

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(МФТИ)

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

РЕФЕРАТ
ПО ТЕМЕ

ТАЛБОТ-ЛИТОГРАФИЯ

Работу выполнил _____ Трунов К. Б.

Работу принял, оценка _____

Долгопрудный 2022

1 Литография

Множество современных технологий требуют умения создавать объекты очень малых размеров. Причем, например, в микроэлектронике, чем меньше будет объект, тем более производительным будет продукт. Наибольший интерес представляет возможность печати структур размером до единиц нанометров. Одним из способов получения таких структур является оптическая литография.

Суть фотолитографии заключается в нанесении на поверхность фоточувствительной тонкой пленки (фоторезиста) и последующем ее облучении светом (экспонировании). Затем фоторезист проявляется, поверхность обрабатывается специальными способами и фоторезист удаляется. На поверхности образуется структура той формы, которой был световой фронт. Основной оптической задачей фотолитографии становится повышение резкости изображения и возможность производить структуры малых размеров в больших количествах.

Часто требуется печать периодических наноструктур. Для таких целей в работе [1] впервые исследовался метод литографии, основанный на использовании явления саморепродукции, или эффекта Талбота.

2 Эффект Талбота

Эффект Талбота наблюдается при нормальном падении плоской монохроматической электромагнитной волны на плоскость с периодически повторяющимися оптическими свойствами. При этом картина интенсивности волны, прошедшей плоскость, в точности повторяется на расстояниях от плоскости, кратных расстоянию Талбота z_T . Более того, на расстояниях, кратных z_T , деленному на степень числа 2 (то есть на расстояниях $mz_T/2^k$), картина повторяется с некоторым сдвигом и/или с уменьшенным в кратное число раз периодом. Таким образом, картина дифракции принимает вид так называемого «ковра Талбота» (см. рис. 1).

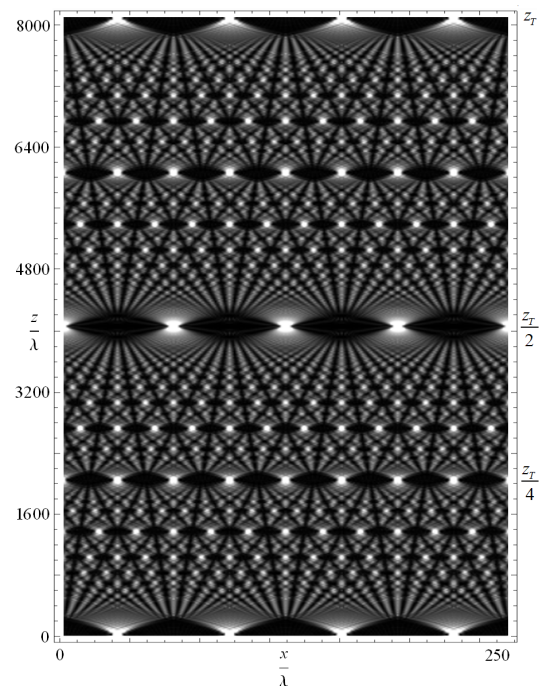


Рис. 1: «Ковер Талбота»: визуализация интенсивности волны, прошедшей через периодическую структуру

Если λ – длина волны излучения, p – период структуры, то расстояние Талбота в общем случае находится как

$$z_T = \frac{\lambda}{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}. \quad (1)$$

Если же, как это часто бывает, $\lambda \ll p$, то справедлива упрощенная формула

$$z_T = \frac{2p^2}{\lambda}. \quad (2)$$

3 Талбот-литография

Эффект саморепродукции открывает новый способ литографии, который имеет ряд преимуществ перед классическими методами:

- Простота и дешевизна конструкции. Традиционные методы литографии требуют наличия сложных оптических систем с минимизированными аберрациями и с высоким разрешением. Разработка и производство таких систем сложны и дороги, особенно для излучения области экстремального ультрафиолета. Для Талбот-литографии требуется только лишь шаблон-маска.
- Эффект самовосстановления. Так как картина в плоскостях Талбота – это результат интерференции волн от каждого элемента периодической структуры, то репродуцированный элемент будет являться «усреднением» всех элементов маски. Это означает, что элементы маски обладали случайными дефектами, то репродуцированные элементы будут этих дефектов лишены.
- Высокая производительность. Так как репродуцируется не каждый элемент маски в отдельности, а сразу вся плоскость маски, то, изготовив шаблон, можно быстро получать нужный рисунок на поверхности большой площади. Также, располагая сразу несколько фоторезистов в разных плоскостях Талбота, можно еще больше увеличить производительность Талбот-литографа.

