

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 535.016

**Получение высококонтрастных «ковров Талбота»  
при использовании амплитудно-фазовой  
мезоволновой маски**

**Ю.Э. Гейнц<sup>1</sup>, А.А. Землянов<sup>1</sup>, Е.К. Панина<sup>1</sup>,  
И.В. Минин<sup>2,3</sup>, О.В. Минин<sup>2,3\*</sup>**

<sup>1</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

<sup>3</sup> *Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
630005, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10*

Поступила в редакцию 15.04.2020 г.

С помощью численного моделирования методом конечных элементов исследована пространственная структура поля оптической волны в ближней зоне составной амплитудно-фазовой дифракционной решетки с периодом штрихов порядка длины волны падающего излучения. Показано, что применительно к технологии оптической Талбот-литографии такая комбинированная бинарная маска обеспечивает многократное оптическое повышение контрастности интегрального «ковра Талбота» по сравнению с чистыми амплитудными и фазовыми масками. Проанализированы физические причины этого эффекта и установлена определяющая роль резонансов Ми, возбуждающихся внутри диэлектрических выступов фазовой маски, что может дать высокое пространственное разрешение (до четверти оптической волны) и максимальный оптический контраст (до 24 дБ) интегральных самоизображений Талбота.

*Ключевые слова:* эффект Талбота, фотолитография, дифракционные маски; Talbot effect, photolithography, diffraction mask.

Оптические метаструктуры в форме мезоволновых дифракционных решеток (ДР) с периодом штрихов порядка рабочей длины волны оптического излучения являются ключевыми конструктивными элементами перспективных оптических схем и таких устройств, как монохроматоры, поляризаторы, спектральные фильтры, сенсорные массивы, антиотражающие и скрывающие поверхности [1]. Одно из важнейших свойств ДР состоит в возможности создания периодической структуры оптического поля прошедшей или отраженной от решетки волны. При этом вследствие интерференции волн от различных дифракционных порядков за решеткой в зоне Френеля возникает периодическая пространственная картина чередующихся максимумов и минимумов интенсивности поля, часто называемая в литературе дифракционным «ковром Талбота» [2]. Эта достаточно устойчивая структурная периодичность поля нашла практическое применение, в частности, в технологиях оптического микроструктури-

рования фоточувствительных поверхностей и оптической Талбот-литографии [3].

Обычный способ получения периодической дифракционной картины — это использование амплитудных или фазовых масок, выполненных в форме одно- или двумерных ДР. Эти дифракционные элементы придают пространственную модуляцию падающей световой волне и в дальнейшем инициируют множественное самоповторение изображения маски в окружающем пространстве на целочисленных масштабах Талбота  $z_T$ . В случае использования фазовых ДР дифракционная картина существенно усложняется за счет появления интерференции волн, прошедших фазовые ступеньки маски.

Одна из проблем классической Талбот-фотолитографии (проекционной литографии) заключается в необходимости точного позиционирования фоточувствительной матрицы в зоне резкого изображения маски, которая может не превышать нескольких длин волн излучения. Другая проблема связана с невысокой контрастностью самих изображений маски на фоторезисте, снижающей точность фотопечати. Частично это решается с помощью так называемой трансляционной (сдвиговой) Талбот-литографии (в англоязычной литературе — displacement Talbot lithography [4]), когда облучаемая матрица

\* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Екатерина Константиновна Панина (pek@iao.ru); Игорь Владиленович Минин (prof.minin@gmail.com); Олег Владиленович Минин (oleg.minin@ngs.ru).

не фиксируется в пространстве, а циклично перемещается в диапазоне нескольких длин Талбота (десятки мкм), что приводит к интегрированию дифракционной картины Талбота в продольном направлении. Это позволяет повысить глубину резкости изображений маски, а также избавляет от необходимости физического контакта маски с подложкой, поверхность которой может не быть идеально плоской.

