

УДК 538.971, 538.958

ЭФФЕКТЫ БЛИЗОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ЛИТОГРАФИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ*

Е. Е. Родякина^{1,2}, К. А. Конфедератова^{1,2}

¹*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*

²*Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
E-mail: rodyakina@isp.nsc.ru*

Рассмотрены эффекты близости при формировании фотонных кристаллов в виде упорядоченных массивов однородных по размеру отверстий радиусом 100 нм методами электронно-лучевой литографии. Экспериментально определены коэффициенты функции близости, характеризующей вклад обратнорассеянных и вторичных электронов в дозу экспонирования. Показано, что минимальное стандартное отклонение от среднего значения радиуса элементов в массиве достигается коррекцией эффекта близости с использованием коэффициентов, полученных экспериментально, и итерационного уравнения с увеличенным вкладом от обратнорассеянных электронов.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, электронно-лучевая литография, наноструктурирование.

DOI: 10.15372/AUT20160312

Введение. Упорядоченные наноструктуры с контролируемой пространственной плотностью и размерами представляют большой интерес для фундаментальных и прикладных исследований. Примером объекта, состоящего из наноструктур с критичной однородностью элементов в массиве по форме и размерам, является фотонный кристалл — материал, структура которого характеризуется периодической модуляцией диэлектрической проницаемости в пространственных направлениях [1]. Для создания фотонных кристаллов упорядоченные по форме и размеру наноструктуры с малыми периодами формируются с помощью электронно-лучевой литографии с последующим травлением через маску в резисте [2].

Взаимодействие электронов с образцом приводит к уширению области поглощения энергии от рассеянных электронов по сравнению с заданной зоной экспонирования. Следствием этого является эффект близости (ЭБ), влияющий на однородность отверстий по форме и размеру. Неоднородность размеров элементов в массиве влечёт нежелательное изменение электромагнитного спектра фотонных кристаллов [3, 4].

Наиболее точное решение данной проблемы — коррекция дозы экспонирования [5, 6], которая устанавливается с учётом влияния ЭБ так, чтобы при проявлении все структуры были одинакового размера. В электронно-лучевой литографии ЭБ в первом приближении

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-22-00143).

описывается функцией близости [7]

$$f(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) \right], \quad \int_0^{\infty} 2\pi f(r)rdr = 1. \quad (1)$$

Функция близости — это распределение энергии экспонирования, поглощённой в резисте на единицу площади, где первое слагаемое — вклад от первичных электронов, а второе — от отражённых электронов; коэффициенты α — размер первичного пучка с учётом рассеяния его в резисте при прямом прохождении, β — характерный размер области рассеяния электронов в материале подложки, η — коэффициент обратнорассеянных электронов. Доза, поглощённая резистом, является свёрткой функции близости с дозой экспонирования.

Цель данной работы — определение параметров функции близости для создания фотонных кристаллов, представляющих собой массивы однородных по размеру отверстий диаметром в несколько сотен нанометров, методом электронно-лучевой литографии на подложках кремния.

Эксперимент. Исследования формирования массивов отверстий в резисте проводились методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием электронно-лучевого литографа "Raith Pioneer" (Германия) в вакуумной камере ($P < 10^{-6}$ Торр). Диаметр остророфокусированного пучка электронов равен 2 нм. Тестовые образцы представляли собой подложки кремния с нанесённым методом центрифугирования позитивным резистом полиметилметакрилата (толщиной 160 нм). После экспонирования в электронном литографе с апертурой 15 мкм при ускоряющем напряжении 20 кВ и последующей проявки в растворе изопропилового спирта и метилэтилкетона в соотношении 3:1 образцы покрывались тонким слоем (4 нм) титана. Металл наносился для декорирования отверстий в резисте, так как непосредственный просмотр маски образцов в сканирующем электронном микроскопе вызывает оплывание краёв отверстий под действием электронного луча.