В статье [1] было показано, как применение Талбот-литографии позволяет изготавливать структуры с периодом около 5 мкм и элементами размером вплоть до 160 нм. В работе был использован гелий-неоновый лазер с длиной волны 632.8 нм и лазер мягко-рентгеновского диапазона с длиной волны 46.9 нм. На рисунках 2 и 3 представлены изображения структур (получены с помощью атомно-силового микроскопа). Видно, что метод позволил получить четкие изображения в больших масштабах (площадь полученной структуры составила 600×600 мкм).

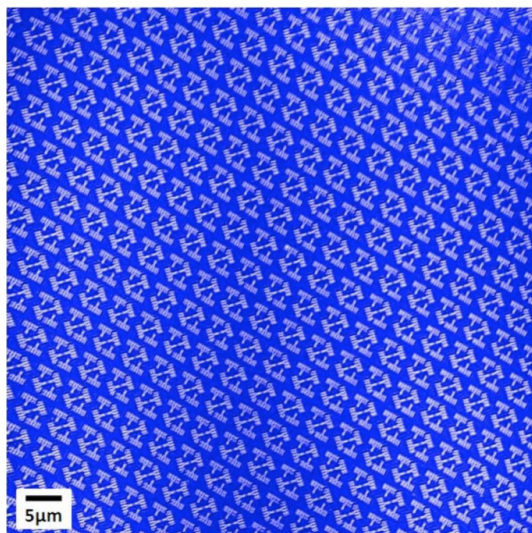


Рис. 2: АСМ изображение структуры, полученной в первой плоскости Талбота с помощью гелий-неонового лазера

Также отметим, что изображение на рисунке 3 получено в шестой плоскости Талбота, и при этом все элементы прорисованы достаточно четко. Это служит очередным доказательством высокой производительности метода.

Эффект самовосстановления наглядно был показан в работе [4]. Авторы использовали МР-лазер с длиной волны 46.9 нм для литографии структуры периодом 5 мкм. Минимальный размер элемента составил 0.5 мкм. Существенен тот факт, что около 20% элементов обладали дефектами, однако репродуцированная структура получилась идеальной. Полученные результаты были визуализированы с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 4).

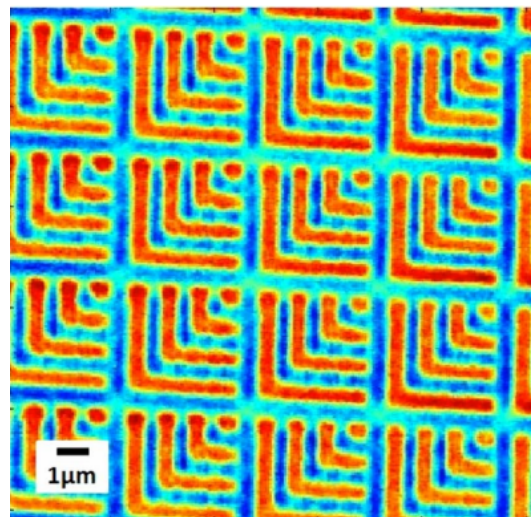


Рис. 3: АСМ изображение структуры, полученной в шестой плоскости Талбота с помощью лазера МР-диапазона