Увеличение контрастности «ковров Талбота», т.е. повышение яркости самоизображения над уровнем фона, является самостоятельной и достаточно серьезной проблемой для технологии Талбот-литографии. Особенно это важно при использовании масок мезоволновых пространственных масштабов с периодом штрихов  $d \sim \lambda$  [5]. Определенных результатов в решении этой проблемы удалось достичь за счет экстремально точной настройки размерного соотношения  $d/\lambda$  масочной ДР, когда на нескольких дистанциях Талбота реализуется практически безаберрационная картина репродуцированных изображений маски [6]. Диапазон значений  $d/\lambda$  удается несколько расширить (порядка 10%) при использовании наклонного падения света на маску [5]. Также в литературе сообщается об улучшении пространственного разрешения трансляционной Талбот-литографии (ТТЛ) путем поэтапного изготовления промежуточных масок с прогрессивно уменьшающимся периодом штриха [7].

В настоящей работе мы предлагаем новый способ повышения контраста интегральной дифракционной картины Талбота от мезоволновой ДР. Для этой цели мы, следуя идеям [8], объединили амплитудную и фазовую решетки в одну структуру и с помощью численного моделирования определили оптимальные параметры фазовых выступов, обеспечивающие наилучшую контрастность.

В дальнейшем будут рассматриваться дифракционные маски на основе обычной амплитудной решетки, в окнах которой сформированы фазовые ступеньки полусферической, прямоугольной и треугольной форм (для примера на рис. 1, а показана маска с прямоугольными ступеньками). Коэффициент преломления материала фазовой решетки обозначен  $n_2$ . Непрозрачная золотая (Au) маска выполнена в форме полоски и размещена на достаточно толстой (полубесконечной) подложке с коэффициентом преломления  $n_1$ , которая, в свою очередь, помещена в воздух с  $n = 1$ . Полагалось, что подложка и фазовая решетка изготовлены из оптического стекла с нулевой дисперсией в оптическом диапазоне длин волн. Амплитудная маска освещается снизу линейно поляризованным вдоль желобов решетки монохроматическим излучением с длиной волны  $\lambda = 375$  нм в УФ-области спектра, характерной для коммерческих устройств ТТЛ. При этом за маской в зоне дифракции Френеля формируется двумерный «ковер Талбота». Для определенности ряд параметров модели при численных расчетах был фиксирован:  $n_1 = 1,5$ , период штрихов — 800 нм, высота диэлектрических выступов — 500 нм, толщина золотой маски — 80 нм.

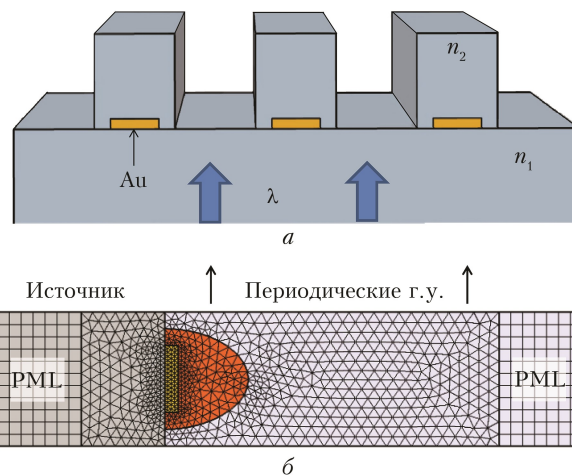


Рис. 1. Компьютерная модель амплитудно-фазовой маски с выступами прямоугольной формы (а); FEM-модель маски с выступами полусферической формы (б)

Моделирование структуры ближнего поля при дифракции световой волны на фазовой ДР проводилось на основе численного решения волнового уравнения для электромагнитного поля при помощи метода конечных элементов (FEM), реализованного коммерческим программным пакетом COMSOL Multiphysics. Использовалась 2D-геометрия расчетной области в декартовых координатах  $xy$ , а вдоль оси  $z$  решетка считалась бесконечной. Вследствие периодичности компьютерная модель оптической метаструктуры строилась только для одного периода решетки (рис. 1, б). На левой и правой границах расчетной области в направлении падения излучения ставились условия идеального согласования полей (PML на рис. 1), на двух других — условия периодичности Флоке–Блоха («Периодические г.у.» на рис. 1). Точность численного решения уравнений обеспечивалась адаптивной расчетной сеткой, узлы которой сгущались в областях резких градиентов диэлектрической проницаемости среды (полоски маски). Максимальный шаг пространственной сетки выбирался на уровне  $\lambda/30$  внутри дифракционной структуры и  $\lambda/15$  в воздухе.

