

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

© 2012 г. Т. В. Иванова*, канд. техн. наук; Л. В. Зуева**

* Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** ЗАО ОКБ “Карат”, Санкт-Петербург

E-mail: itv-aco@yandex.ru

В рамках модели Аббе при моделировании формирования фотолитографического изображения рассмотрены два способа дискретизации источника: по прямоугольной сетке с различным шагом дискретизации и при радиальном расположении точек на прямоугольной сетке с различным шагом по радиусу и по длине дуги между точками. Показано, что использование радиального распределения точек значительно ускоряет процесс вычисления, при этом точность моделирования определяется в основном шагом по радиусу.

Ключевые слова: фотолитография, модель Аббе, дискретизация источника.

Коды OCIS: 110.1758, 110.2990, 110.1650, 110.3960, 110.5220.

Поступила в редакцию 16.11.2011.

Введение

Фотолитография – основной этап производства микросхем, которые являются важным элементом большинства современных приборов. Компьютерное моделирование процессов фотолитографии имеет большое значение для оптимального выбора режимов освещения [1–3], поиска наилучших топографий фазосдвигающих масок, оптимизации других характеристик. Для моделирования формирования изображения от источников сложной формы часто используется модель Аббе [4], называемая методом интегрирования по источнику.

При таком подходе источник моделируется как совокупность точек, каждая из которых создает полностью когерентное освещение предмета, а оптическая система – соответствующее ему изображение. Распределение интенсивности изображения вычисляется суммированием по интенсивности когерентных изображений, полученных от каждой точки источника.

Очевидно, что чем меньше точек на источнике, тем выше скорость вычисления, но при этом точность моделирования будет умень-

шаться. Оптимальное соотношение между скоростью вычисления и точностью результата можно достигнуть, уменьшив число точек на источнике за счет радиального расположения точек или “прореживания” точек по прямоугольной сетке. В данной работе проводится исследование влияния способа дискретизации источника на скорость и точность вычислений итогового распределения интенсивности.

Прореживание источника

Для моделирования частично когерентного освещения предметов и формирования изображения используется метод интегрирования по источнику, основанный на понятии “эффективного” источника, которое ввел Гопкинс [5]. “Эффективный” источник представляет собой совокупность точек, каждая из которых создает полностью когерентное освещение предмета. При этом когерентные волны от каждой точки источника считаются взаимно некогерентными, а итоговая интенсивность частично когерентного изображения находится как суперпозиция отдельных когерентных изображений, полученных от каждой точки источника.

Вычислительная эффективность метода интегрирования по источнику во многом зависит от решения проблемы выбора количества и расположения точек на источнике. Простым и эффективным решением этой проблемы является использование при дискретизации функции распределения яркости по источнику в виде прямоугольной сетки с шагами, равными шагу дискретизации зрачковой функции.

Очевидно, что недостаточное количество точек равномерной прямоугольной сетки плохо описывает круглую форму источника, что влияет на результаты вычислений. При уменьшении шага дискретизации расположение точек в выборке становится более близким к форме источника, но при этом число точек возрастает, что приводит к увеличению объема вычислений. Оптимальное соотношение между скоростью вычисления и точностью результата можно достичь, уменьшив число точек на источнике за счет радиального расположения точек или “прореживания” точек по прямоугольной сетке. В этом случае “эффективный источник” будет представлять собой точки, распределенные с определенным шагом в полярной или декартовой системе координат. Данная модель формирования изображения очень чувствительна не только к количеству, но и к положению точек, поэтому радиальное распределение – наиболее подходящее для прореживания, поскольку позволяет добиться более равномерного распределения точек по источнику.

Для моделирования радиального распределения точек на источнике используются полярные координаты, которые позволяют связать шаг по радиусу “эффективного” источника с координатами ячеек прямоугольной выборки

$$\begin{aligned} x &= (i\Delta R) \cdot \cos(j\Delta\varphi) \\ y &= (i\Delta R) \cdot \sin(j\Delta\varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

где ΔR – шаг по радиусу, $\Delta\varphi$ – угол между точками (шаг по углу), i – индекс радиуса, j – индекс угла. При этом угол между точками определяется исходя из сохранения одинаковой длины дуги между двумя точками при любой радиальной координате (рис. 1):

$$\Delta\varphi = \frac{360i\Delta R}{\Delta l n}, \quad (2)$$

где n – число точек на первой окружности, ΔR – шаг по радиусу, Δl – длина дуги между двумя точками, i – индекс радиуса. В итоге на прямоугольной выборке точки после про-

