

СТАБИЛЬНОСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ МАСОК В ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ

Г.В. Белокопытов, Ю.В. Рыжикова

Физический факультет Московского Государственного университета им.
М.В.Ломоносова, (495)939-32-61, gvb@phys.msu.ru, ryzhikovaju@rambler.ru

Методом численного моделирования проведено исследование стабильности оптических изображений фазовых и фазово-растровых масок, составленных из прямоугольных областей с разными фазами в зависимости от величины числовой апертуры и параметра когерентности. Приведены аналитические соотношения для оценки сдвига центров квадратных отверстий фазово-растровой маски.

Введение

Численное моделирование формирования оптических изображений в фотолитографии является актуальной задачей современной микроэлектроники [1-2]. В настоящее время наблюдается значительное увеличение степени интеграции и быстродействия интегральных схем, что достигается за счет повышения плотности расположения элементов на чипе, уменьшения критических размеров и перехода с этой целью к более коротким длинам волн источников света. Повышение числа элементов само по себе ведет к росту сложности маски. При этом необходима коррекция дифракционных искажений вносимых в оптическое изображение, возникающих вследствие эффекта оптической близости и конфликта фаз [1]. Одним из эффективных способов борьбы с возникающими трудностями является применение фазовых масок, в частности трехфазных, полностью снимающих проблему конфликта фаз, неизбежно возникающую при передаче оптических изображений трех близко расположенных элементов.

В настоящей работе проводится исследование стабильности (или устойчивости) изображений фазовых и фазово-растровых масок [3], составленных из близко расположенных прямоугольных областей с помощью ранее разработанных нами алгоритмов и программ численного моделирования формирования оптических изображений двумерных объектов-масок, пригодных в условиях частично когерентного освещения по методике изложенной в [4]. Использование прямоугольников позволяет промоделировать практически любую маску. В докладе приведены примеры полученных изображений масок, а также оценки стабильности изображений при разных параметрах оптической системы.

Исследуемые трехфазные маски

В данной работе необходимое чередование фаз на маске осуществлялось, так, что на рабочей длине волны λ фазовый сдвиг составляет для света, проходящего через области первого типа, фиксированную величину φ , а для света, проходящего через области второго и третьего типа, величину $\varphi \pm 2\pi/3$ соответственно. Подобный подход к выбору фаз был предложен для создания цифровых голограмм [5-6].

В качестве альтернативной маски для решения проблемы конфликта фаз можно использовать фазово-растровую маску (ФРМ) [3]. Она представляет собой регулярную структуру, состоящую из прозрачных областей (из плавленого кварца), оптическая толщина которых различается на $1/3$ длины волны и непрозрачный слой (металлическое покрытие, как правило, из хрома), покрывающий указанную структуру, на котором располагается система малых идентичных отверстий, имеющих контролируемый линейный сдвиг (ξ_{mn}, η_{mn}) относительно узлов (точек отсчетов)

(x_m^o, y_n^o) . Такие маски позволяют получить любое физически допустимое распределение эффективного коэффициента пропускания от координат. На рис.1 приведены объекты исследования.

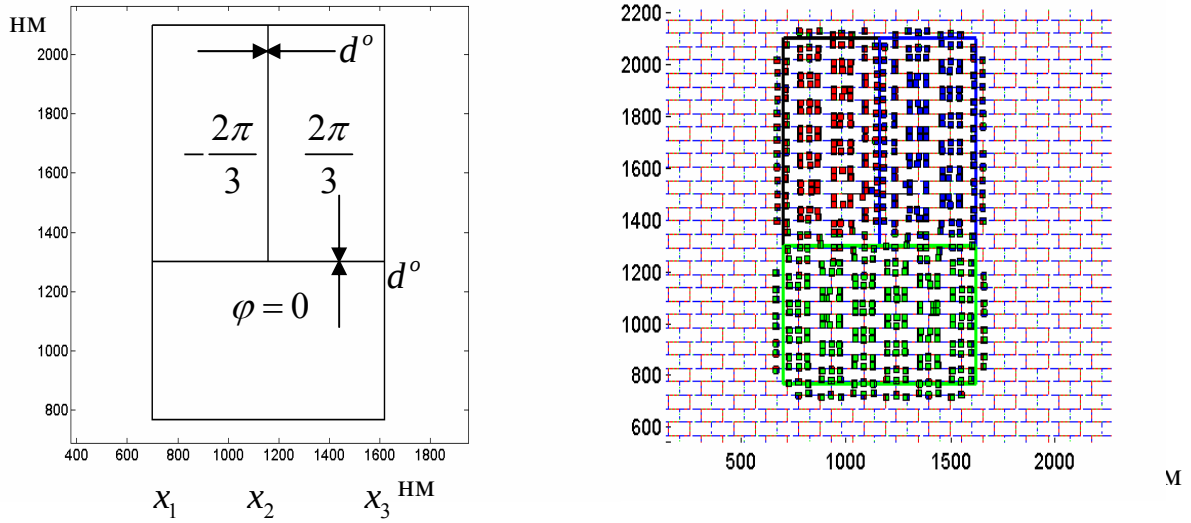


Рис.1. Фазовая (слева) и фазово-растровая (справа) маски.

