения (рентгеновская литография), электронных потоков (электронно-лучевая литография) [1] или пучков ионов (ионно-лучевая литография). Эти технологии к данному моменту носят экспериментальный характер и используются только в исследовательских целях или для изготовления уникальных объектов. Процессы экспонирования резиста в этих технологиях литографии относительно слабо изучены.

Постановка задачи

Электронно-лучевая литография в качестве заменителя традиционной оптической имеет как ряд преимуществ (отсутствие масок, высокая разрешающая способность), так и недостатки («последовательный» характер экспонирования резиста и вызванная этим малая производительность, а также специфические эффекты, обусловленные рассеиванием электронов в резисте). Поскольку оборудование для электронно-лучевой лито-

графии дорогостоящее и малодоступное, возникла необходимость в программе, которая позволила бы моделировать процесс экспонирования резиста с учетом основных эффектов, оказывающих влияние на получаемое «изображение».

Описание программы

Для исследования этих эффектов и их влияния на процесс экспонирования была создана программа, позволяющая проводить моделирование для элементов произвольной геометрической формы при различных параметрах электронно-лучевых систем. Входными данными для программы служат параметры электронно-лучевой системы (диаметр электронного луча, его интенсивность, шаг линий раstra и параметры распределения интенсивности электронного потока в луче) и тестовая геометрия, экспонирование которой моделируется. При этом подразумевается, что все элементы геометрии, которые необходимо экспонировать, должны получать одинаковые удельные дозы экспозиции в пересчете на единицу их площади. На данный момент программа поддерживает только моделирование экспозиции в режиме с последовательным движением луча по параллельным линиям раstra с постоянным шагом между линиями, хотя для реализации поддержки движения луча по произвольной траектории достаточно ввести возможность описания этой траектории в файлы с заданиями на моделирование. Для вычисления уровня экспонирования используется модификация модели, предложенной в 1975 году Чангом, представляющей рассеивание электронов в резисте с помощью свертки распре-

деления доз с функцией близости. Функция близости описывает распределение полученной дозы на заданной глубине под поверхностью резиста для точечного электронного луча. В работе Чанга [2] функция близости является суммой двух гауссовых функций:

$$f_r(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left(\frac{1}{\alpha^2} e^{-\frac{r^2}{\alpha^2}} + \frac{\eta}{\beta^2} e^{-\frac{r^2}{\beta^2}} \right) \quad (1)$$

В формуле (1) α отвечает за прямое рассеивание электронов луча, а коэффициент β – за обратное рассеивание при взаимодействии луча с подложкой. Коэффициент η определяет соотношение α и β .

В работе [6] описаны результаты моделирования движения электронов в резисте по методу Монте-Карло. У этой работе показано, что значение параметра α из формулы (1), отвечающего за прямое рассеивание электронов, возрастает с увеличением толщины слоя резиста и падает с увеличением ускоряющего напряжения в электронно-лучевой системе. Значение параметра β , отвечающего за обратное рассеивание, увеличивается с увеличением ускоряющего напряжения и мало зависит от толщины слоя резиста. На величину параметра η в основном влияет толщина подложки.

Формула (1) дает приемлемые с точки зрения точности результаты вплоть до размеров элементов в единицы микрон. Однако, как показано в работе Рау, МакКлеллана и Драбика [3], для размеров элементов порядка сотен и десятков нанометров такое описание распределения электронов уже становится недостаточно точным. Авторы [3] предлагают ввести в формулу (1) дополнительные нормальные распределения, чтобы учесть дополнительные эффекты, влияющие на распределение электронов – при этом формула приобретет такой вид:

$$F(x, y) = \frac{1}{\pi \sum_{i=1}^n \eta_i} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{\sigma_i^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma_i^2}} \right) \quad (2)$$

При этом общая сумма распределений

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) dx dy = 1 \quad (3)$$

Рассматриваемая в данной статье программа моделирования использует при моделировании распределения электронов в луче вариант формулы (2), в котором максимальное значение n равно 10.

Поверхность резиста в программе считается плоской и моделируется в виде прямоугольной сетки с постоянным шагом по двум координатам. Для узлов этой сетки и рассчитываются полученные дозы экспозиции.

Программа не учитывает ряд сложных для моделирования эффектов, например, возможных неровностей на поверхности резиста, падения луча на эту поверхность под непрямым углом, а также возможности накопления в резисте остаточного заряда, который сделает уровень экспонирования нелинейно зависящим от полученного заряда.

Моделирование процесса экспонирования проводится в несколько этапов. На первом этапе соответственно параметрам электронно-лучевой системы рассчитывается траектория, по которой будет двигаться луч по поверхности резиста. На втором этапе по рассчитанной траектории выбирается последовательность точек, которые луч будет проходить через равные промежутки времени. На третьем этапе вычисляются уровни экспонирования точек на поверхности резиста. Эти уровни равны сумме вкладов в экспозицию от каждой из точек, выбранных на втором этапе. Программа позволяет сохранять полученные результаты моделирования в файлах, а также визуализировать их в виде плоских изображений, в которых относительные уровни экспонирования изображаются в виде цветовых градиентов.

Пример результатов моделирования

На рис. 1 показан пример исходной геометрии, экспонирование которой моделируется в программе.