На рис. 2 приведены примеры двумерного распределения самоизображений (ковров) Талбота в случае освещения только металлической мезоволновой решетки, а также комбинированных масок с различной формой диэлектрических выступов и показателем преломления  $n_2$ . Классическая дифракционная картина от чистой амплитудной маски (рис. 2, а) представляет собой множественные изображения щелей между непрозрачными промежутками с характерным масштабом самоповторения Талбота  $z_T \approx 3,2$  мкм и аналогичных им смещенных в продольном направлении на полпериода решетки самоизображений на половинном расстоянии  $z_T/2$ . При добавлении к металлической маске фазовой ДР (рис. 2, б–г) происходит существенное усложнение дифракционной картины, выражающееся в увеличении пространственной частоты самоизображений (изображения Френеля) по обеим координатным осям.

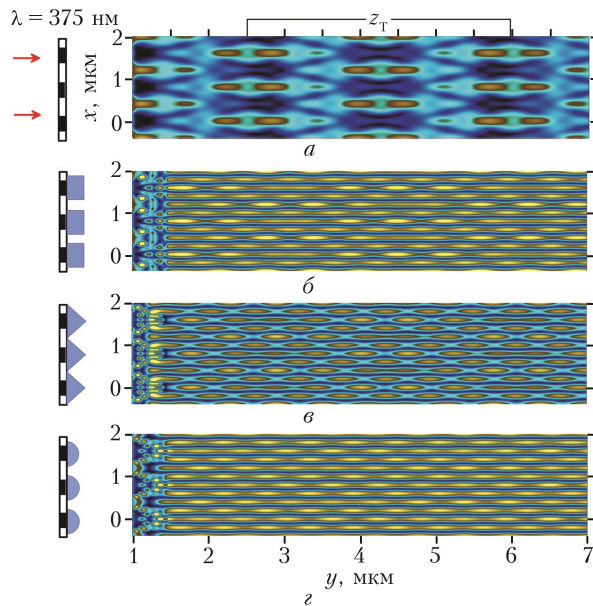


Рис. 2. Дифракционные «ковры Талбота» от обычной амплитудной маски (а) и комбинированных амплитудно-фазовых масок различной формы с показателем преломления фазовых выступов  $n_2 = 1,7$  (б);  $2,3$  (в);  $2,0$  (з)

Анализ физических причин изменения дифракционной картины Талбота от комбинированной амплитудно-фазовой маски показывает, что, поскольку каждый элемент золотой маски действует как непрозрачное препятствие для электромагнитной волны, это приводит к дифракции светового излучения на краях металлической полоски. В случае целиком амплитудной маски световые потоки, проходящие вблизи верхнего и нижнего краев блокирующего элемента, конструктивно интерферируют и формируют в области геометрической тени смещенные по вертикали изображения щели на дистанции  $z_T/2$ . Взаимодействие оптических потоков от соседних элементов маски приводит к формированию «ковра Талбота» в виде шахматной структуры максимумов интенсивности поля.

В амплитудно-фазовой ДР направление основных энергопотоков изменяется и управляется уже силой рефракции световой волны на границах полусферического выступа вследствие оптического контраста с окружающей средой. Из-за разности фазовых скоростей волны внутри и вне ступеньки волновой фронт изгибается, приводя к концентрации светового потока в направлении фазового выступа решетки и проявлению фокусирующего эффекта вблизи его выходной грани. При определенных геометрических параметрах маски может происходить конструктивная интерференция встречных потоков и формироваться структурный резонанс Ми. Сам по себе структурный резонанс не изменяет характер распределения амплитуды оптического поля в «ковре Талбота», но может повысить его контраст.

Ключевой момент ТТЛ – усреднение созданной маской дифракционной картины Талбота для устранения ее продольной изменчивости. При мо-

делировании для получения соответствующих профилей мы проводили численное интегрирование двумерного распределения интенсивности поля за маской по одной из координат в пределах нескольких масштабов Талбота  $z_T$ . Полученные таким образом одномерные профили усредненной интенсивности  $W(x)$  вдоль плоскости, формирующей изображение амплитудно-фазовой решетки с полусферическими выступами, приведены на рис. 3.