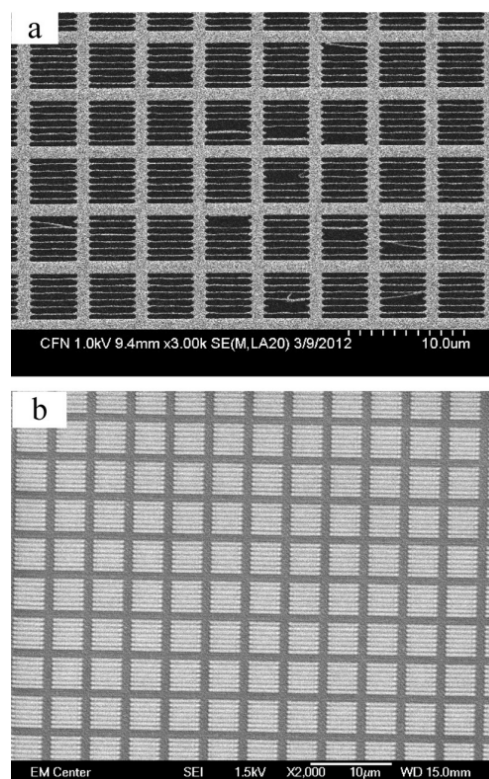


Рис. 4: Самовосстановление изображений: а) маска с большим числом дефектов; б) полученное изображение, лишенное дефектов

4 Ахроматическая Талбот-литография

Описанный выше способ литографии обладает одним существенным недостатком. Такой метод требует очень точного позиционирования плоскости фоторезиста, так как если фоторезист не будет находиться на расстояниях Талбота от маски, то изображение потеряет четкость. В работе [2] был описан метод ахроматической Талбот-литографии (АТЛ), лишенный этой проблемы, но обладающий всеми преимуществами, описанными выше.

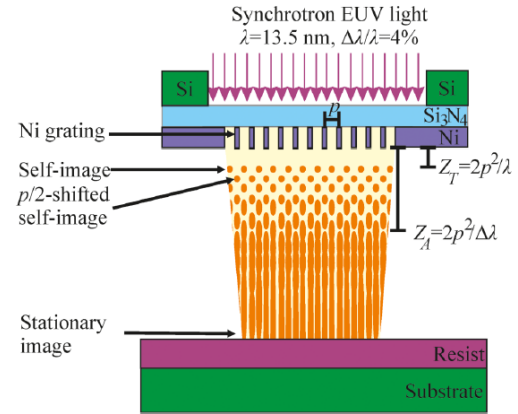


Рис. 5: Принципиальная схема АТЛ

Суть метода заключается в следующем. Как видно из формул (1) и (2), расстояние Талбота зависит от длины волны излучения. Поэтому, если используется не строго монохроматический свет, а свет с длинами волн $\lambda \pm \Delta\lambda/2$, то несложно показать, что на расстояниях, больших так называемого ахроматического расстояния Талбота

$$z_A = \frac{2p^2}{\Delta\lambda}, \quad (3)$$

картины на разных длинах волн будут перекрываться и образуется стационарное изображение, то есть не зависящее от точного расстояния до маски. Форма полученного изображения не будет такой же, как у маски, и для нахождения этой формы не существует аналитического метода. Однако, в работе [2] были исследованы картины от масок разной формы с помощью симуляций (рис. 6).

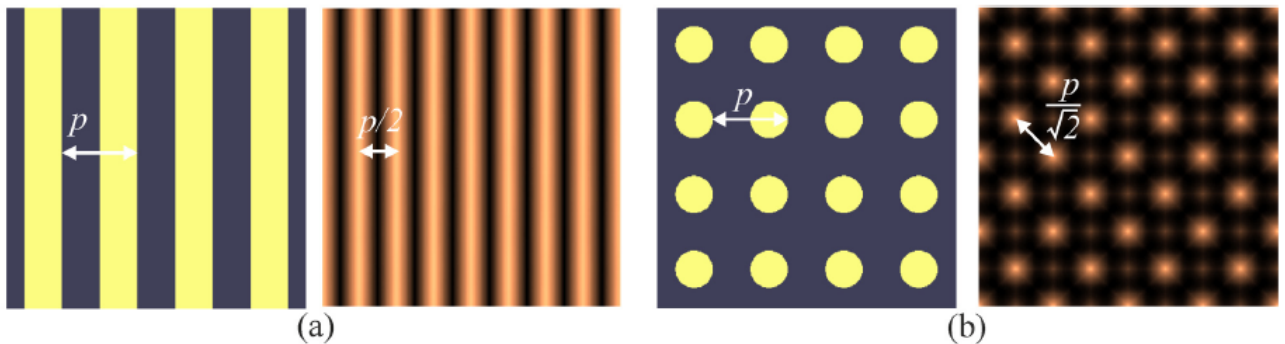


Рис. 6: Формы масок (слева) и их АТЛ-изображения в симуляции (справа). а) Массив полос; б) Квадратный массив точек.