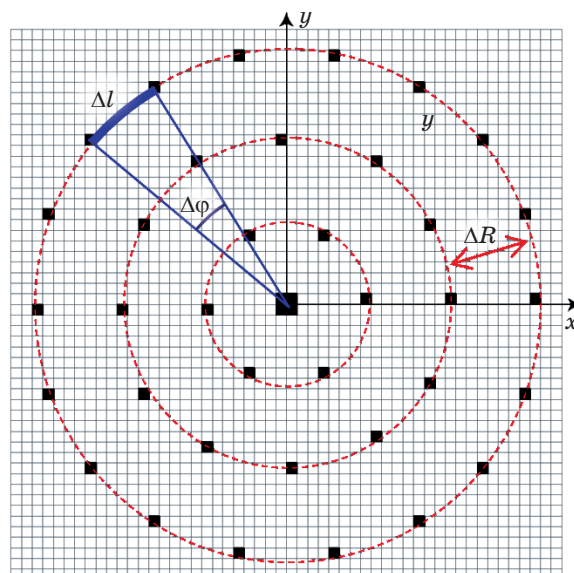


Рис. 1. Прореживание источника при радиальном распределении точек.

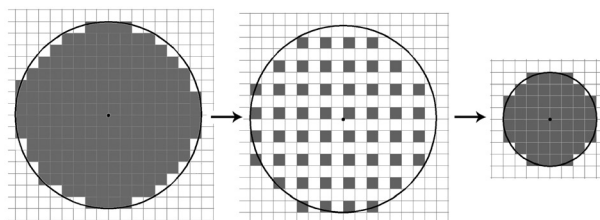


Рис. 2. Прореживание источника при декартовом распределении точек.

реживания будут располагаться так, как показано на рис. 1. При декартовом распределении точек шаг по осям x и y обычно одинаковый. Чтобы сократить число точек, можно шаг дискретизации по источнику сделать равным шагу прореживания, в этом случае вся площадь “эффективного” источника будет заполнена только “активными” точками. Результат подобного преобразования представлен на рис. 2.

Анализ результатов

В работе исследовали круглый источник, кольцевой источник и квадруполь. В качестве предмета использовалась периодическая решетка. Моделирование проводили на персональном компьютере с оперативной памятью

1,0 гигабайт и процессором AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+, работающем на частоте 1,81 гигагерц.

Параметры моделирования: размер маски 2×2 мкм, период решетки 0,2 мкм, шаг по маске 0,00195 мкм, шаг по источнику 0,00781 σ , передняя апертура оптической системы 0,65, длина волны 0,193 мкм, размер выборки 1024×1024 .

Для характеристики когерентных свойств освещения круглого источника в фотолитографии часто используется коэффициент когерентности σ . При критическом освещении коэффициент когерентности определяется соотношением числовых апертур конденсора и изображающей системы, а в схеме освещения по Келеру коэффициент когерентности определяется соотношением размеров изображения источника и зрачка.

Для количественного сравнения результатов моделирования использовалось среднее квадратичное отклонение между распределением интенсивности на изображении при непрореженном и при прореженном источнике. Среднее квадратичное отклонение выражается в процентах от максимального значения интенсивности в эталонной выборке.

Исследовалась зависимость точности моделирования от шага прореживания по координатным осям при декартовом распределении точек и от шага по радиусу, а так же от расстояния между точками при радиальном распределении. Допустимой точностью моделиро-

вания считается погрешность менее 2%, при погрешности в 0,5% точность моделирования можно считать приемлемой.

Моделирование проводилось в канонических координатах [5], т. е. в координатах, приведенных к входной апертуре оптической системы, а шаг по источнику выражался в канонических единицах (к.е.). На рис. 3 представлено влияние шага по радиусу на точность моделирования при радиальном распределении точек в табличном и графическом виде.

При шагах 0,4 к.е. и 0,8 к.е. для круглого источника с коэффициентом когерентности $\sigma = 0,8$ среднее квадратичное отклонение превышает установленную границу в 2%, что говорит о значительной разнице между эталонной выборкой распределения интенсивности на изображении и полученными при прореживании с указанными параметрами.

Для шага 0,0125 к.е. для всех трех источников распределение интенсивности при освещении прореженным источником практически совпадает с тем распределением, которое получаем при освещении непрореженным источником. При этом время, затраченное на расчет, заметно отличается в связи с тем, что число точек на прореженном источнике значительно меньше (сводные результаты по времени вычислений для различных видов дискретизации приводятся на рис. 6).