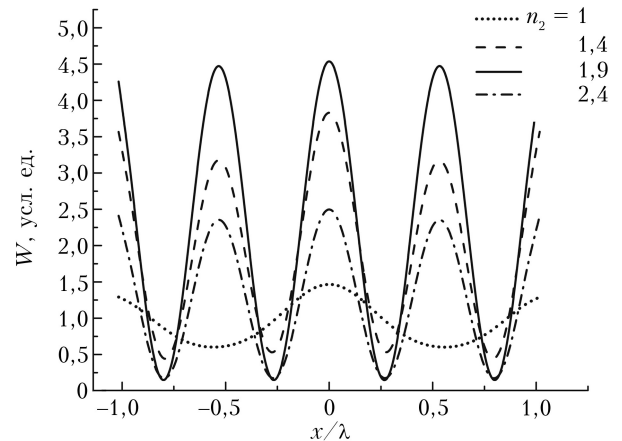


Рис. 3. Профили интенсивности интегрального «ковра Талбота» от полусферических дифракционных масок с различным оптическим контрастом

Из рис. 3 видны неоспоримые преимущества комбинированной амплитудно-фазовой маски с точки зрения применения в интегральной Талбот-литографии. Действительно, по сравнению с чисто амплитудной маской (кривая с  $n_2 = 1$ ) все варианты с добавлением фазовых ступенек характеризуются кратно лучшим пространственным разрешением и более высокой амплитудой в максимумах интегральной картины. Более того, существенно повышается и оптический контраст дифракционной картины.

Итоговые данные по основным параметрам интегральной дифракционной картины самоизображений Талбота для различных типов амплитудно-фазовых масок сведены вместе в таблице. Значения полуширины  $w$  дифракционной полосы и ее максимальной приведенной интенсивности  $I_{\max}$  (нормировка на интенсивность падающей волны) вычислены при величине  $n_2$ , при которой наблюдается пиковое значение оптического контраста  $C_{\max}$ . Здесь же в качестве дополнительной характеристики качества маски с точки зрения ее использования в технологии ТТЛ рассчитан синтетический параметр  $Q = (C_{\max} I_{\max}) / (w/\lambda)$ . Эта характеристика дает условную оценку того, насколько резкую и яркую дифракционную картину полос способен сформировать конкретный оптический транспарант.

Как видно из таблицы, лучшие результаты по всем параметрам показывает маска с полусферическими фазовыми выступами. Здесь реализуется наивысшее значение оптического контраста дифракционных полос относительно фона на уровне  $C_{\max} \approx 24$  дБ при высоком пространственном разрешении

### Основные параметры интегральных «ковров Талбота»

Параметр	Форма фазового выступа маски			
	без выступа	прямоугольная	полусфера	треугольная
$C_{\max}$ , дБ	2,6	21,8	23,8	23
$I_{\max}$	1,1	1,6	1,5	0,57
$w/\lambda$	1	0,36	0,36	0,36
$Q$	3	94	100	37

$w = 0,36\lambda$  и интенсивности в максимуме, превышающей начальную в 1,5 раза. Синтетический параметр качества интегрального «ковра Талбота» достигает  $Q \approx 100$ . Относительно худшие параметры интегрального «ковра Талбота» получаются при использовании маски с прямоугольными выступами, дающей  $C_{\max} \approx 22$  дБ и  $Q = 94$ . Наконец, дифракционная решетка с треугольными ступеньками характеризуется худшими параметрами:  $C_{\max} = 23$  дБ и  $Q = 37$ . Однако даже в этом случае качество дифракционной картины получается существенно выше, чем если работать с традиционной амплитудной маской, для которой  $Q$  оказывается более чем на порядок ниже ( $C_{\max} = 2,6$  дБ и  $Q \approx 3$ ).

Таким образом, для использования в трансляционной Талбот-литографии были теоретически рассмотрены закономерности дифракционных «ковров Талбота», формируемых комбинированными амплитудно-фазовыми дифракционными масками мезоволновых размеров при освещении линейно поляризованным монохроматическим излучением. Было проведено численное моделирование дифракции оптического излучения на таких ДР с помощью методики разбиения счетной области на множество конечных элементов, реализованной программным пакетом COMSOL Multiphysics. Установлено, что при определенном соотношении геометрических размеров и относительного коэффициента преломления фазового выступа ( $n_2/n = 1,95$ ) возможно кардинально (почти на порядок величины) поднять контраст интегрированных самоизображений Талбота относительно фона в сравнении с чисто амплитудной маской, а также повысить их пространственное разрешение. Наилучшие результаты по всем параметрам были получены для фазовой маски с выступами полусферической формы.