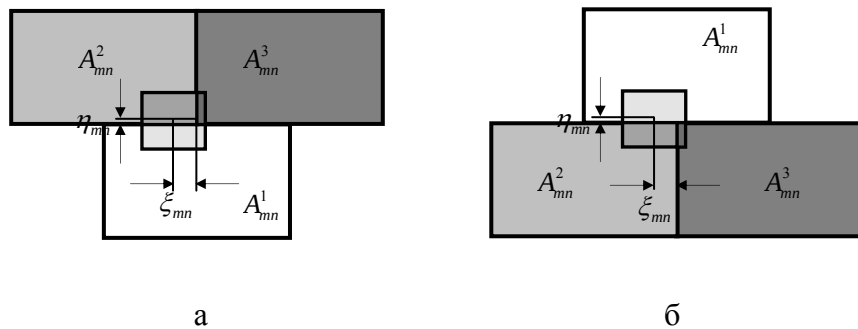
Заданная система идентичных отверстий на ФРМ является прообразом геометрии освещённых областей, которые необходимо получить на фоторезисте. Если три площадки с разными фазами A_{mn}^φ в совокупности составляют одно отверстие квадратной формы, то значение коэффициента пропускания ФРМ в данном узле mn равно [7]:

$$F(x_m^o, y_n^o) = \frac{A_{mn}^1 + A_{mn}^2 \cdot e^{i2\frac{\pi}{3}} + A_{mn}^3 \cdot e^{-i2\frac{\pi}{3}}}{A_{mn}^1 + A_{mn}^2 + A_{mn}^3} \cdot r, \quad (1)$$

где $r = \sum_{\varphi=1}^3 A_{mn}^\varphi / (\Delta_x \Delta_y)$, Δ_x и Δ_y – шаг дискретизации по оси x и y соответственно.

Изменяя величины площадей A_{mn}^1 , A_{mn}^2 и A_{mn}^3 в (1), можно получить любое заданное комплексное значение $F(x_m^o, y_n^o)$, удовлетворяющее условию: $|F(x_m^o, y_n^o)| \leq r/2$.

Для отверстий квадратной формы получаются наиболее простые формулы для оценки величин смещения их центров (ξ_{mn}, η_{mn}) . Приведем формулы для (ξ_{mn}, η_{mn}) таких отверстий, изображенных на рис.2. Рассмотрим смещенное отверстие на рис.2а.



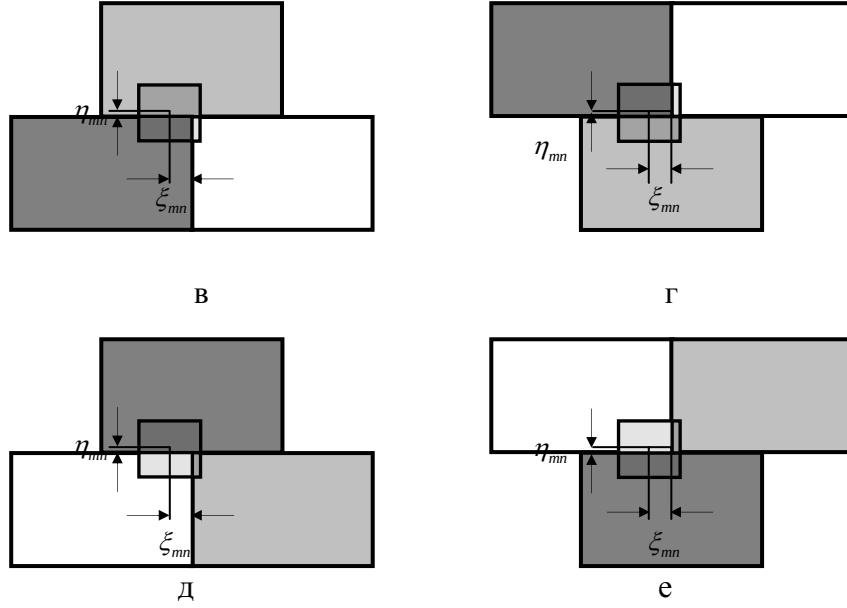


Рис.2. Различные расположения центров отверстий, смещенных относительно границ фазово-растровой структуры на (ξ_{mn}, η_{mn}) .