Определение коэффициентов функции близости. *Определение коэффициентов β и η .* Для коррекции ЭБ применялся так называемый метод пончика (doughnut), предложенный в [8] и основанный на создании массива колец с изменением дозы экспонирования от $0,5D_c$ до $5D_c$ (D_c — доза очистки) и внутреннего радиуса от $0,1\beta$ до 4β . Под дозой очистки понимается доза, в которой в центре любой области с латеральным размером в несколько раз больше β в процессе проявки проэкспонированный резист полностью растворяется. Суть метода состоит в том, что за счёт ЭБ происходит экспонирование большей площади, чем заданный в шаблоне размер кольца, это влечёт за собой экспонирование центра элемента при некоторых дозах экспонирования D и внутренних радиусах R_1 . Изменение дозы должно охватывать случаи недоэкспонирования (дозы экспонирования недостаточно для проявки изображения в резисте) и переэкспонирования (доза значительно превышает дозу очистки, происходит искажение размера и формы изображения, вплоть до полной очистки участка, на котором располагается рисунок). Внешний радиус колец должен быть достаточно большим ($R_2 \gg \beta$ для Si), чтобы максимально охватить расстояние, на котором вклад от краёв кольца при экспонировании резиста будет существенным. Доза экспонирования D записывается через дозу D_c в центре кольца (где не происходило непосредственное экспонирование), полученную вследствие процессов обратного рассеяния как [8]

$$D(R_1) = D_c(1+\eta) \left[\eta e^{-(R_1^2/\beta^2)} \right]^{-1}. \quad (2)$$

Тестовые структуры для коррекции ЭБ исследуются методом СЭМ, и определяются комбинации дозы экспонирования D и внутреннего радиуса R_1 , при которых начинается

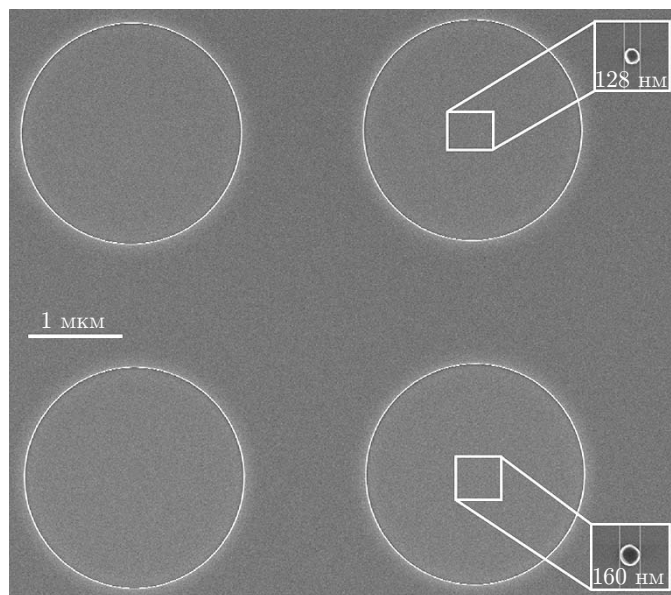


Рис. 1. Фрагмент тестовой структуры для определения коэффициентов по методу пончика (верхний ряд — $D = 171$ мкКл/см², нижний ряд — $D = 159$ мкКл/см², слева — $R_1 = 0,1$ мкм, справа — $R_1 = 0,15$ мкм)

полное проявление резиста в центре колец. Искомые комбинации наносятся на плоскость $D(R_1)$, затем полученная зависимость аппроксимируется функцией из уравнения (2) и находятся соответствующие параметры β и η .

В данной работе внешний радиус $R_2 = 8$ мкм составляет порядка 4β , внутренний радиус R_1 изменяется от 0,1 до 3,05 мкм с шагом 0,05 мкм, доза — от 90 до 850 мкКл/см² с шагом 7,6 %, экспонируется всего 172 кольца, расстояние между кольцами 4 мкм, чтобы области ЭБ от соседних колец не перекрывались.