Оказывается, что такой способ обладает еще одним преимуществом – период получившихся структур зачастую оказывается еще меньше периода маски. Например, на рисунках 6(a) и 6(b) периоды АТЛ-изображений уменьшились соответственно в 2 и в $\sqrt{2}$ раз. Также в работе метод был испытан экспериментально на примере квадратного массива точек. В эксперименте использовалось синхротронное МР-излучение с длиной волны 13.6 нм и относительной спектральной толщиной около $\Delta\lambda/\lambda = 4\%$, что позволило получить достаточно четкое изображение от маски с периодом 56 нм (рис. 7). Соответственно период АТЛ-изображения равен $56/\sqrt{2} = 39.6$ нм.

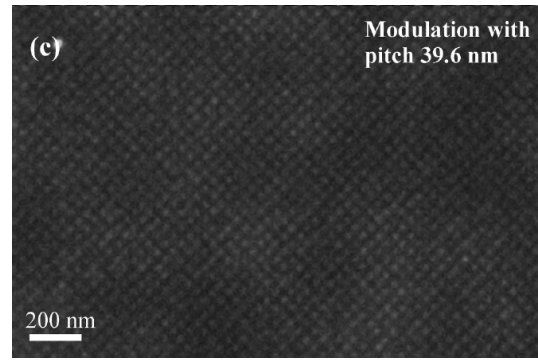


Рис. 7: РЭМ-изображения массива точек, полученного с помощью АТЛ. Период структуры равен 39.6 нм ($56/\sqrt{2}$).

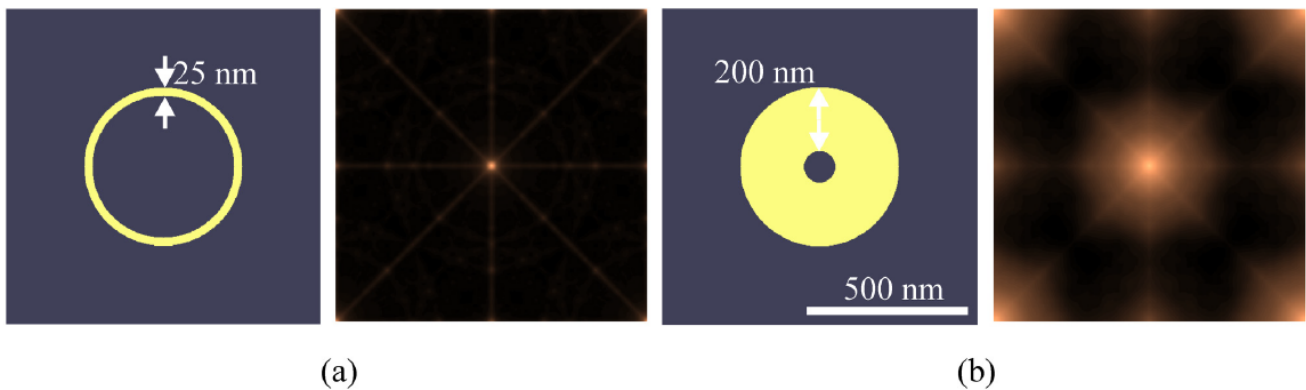


Рис. 8: Сравнение АТЛ-картин массива колец с разной толщиной: а) более тонкое кольцо и меньшее и более четкое изображение; б) изображение кольца с большей толщиной расплывается

Далее в статье [2] исследовалась оптимизация процесса литографии массива точек. При создании наноструктуры необходимо улучшать следующие показатели: разрешение изображения, размер получившихся точек и суммарная интенсивность волны, пришедшей на фоторезист. При уменьшении размера точки улучшается разрешение и уменьшается размер полученной точки, но по очевидным причинам уменьшается интенсивность. Для решения этой проблемы авторы [2] экспериментировали с разными формами масок и обнаружили, что АТЛ-изображением массива колец является все тот же массив точек. При этом с увеличением толщины кольца увеличивается интенсивность, но падает резкость изображения (см. рис. 8), а с увеличением диаметра кольца интенсивность также растет, а резкость и размер элементов картины при этом не изменяются.