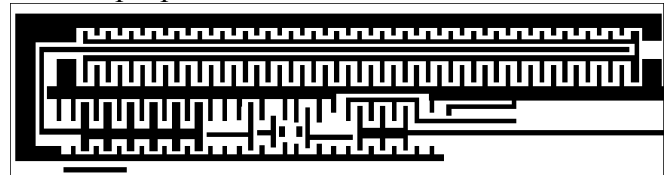


Рис. 1. Пример исходной геометрии

На рис. 2 ниже показан пример результатов моделирования. Заметно уменьшение ширины тонких линий и элементов малых размеров, далеко отстоящих от других элементов.

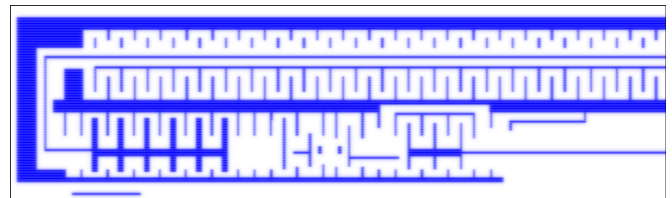


Рис. 2. Экспонирование без коррекции

Для случаев, когда заданные параметры электронно-лучевой системы не позволяют провести экспонирование заданной геометрии с приемлемым качеством (обычно вследствие недостаточной разрешающей способности), на результатах моделирования становятся видны дефекты (разрывы тонких линий, исчезновение или слияние мелких элементов геометрии).

Программа позволяет моделировать коррекцию уровней экспонирования путем управления интенсивностью луча в равномерно размещенных на его траектории точках. Целью коррекции является как можно более точное воспроизведение заданной геометрии и устранение возможных дефектов (невоспроизведение мелких элементов или слияние близко расположенных элементов).

На рис. 3 показан результат работы алгоритма коррекции процесса экспонирования за счет управления интенсивностью электронного луча – тонкие линии менее размыты, геометрические размеры мелких элементов соблюдены точнее, однако узкие промежутки между элементами становятся размытыми, что чревато возникновением перемычек между близко расположенными элементами геометрии.

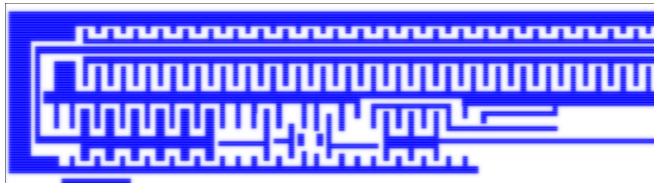


Рис. 3. Результат работы алгоритма коррекции

При коррекции путем управления интенсивностью луча эта интенсивность уменьшается при экспонировании больших отдельно отстоящих элементов, а при экспонировании мелких или близко расположенных элементов – уменьшается. Поскольку достичь идеально точного воспроизведения геометрии элементов невозможно, перед выполнением коррекции задаются критерии, по которым эта коррекция выполняется. Программа по-

зволяет выполнять коррекцию по следующим критериям:

- максимальный допустимый уровень экспонирования фона (результатирующий уровень экспонирования точек за пределами подлежащих экспонированию элементов геометрии не должен превышать заданного);
- минимальный допустимый уровень экспонирования элементов (уровень экспонирования точек в пределах элементов геометрии не должен быть меньше заданного).

Коррекция выполняется итеративно, и процесс коррекции останавливается, когда заданный критерий выполняется, или в случае, если две последовательные итерации не дают изменения результата, большего, чем заданная погрешность.

Альтернативой методу коррекции с помощью управления интенсивностью луча может выступать метод, основанный на модификации исходной геометрии, но его применение связано с рядом сложностей в случае, когда размеры элементов геометрии приближаются к пределу разрешающей способности электронно-лучевой системы, используемой для экспонирования этой геометрии. Поэтому в описываемой программе методы коррекции путем изменения геометрии на данный момент не реализованы.

Выводы

Созданная программа может с определенными ограничениями использоваться для моделирования процесса экспонирования резиста в электронно-лучевой литографии, а также для проверки работы методов коррекции, используемых для улучшения качества изображения элементов топологии на поверхности резиста.

В перспективе в программу будут добавлены поддержка методов коррекции с изменением геометрии элементов топологии, а также поддержка произвольных траекторий луча при экспонировании.

Список литературы

1. Tseng, A.A. Electron beam lithography in nanoscale fabrication: recent development / Tseng A.A., Kuan Chen, Chen C.D., Ma K.J. // IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. - 2003, April. - Vol. 26, Issue 2. – P. 791-799.
2. Chang T. H. P. Proximity effect in electron-beam lithography / Chang T. H. P. // J. Vac. Sci. Technol. – 1975. – Issue 1271. – P. 208-219.

3. Rau Richard. Proximity effect correction for nanolithography / Rau Richard, James H. McClellan, Timothy J. Drabik. – 1996. – 71 p.
4. P. Rai-Chodhury. / Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication / P. Rai-Chodhury. – 2006. – 802 p.
5. J.A.Liddle. Resist requirements and Limitations for Nanoscale Electron-Beam Patterning / J.A.Liddle et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proceedings. – № 739 (19). – P. 19-30.
6. Parikh M. Calculation of changes in pattern dimensions to compensate for proximity effects in electron lithography / Parikh M. // J. Appl. Phys. – 1980. – № 51. – P. 705.

Поступила в редакцію 11.12.2009