Из (1) можно получить выражения для $\text{Re } F(x_m^o, y_n^o)$ и $\text{Im } F(x_m^o, y_n^o)$:

$$\begin{cases} \text{Re } F_{mn} = \left(A_{mn}^1 - \frac{1}{2}(A_{mn}^2 + A_{mn}^3) \right) / (\Delta_x \Delta_y) \\ \text{Im } F_{mn} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}(A_{mn}^2 - A_{mn}^3) \right) / (\Delta_x \Delta_y) \end{cases} \quad (2)$$

Площади A_{mn}^1 , A_{mn}^2 и A_{mn}^3 отверстия (рис.2а) размером $a \times a$ удовлетворяют системе:

$$\begin{cases} A_{mn}^1 = a \left(\frac{a}{2} - \eta_{mn} \right) \\ A_{mn}^2 = \left(\frac{a}{2} - \xi_{mn} \right) \left(\frac{a}{2} + \eta_{mn} \right) \\ A_{mn}^3 = \left(\frac{a}{2} + \xi_{mn} \right) \left(\frac{a}{2} + \eta_{mn} \right) \end{cases} \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) выразим величины смещений (ξ_{mn}, η_{mn}) отверстия:

$$\begin{cases} \xi_{mn} = - \frac{\Delta_x \Delta_y \text{Im } F_{mn}}{\sqrt{3} \left(\frac{a}{2} \pm \eta_{mn} \right)} \\ \eta_{mn} = \pm \frac{2}{3} \left(\frac{a}{4} - \frac{\Delta_x \Delta_y \text{Re } F_{mn}}{a} \right) \end{cases} \quad (4)$$

Верхний знак в (4) соответствует рис.2а, а нижний рис.2б, полученному при зеркальном отображении фазовых областей, изображенных на рис.2а и их последующем повороте на 180° .

Аналогично, можно получить соотношения для смещений центров (ξ_{mn}, η_{mn}) отверстий, изображенных на рис.2в-е:

$$\left[\begin{array}{l} \xi_{mn} = \frac{a_1}{(a \mp 2\eta_{mn})} \\ \eta_{mn} = \pm \left(\frac{\Delta_x \Delta_y (\text{Im } F_{mn} / \sqrt{3} - \text{Re } F_{mn} / 3) - a^2 / 6}{a} \right) \end{array} \right] \quad (5)$$

где $a_1 = \Delta_x \Delta_y (\text{Re } F_{mn} + (\text{Im } F_{mn}) / \sqrt{3})$, верхний знак в (5) соответствует рис.2в, а нижний рис. 2г;

$$\left[\begin{array}{l} \xi_{mn} = -\frac{a_2}{(a \mp 2\eta_{mn})} \\ \eta_{mn} = \mp \left(\frac{\Delta_x \Delta_y (\text{Re } F_{mn} / 3 + \text{Im } F_{mn} / \sqrt{3}) + a^2 / 6}{a} \right) \end{array} \right] \quad (6)$$

где $a_2 = \Delta_x \Delta_y (\text{Re } F_{mn} - (\text{Im } F_{mn}) / \sqrt{3})$, верхний знак в (6) соответствует рис.2д, а нижний рис.2е.

В частном случае отверстия могут находиться в одной из областей (A_{mn}^1 , A_{mn}^2 , A_{mn}^3) или на стыке двух областей с разной оптической толщиной. Тогда приведенные соотношения (4)-(6), существенно упрощаются. Формулы (4)-(6) позволяют реализовать простой алгоритм для построения квадратных отверстий, центры которых могут смещаться на фиксированные величины (ξ_{mn}, η_{mn}) относительно границ с разными оптическими толщинами фазово-растровой маски.

Результаты численного моделирования

В данной работе исследовалась стабильность оптических изображений трехфазных прямоугольных масок (рис.1) по методу [4]. В качестве примера на рис.3 приведены полученные изображения масок, соответствующие нулевому расстоянию между прямоугольными областями, заданными в области маски.