Хотя методы и технология изготовления предлагаемых двухкомпонентных дифракционных решеток выходят за рамки настоящей статьи, значи-

тельный прогресс в области современной фотолитографии и технологии сухого травления для микро- и нанотекстурирования различных материалов [9] убеждают в практической осуществимости производства таких оптических метаструктур.

Работа выполнена в рамках госзаказа Министерства науки и высшего образования и программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-57-S52001).

1. Wen J., Zhang Y., Xiao M. The Talbot effect: recent advances in classical optics, nonlinear optics, and quantum optics // *Adv. Opt. Photon.* 2013. V. 5, iss. 1. P. 83–130. DOI: 10.1364/AOP.5.000083.
2. Winthrop J.T., Worthington C.R. Theory of Fresnel images. I. Plane periodic objects in monochromatic light // *J. Opt. Soc. Am.* 1965. V. 55, iss. 1. P. 373–381. DOI: 10.1364/JOSA.55.000373.
3. Min J.-H., Zhang X.A., Chang C.-H. Designing unit cell in three-dimensional periodic nanostructures using colloidal lithography // *Opt. Express.* 2015. V. 24, iss. 2. A276. DOI: 10.1364/OE.24.00A276.
4. Solak H.H., Dais C., Clube F. Displacement Talbot lithography: A new method for high-resolution patterning of large areas // *Opt. Express.* 2011. V. 19, iss. 11. P. 10686. DOI: 10.1364/OE.19.010686.
5. Thomae D., Sandfuchs O., Brunner R. Influence of oblique illumination on perfect Talbot imaging and nearly perfect self-imaging for gratings beyond five diffraction orders // *J. Opt. Soc. Am.* 2015. V. 32. P. 2365–2372. DOI: 10.1364/JOSAA.32.002365.
6. Noponen E., Turunen J. Electromagnetic theory of Talbot imaging // *Opt. Commun.* 1993. V. 98. P. 132–140. DOI: 10.1016/0030-4018(93)90772-W.
7. Chen H., Qin L., Chen Y., Jia P., Gao F., Chen C., Liang L., Zhang X., Lou H., Ning Y., Wang L. Refined grating fabrication using displacement Talbot lithography // *Microelectron. Eng.* 2018. V. 189. P. 74–77. DOI: 10.1016/j.mee.2017.12.018.
8. Geints Y.E., Minin O.V., Minin I.V. Apodization-assisted subdiffraction near-field localization in 2D phase diffraction grating // *Ann. Phys.* 2019. V. 531. P. 1900033. DOI: 10.1002/andp.201900033.
9. Ishikawa K., Karahashi K., Ishijima T., Cho S.I., Eliott S., Hausmann D., Mocuta D., Wilson A. Kinoshita K. Progress in nanoscale dry processes for fabrication of high-aspect-ratio features: How can we control critical dimension uniformity at the bottom? // *Jap. J. Appl. Phys.* 2018. V. 57, N 6S2. P. 06JA01-1-18. DOI: 10.7567/JJAP.56.06HA02.

#### Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov, E.K. Panina, I.V. Minin, O.V. Minin. Generation of high-contrast “Talbot carpets” with the use of a mesoscale amplitude-phase mask.

The spatial near-field structure of optical wave scattered by a composite amplitude-phase diffraction mask with a ruling period on a wavelength scale is studied in numerical simulations by the finite element method. As applied to the displacement Talbot-nanolithography, such a combined binary mask is shown to provide multiple enhancement of the optical contrast of an integral “Talbot carpet” as compared to pure amplitude and phase masks. The physical causes of this effect are analyzed and the key role of Mie resonances excited inside the dielectric bars of the phase mask is ascertained. Meanwhile, the combined mask suggested ensures a high spatial resolution (up to a quarter of optical wavelength) and maximal optical contrast (up to 24 dB) of integral Talbot’s self-images.