На рис. 4 представлено влияние длины дуги между точками при радиальном распределении точек на точность моделирования. Из ри-

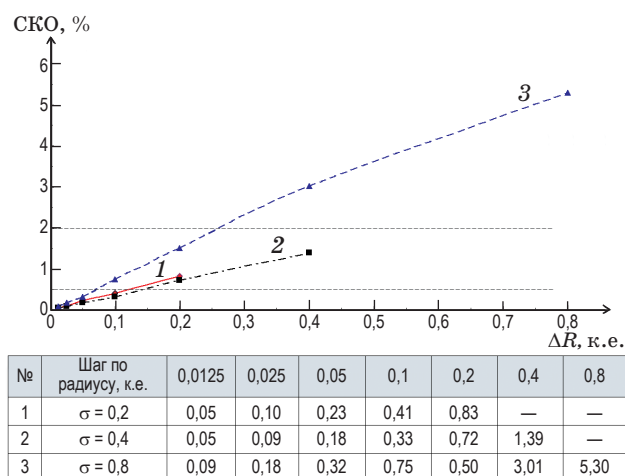


Рис. 3. Относительное среднее квадратичное отклонение (%) в зависимости от шага по радиусу при радиальном прореживании для круглых источников. Длина дуги между точками постоянна (0,062 к.е.).

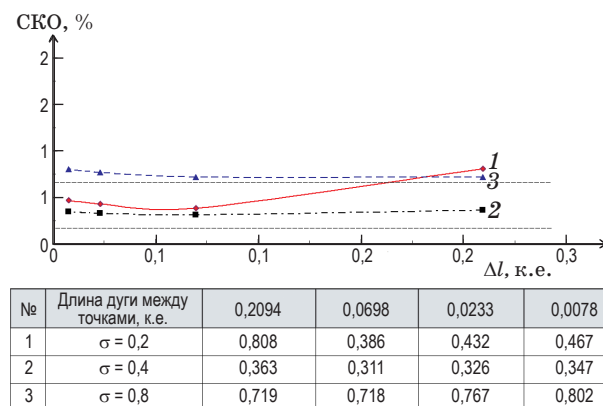


Рис. 4. Относительное среднее квадратичное отклонение (%) в зависимости от длины дуги между точками при радиальном прореживании для круглых источников. Шаг по радиусу 0,0125 к.е.

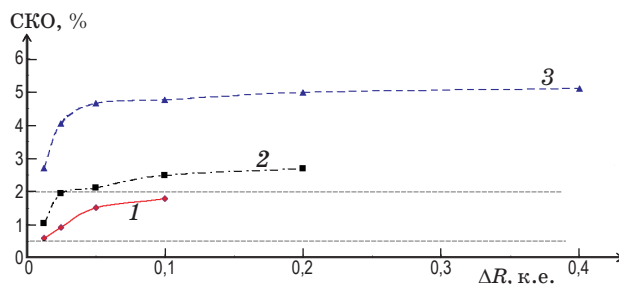
сунка видно, что при достаточно большом расстоянии между точками среднее квадратичное отклонение возрастает. Это связано с тем, что при заданном шаге активных точек на источнике недостаточно для описания формы, особенно для источника с $\sigma = 0,2$. Для источника с $\sigma = 0,8$ точек для описания формы достаточно, несмотря на большое расстояние между ними, поэтому изменение в точности незначительно. При сокращении расстояния между точками среднее квадратичное отклонение сначала приходит в минимум, обусловленный тем, что влияние точек, расположенных на периферии и в центре источника, уравнивается, а затем вновь начинает расти, так как расположение точек снова становится неравномерным. Тем не менее, все значения лежат в зоне “допустимой” точности, то есть не превышают 2%.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что длина дуги между точками при радиальном распределении значительно влияет на изображение только в том случае, когда шаг по радиусу источника достаточно велик по сравнению с радиусом самого источника, в остальных случаях точность определяется шагом по радиусу.

На рис. 5 представлено влияние шага дискретизации при декартовом распределении точек, при этом шаги по осям x и y одинаковые. Из рисунка следует, что даже при незначительном увеличении шага дискретизации относительно его первоначального значения среднее квадратичное отклонение для всех источников возрастает очень быстро. При этом для источника с $\sigma = 0,8$ точность не попадает даже в область допустимых значений (2%).

Для того чтобы получить значения среднее квадратичного отклонения менее 0,5%, шаг при прореживании должен быть меньше 0,0125 к.е., но, учитывая, что первоначальный шаг дискретизации был равен 0,008 к.е., большего выигрыша во времени не будет, поэтому проводить подобное прореживание для источников с большим радиусом нецелесообразно.