Отсюда следует, что необходимо делать кольца как можно большего диаметра и как можно меньшей толщины.

В работе [3] исследование ахроматической Талбот-литографии на примере массива колец продолжилось. Как было показано выше, кольца большего диаметра делают изображения интенсивнее. По этой причине в работе [3] исследователи экспериментировали с массивами, в которых соседние кольца перекрываются, то есть в которых диаметр кольца больше периода структуры. Как и следовало ожидать, АТЛ-изображения и в этом случае имеют вид массива точек. Однако при слишком большом диаметре колец (по сравнению с периодом) начинает резко уменьшаться контрастность изображения, из-за чего страдает качество литографии. Для экспериментальной проверки полученных симуляций использовался тот же синхротронный источник излучения ($\lambda = 13.6$ нм, $\Delta\lambda/\lambda = 4\%$). На рисунке 9 приведены РЭМ-изображения маски и получившейся АТЛ-картины для эксперимента с диаметром колец 525 нм и периодом маски 228 нм. На рисунке видно, что метод действительно позволил получить очень четкий массив точек малого размера. Отметим также, что фоторезист располагался на расстоянии около 0.3 мм от маски, что примерно на 0.1 мм больше расстояния z_A .

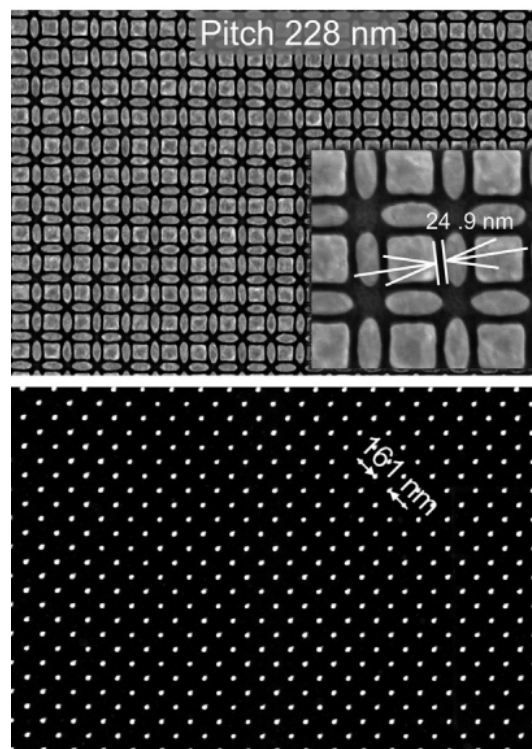


Рис. 9: Результаты АТЛ-печати квадратного массива точек с помощью массива колец. Период маски 228 нм, диаметр колец 525 нм, толщина колец 25 нм. Период полученного массива 161 нм, диаметр точек при этом составил около 33 нм.

5 Вывод

Талбот-литография – это перспективный метод печати периодических наноструктур в больших масштабах, который отличается от классической литографии рядом важных преимуществ. В ряде случаев метод ахроматической Талбот-литографии может оказаться еще более эффективным. Эти методы литографии и сейчас активно развиваются и совершенствуются, что, возможно,

позволит в будущем внедрить такой способ в производство.

Список литературы

- [1] A Isoyan, F Jiang, YC Cheng, F Cerrina, P Wachulak, L Urbanski, J Rocca, C Menoni, and M Marconi. Talbot lithography: self-imaging of complex structures. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 27(6):2931–2937, 2009.
- [2] Dimitrios Kazazis, Li-Ting Tseng, and Yasin Ekinici. Improving the resolution and throughput of achromatic talbot lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 36(6):06J501, 2018.
- [3] Dimitrios Kazazis, Li-Ting Tseng, and Yasin Ekinici. Achromatic talbot lithography with nano-ring masks for high-throughput periodic patterning. *Microelectronic Engineering*, 225:111273, 2020.
- [4] Wei Li, Victor Martinez Esquiroz, Lukasz Urbanski, Dinesh Patel, Carmen S Menoni, Mario C Marconi, Aaron Stein, Weilun Chao, and Erik H Anderson. Defect-free periodic structures using extreme ultraviolet talbot lithography in a table-top system. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 31(6):06F604, 2013.