Типичное СЭМ-изображение четырёх соседних колец представлено на рис. 1. Примерами комбинации минимальных D и R_1 , при которых обнаружена полная очистка центра кольца от резиста, служат на рис. 1 левые верхнее и нижнее кольца, в то время как в соседних элементах наблюдаются остатки резиста. На рис. 2 показаны полученная вышеописанным способом зависимость $D(R_1)$ и аппроксимация функцией из уравнения (2), где $D_c = 75$ мкКл/см² — доза очистки подложки от резиста. По аппроксимации найдены коэффициенты $\beta = 1,91 \pm 0,03$ мкм и $\eta = 0,60 \pm 0,03$, которые использовались далее для определения параметра α .

Экспериментально полученные методом пончика параметры β и η отличаются от табличных данных (1,7 мкм и 0,75 соответственно), заложенных в программу литографической установки. Возможной причиной является пренебрежение в табличных данных толщиной резиста, параметрами проявки и диаметром пучка.

Определение коэффициента α . Следует отметить, что параметр $\alpha \ll \beta$ и не может быть измерен методом пончика. Для его определения экспонировался рисунок в резисте, представляющий собой массив кругов. К этим элементам в шаблоне применялась коррекция ЭБ с параметрами, найденными по методу пончика, а параметр α при коррекции варьировался.

Использовались стандартный [9] и модифицированный [10] способы коррекции ЭБ. В обоих способах методом итераций находится такая доза экспонирования, чтобы её сумма с дозой, полученной от обратного рассеяния электронов, была близка к дозе очистки для данного образца, и можно было создать элементы в резисте с размерами и формой,

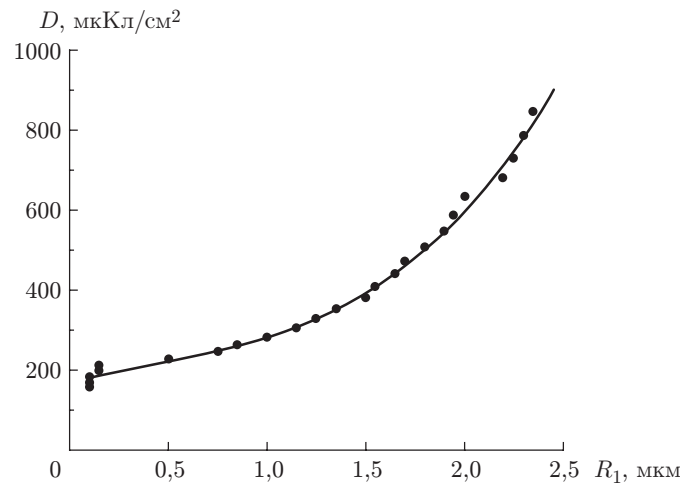


Рис. 2. Графики зависимости дозы экспонирования от внутреннего радиуса колец для коррекции эффекта близости методом пончика (точки — экспериментальная кривая, сплошная линия — аппроксимация дозы экспонирования)

заданными в шаблоне. При этом в модифицированном способе увеличивается вклад от обратнорассеянных электронов в результирующую дозу. При вычислении дозы экспонирования результирующая доза нормируется на площадь. Уравнение в итерационной схеме имеет вид [10]

$$D_r(r)D_i = F_W D_i(r) + \int d^2r' D_i(r') r' f(|r - r'|).$$

При коэффициенте $F_W = 1$ получим стандартное уравнение [9], при $F_W = 1/2$ — модифицированное [10].

Дозы экспонирования массивов кругов с радиусом 100 нм и периодом 300 нм подвергались коррекции с использованием коэффициентов $\beta = 1,91 \pm 0,03$ мкм и $\eta = 0,60 \pm 0,03$ (найжены по методу пончика) и коэффициентов, взятых из базы данных для кремния при ускоряющем напряжении в 20 кВ: $\beta = 1,7$ мкм и $\eta = 0,75$, при разных коэффициентах α (10, 30, 35, 40, 45, 50 и 55 нм). Коррекция проводилась с $F_W = 1$ и $F_W = 1/2$. Доза варьировалась от недоэкспонирования до переэкспонирования, затем измерялись средний радиус кругов и стандартное отклонение σ в массиве с одинаковым параметром α и дозой экспонирования D . Искомый параметр α и доза D определялись из условия, что σ минимально в массиве, а средний радиус равен радиусу кругов в шаблоне.