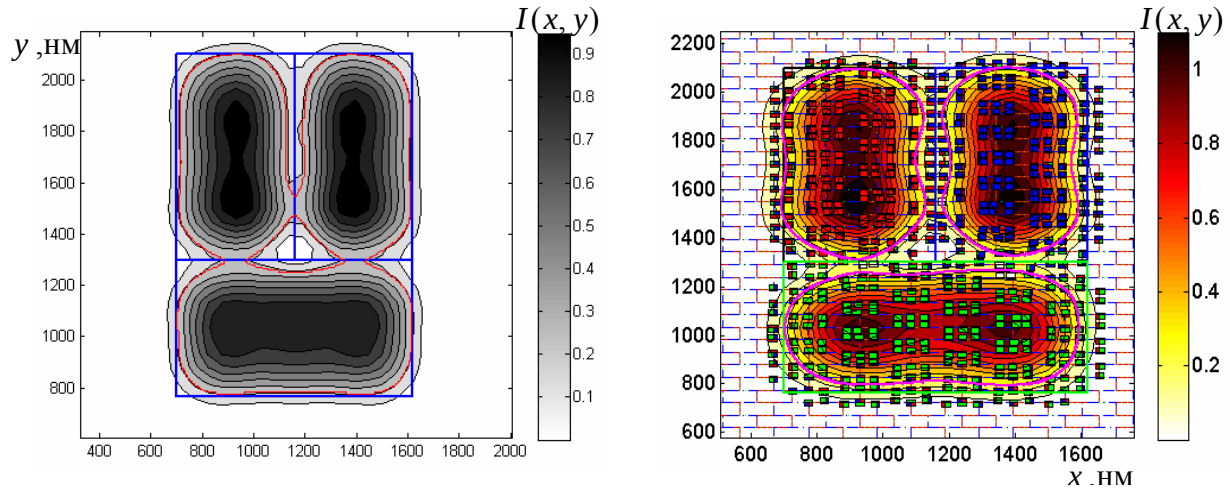


Рис.3. Изображения фазовой (слева) и фазово-растровой (справа) масок.

Расчет был выполнен для круглого источника освещения с длиной волны $\lambda = 248$ нм при числовой апертуре проекционного объектива $NA = 0.6$ и параметре когерентности $\sigma = 0.5$. Изображение фазово-растровой маски было подвергнуто дополнительной коррекции.

При численном моделировании прямоугольные области сдвигались относительно координатных осей x и y на расстояние d^o от 0 до 90 нм. В таблице 1 приведены оценки критических размеров изображения d^i в разных сечениях исследуемых масок с учетом критерия удовлетворительного воспроизведения (стабильности) оптических изображений [4]. Так d^i , $d_{x_1^o}^i$, $d_{x_2^o}^i$ – соответствуют минимальным размерам изображения, полученным при фиксированных значениях $y = 1700$ нм, $x_1^o = (x_1 + x_2)/2$, $x_2^o = (x_2 + x_3)/2$ (рис.1) соответственно.

Отметим, что точность воспроизведения, а соответственно и минимально реализуемый размер деталей на полупроводниковой пластине (критический размер) определяется, прежде всего, длиной волны источника освещения λ , качеством проекционной оптической системы (его характеризуют числовая апертура NA и величины аберраций). Поэтому размеры, приведенные в таблице 1, носят ориентировочный характер и могут быть уменьшены при соответствующем подборе параметров источника света и проекционной оптической системы.

Таблица 1. Значения критических размеров в области изображения d^i при длине волны источника освещения $\lambda = 248$ нм.

Тип маски	d^i , нм	$d_{x_1^o}^i$, нм	$d_{x_2^o}^i$, нм
Фазовая	100	106	105
Фазово-растровая	110	116	125
Фазово-растровая с коррекцией	108	115	117

Полученные результаты показали, что оптические изображения ФРМ, полученные при любых фиксированных значениях x является более устойчивым к возможным в процессе литографии отклонением во время экспонирования. Скорректированная фазово-растровая маска дает наиболее устойчивое (стабильное) изображения при всех значениях x и y . Рассмотренные трехфазные маски позволяют решить проблему конфликта фаз и достигнуть приемлемого пространственного разрешения оптического изображения (размеры меньше λ).

Литература

1. Abe T., Yashima J., Shibata H., Kato Ya., Matsumoto H., Iijima T. High-accuracy correction of critical dimension errors taking sequence of large-scale integrated circuits fabrication processes into account.// J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2008. V. 7(4). 043008.
2. Domnenko V., Schmoeller T., Klimpel T. Analysis of EUVL mask effects under partially coherent illumination. // Proc. SPIE. 2009. V. 7271. 727141.
3. Aleshin S.V., Belokopitov G.V., Scepanovic R. Mask having an arbitrary complex transmission function. // US Patent No.: 6,197,456 B1. Cl. 430/5. Mar.6. 2001.
4. Белокопытов Г.В., Рыжикова Ю.В. Сравнение характеристик изображения в проекционной фотолитографии. // Известия РАН. Серия физическая, 2008, т. 72, №1, с. 88.
5. Burkhardt C.B. A simplification of Lee's method of generating holograms by computer // Appl. Opt. 1970. V.9. P.1949.
6. Chavel P, Hugonin J. P. High quality computer holograms: the problem of phase representation. // JOSA. 1976. V. 66. No.10. P. 989.
7. Белокопытов Г.В., Короткова Ю.В. Фазово-растровые маски и их синтез.// Вестник Моск. Ун-та. Серия 3. Физика. Астрон., 2007. №3. с. 44.