Очевидно, что полученные результаты при декартовом распределении точек в несколько раз хуже тех, которые были получены при радиальном распределении. Для наглядности сопоставим приведенное в таблице количество точек на источниках и значение среднее квадратичного отклонения при том и другом прореживании для тех случаев, когда были получены наилучшие результаты из серии. Из таб-



№	Шаг по радиусу, к.е.	0,0125	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4
1	$\sigma = 0,2$	0,60	0,92	1,50	1,79	—	—
2	$\sigma = 0,4$	1,04	1,95	2,12	2,48	2,68	—
3	$\sigma = 0,8$	2,71	4,05	4,66	4,76	4,98	5,10

Рис. 5. Относительное среднее квадратичное отклонение (%) в зависимости от шага дискретизации для круглых источников с декартовым распределением точек. Шаг дискретизации для “непрореженного” источника 0,008 к.е.

Сравнение радиального и декартова распределения активных точек

Источник	Радиальное распределение		Декартово распределение	
	количество точек	СКО, %	количество точек	СКО, %
$\sigma = 0,2$	412	0,0549	812	0,6029
$\sigma = 0,4$	1588	0,0480	3228	1,0436
$\sigma = 0,8$	6244	0,0884	12892	2,7085

лицы следует, что, несмотря на то, что число активных точек на источнике при декартовом прореживании больше, точность моделирования при этом в несколько раз хуже, чем при радиальном распределении. Таким образом, было численно подтверждено, что для круглого источника более равномерное распределение точек получается при радиальном распределении.

Кроме круглых источников в данной работе исследовали влияние различных параметров прореживания на результаты моделирования для внеосевых источников – кольца и квадруполя. По полученным результатам для внеосевых источников можно сказать, что для них, как и для круглого источника, применение радиального распределения точек позволяет значительно сократить время на расчет, сохранив при этом точность.

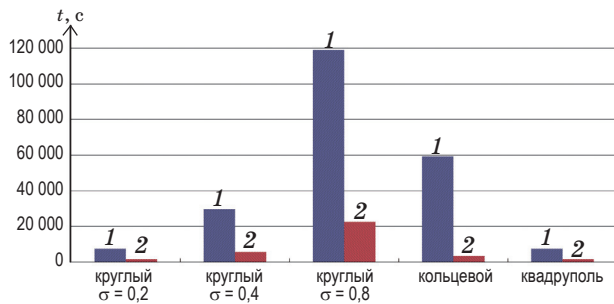


Рис. 6. Гистограмма, демонстрирующая соотношение времени вычисления без прореживания (1) и с радиальным прореживанием (2) для различных источников. Шаг по радиусу 0,0125 к.е., длина дуги между точками 0,026 к.е.

Итоговые результаты, отражающие преимущества в скорости радиального прореживания для всех исследуемых типов источников, приводятся на рис. 6. Гистограмма наглядно демонстрирует разницу времени, которое затрачено на расчет для непрореженных и прореженных источников, с сохранением высокой точности моделирования (для всех источников среднеквадратичное отклонение находится в пределах 0,5%).

* * * * *

Выводы

Представленные результаты показывают, что:

1. Использование радиального распределения точек значительно ускоряет процесс вычисления, не ухудшая при этом точность.

2. Расстояние между точками при радиальном распределении влияет на точность только тогда, когда шаг по радиусу достаточно велик: $1/2-1/3$ радиуса источника.

3. При длине дуги между активными точками, не превышающей шаг дискретизации по источнику больше чем в 8 раз, влияние расстояния между точками становится незначительным.

4. Точность моделирования в основном определяется шагом по радиусу, значение которого должно быть примерно в 1,5–6 раз больше шага дискретизации для среднеквадратичного отклонения $\leq 0,5\%$.

5. Декартово распределение использовать нецелесообразно, поскольку значения среднеквадратичного отклонения при среднем шаге превышают допустимую границу в 2%, а при малом шаге незначителен выигрыш во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heil T., Graupner P., Garreis R., Egger R., Brotsack M., Finders J., Hansen S. Predictive modeling of advanced illumination pupils used as imaging enhancement for low- k_1 applications // Proc. SPIE. 2004. V. 5377. P. 344–356.
2. Flagello D.G., Geh B., Socha R., Liu P., Cao Y., Stas R., Natt O., Zimmermann J. Understanding illumination effects for control of optical proximity effects (OPE) // Proc. SPIE. V. 6924. P. 69241U-1–69241U-15.
3. Zimmermann J., Gräupner P., Neumann J.T., Hellweg D., Jürgens D., Michael Patra, Hennerkes C., Maul M., Geh B., Engelen A., Noordman O., Mulder M., Park S. and Vocht J.D. Generation of arbitrary freeform source shapes using advanced illumination systems in high-NA immersion scanners // Proc. SPIE. 2010. V. 7640. P. 764005–764020.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
5. Hopkins H.H. Image formation with coherent and partially coherent light // Photographic Science and Engineering. 1977. V. 21. № 3.