Типичные СЭМ-изображения массивов кругов (четверть массива размером 5×5 мкм), сформированных в резисте, представлены на рис. 3. Неоднородность размеров элементов в массиве (угловые элементы меньше размером, чем элементы в центре), обусловленная влиянием ЭБ, видна на рис. 3, а. Увеличение поглощённой дозы в центре массива происходит из-за обратнорассеянных электронов от соседних элементов. На краях число соседних элементов меньше, поэтому количество обратнорассеянных электронов и поглощённая доза возрастают от краёв массива к центру. При коррекции ЭБ подбирается доза экспонирования отдельных элементов так, чтобы она уменьшалась от края к центру массива. В результате в массиве получают однородные по размеру элементы (рис. 3, б).

На рис. 4 приведены зависимости σ (кривые 1) и среднего радиуса (кривые 2) от дозы экспонирования для различных α и параметров коррекции ЭБ. Области наименьшего σ и радиуса, близкого к заданному в шаблоне, отмечены серой полосой. При коррекции ЭБ

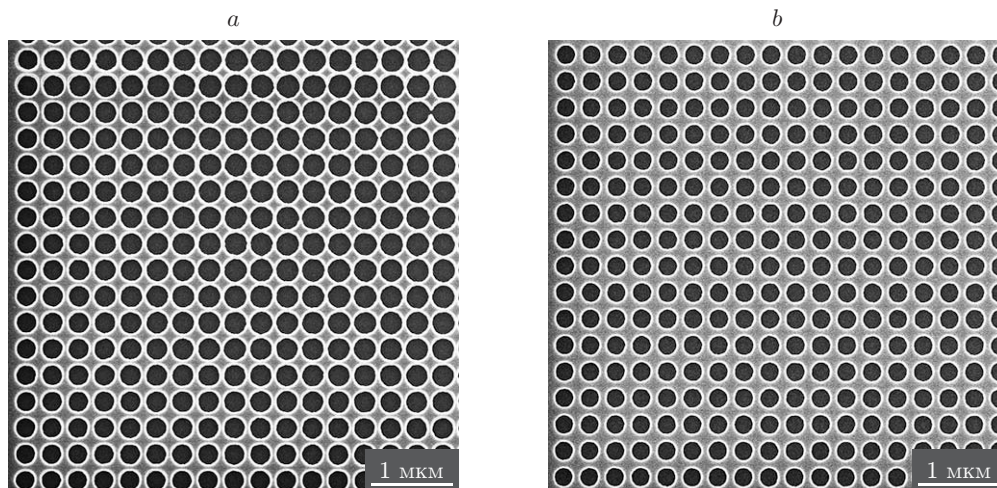


Рис. 3. СЭМ-изображения массивов отверстий (заданный радиус 100 нм): без коррекции эффекта близости (а) и с коррекцией (б)

с $F_W = 1$ минимум стандартного отклонения от среднего и среднее значение радиуса ~ 100 нм (т. е. равное заданному в шаблоне) получаются при разных дозах экспонирования. Если $\beta = 1,7$ мкм (рис. 4, а) минимум σ достигается при $D = 82$ мкКл/см² и $\alpha = 10$ нм, а средний радиус, близкий к 100 нм, — при $D = 93$ мкКл/см² и $\alpha = 40, 50$ и 55 нм. Если $\beta = 1,9$ мкм (рис. 4, б) минимум σ получается при $D = 81$ мкКл/см² и $\alpha = 40$ нм, а средний радиус, близкий к 100 нм, — при $D = 90$ мкКл/см² и всех α , кроме $\alpha = 55$ нм.

На графиках при коррекции ЭБ с $F_W = 1/2$ видно, что при $\beta = 1,7$ мкм (рис. 4, в) минимальное значение σ достигается при дозе ~ 73 мкКл/см² и $\alpha = 45$ нм, но средний радиус элементов в массиве, близкий к 100 нм, получается при дозе 82 мкКл/см² и всех α , кроме

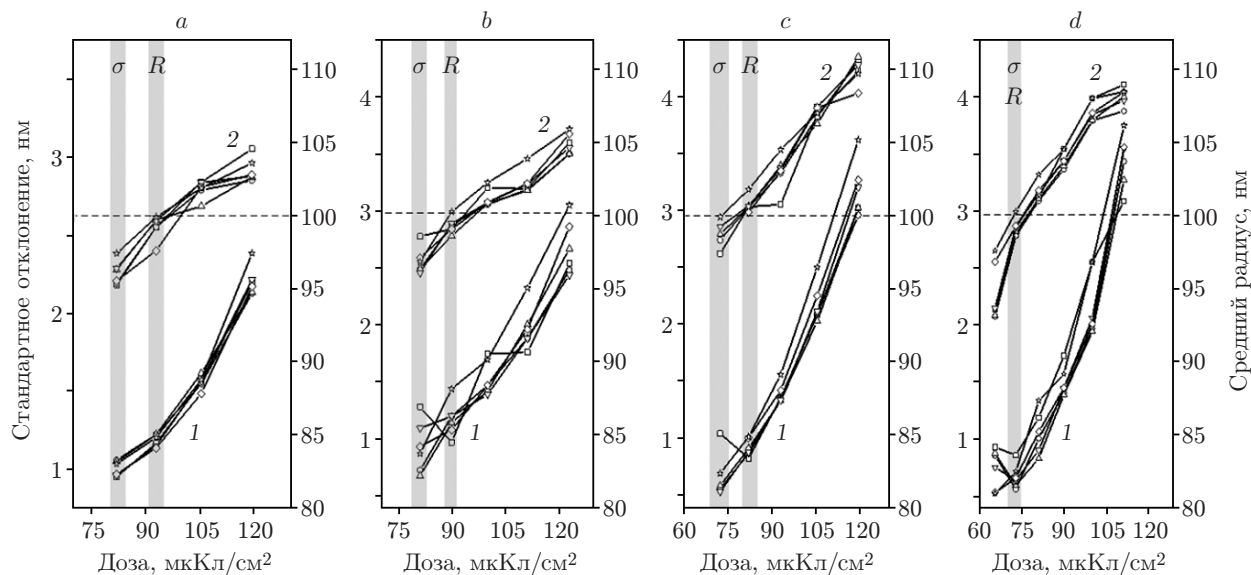


Рис. 4. Графики зависимости среднего радиуса элементов в массиве (кривые 2) и стандартного отклонения от среднего радиуса (кривые 1) от дозы экспонирования при различных α (\square — $\alpha = 10$, \circ — 35, \triangle — 40, ∇ — 45, \diamond — 50, $*$ — 55 нм) и следующих параметрах коррекции эффекта близости: а — $F_W = 1$, $\beta = 1,7$ мкм; б — $F_W = 1$, $\beta = 1,9$ мкм; в — $F_W = 1/2$, $\beta = 1,7$ мкм; д — $F_W = 1/2$, $\beta = 1,9$ мкм

$\alpha = 55$ нм. При $F_W = 1/2$ и $\beta = 1,9$ мкм (рис. 4, *d*) минимальное значение стандартного отклонения от среднего значения радиуса элементов в массиве и среднее значение радиуса, близкое к 100 нм, достигаются при одной и той же дозе экспонирования 73 мкКл/см², близкой к дозе очистки, минимальное стандартное отклонение — при $\alpha = 50$ нм. Эффект совпадения доз, при которых получались средний радиус элементов в массиве, близкий к заданному в шаблоне, и минимальное стандартное отклонение, показан в [11].

При $F_W = 1/2$ и совпадении размеров элементов с заданными в шаблоне при коррекции ЭБ с коэффициентами функции близости, найденными экспериментально в предлагаемой работе по методу пончика, стандартное отклонение от среднего значения радиуса элементов в массиве меньше, чем при коррекции с коэффициентами, взятыми из базы данных (см. рис. 4, *d*). Это свидетельствует в пользу правильности определённых экспериментально методом пончика коэффициентов β и η . Проведённые эксперименты на поверхности кремния представляют собой картину, аналогичную симуляциям из [11], где на основе моделирования профиля поглощённой энергии в резисте проводились симуляции с $F_W = 1$ и $F_W = 1/2$ для коррекции ЭБ при создании планарных фотонных кристаллов на подложке фосфида индия.

Заключение. В данной работе экспериментально определены коэффициенты функции близости при экспонировании с ускоряющим напряжением 20 кВ: $\beta = 1,91 \pm 0,03$ мкм и $\eta = 0,60 \pm 0,03$. Отличие полученных коэффициентов от табличных, возможно, обусловлено пренебрежением при их вычислении толщиной резиста, параметрами проявки и диаметром пучка электронов. Многослойность подложки будет вносить дополнительные коррективы, поэтому становится актуальной разработка экспериментальных методов определения коэффициентов функции близости. По проведённым коррекциям ЭБ с разными параметрами определён коэффициент $\alpha = 50$ нм. Показано, что минимальное стандартное отклонение от среднего значения радиуса элементов в массиве, равно радиусу, заданному в шаблоне, достигается при коррекции ЭБ с использованием коэффициентов β и η , полученных экспериментально, и итерационного уравнения, включающего увеличенный вклад от обратнорассеянных электронов по сравнению с вкладом от первично прошедших электронов при экспонировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ивченко Е. Л., Поддубный А. Н.** Резонансные трехмерные фотонные кристаллы // Физика твердого тела. 2006. **48**, № 3. С. 540–547.
2. **Jugessur A. S., Pottier P., de la Rue R. M.** Engineering the filter response of photonic crystal microcavity filters // Opt. Express. 2004. **12**, N 7. P. 1304–1312.
3. **Hennessy K., Reese C., Badolato A. et al.** Fabrication of high Q square-lattice photonic crystal microcavities // Journ. Vac. Sci. and Technol. B. 2003. **21**, N 6. P. 1–4.
4. **Wüest R., Robin F., Strasser P. et al.** Influence of proximity effects in electron-beam lithography on the optical properties of planar photonic-crystal waveguides // Journ. Appl. Phys. 2007. **102**, N 8. 083110.
5. **Pavkovich J. M.** Proximity effect correction calculations by the integral equation approximate solution method // Journ. Vac. Sci. and Technol. B. 1986. **4**, N 1. P. 159–163.
6. **Ying W., Weihua H., Xiang Y. et al.** An efficient dose-compensation method for proximity effect correction // Journ. Semiconductors. 2010. **31**, N 8. 086001.
7. **Parikh M.** Corrections to proximity effects in electron beam lithography. I. Theory // Journ. Appl. Phys. 1979. **50**, N 6. P. 4371–4377.

8. **Stevens L., Jonckheere R., Froyen E. et al.** Determination of the proximity parameters in electron beam lithography using doughnut-structures // *Microelectron. Eng.* 1986. **5**, N 1–4. P. 141–150.
9. **Groves T. R.** Efficiency of electron-beam proximity effect correction // *Journ. Vac. Sci. and Technol. B.* 1993. **11**, N 6. P. 2746–2753.
10. **Pat. 5736281 US.** Dose modification proximity effect compensation (PEC) technique for electron beam lithography /G. P. Watson. Publ. 07.04.98.
11. **Wüest R., Hunziker C., Robin F. et al.** Limitations of proximity-effect corrections for electron-beam patterning of planar photonic crystals // *Proc. SPIE.* 2004. **5277**. P. 186–197.

Поступила в редакцию 10 декабря 2015 г.
