

УДК 535.44

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ОПТИМИЗИРОВАННОГО МЕТОДА КОНТУРНОЙ МАСКИ К ОШИБКАМ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОЭ С КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНЫМ РЕЛЬЕФОМ*

В. П. Корольков

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: victork@iae.nsk.su*

Рассмотрено влияние ошибок технологического процесса, использующего оптимизированный метод контурной маски при изготовлении ДОЭ с кусочно-непрерывным рельефом, на уменьшение обратных скатов зон и повышение дифракционной эффективности элементов. Допуски на отклонения технологических параметров, необходимые для реализации метода, находятся в рамках параметров стандартных технологических процессов и оборудования микрорезисторного производства. Предложенный метод может быть полезен для лазерных записывающих систем и проекционной литографии, формирующих рельеф в фоторезисте с обратным скатом шириной более 1 мкм, так как позволяет существенно улучшить качество изготавливаемых дифракционных структур.

Ключевые слова: метод оптимизированной контурной маски, дифракционные оптические элементы, кусочно-непрерывный рельеф, дифракционная эффективность.

Введение. Разработка новых технологий изготовления ДОЭ, позволяющих получить высокую дифракционную эффективность на механически и химически стойких материалах, является основным направлением развития прикладной дифракционной оптики. Исторически первой технологией промышленного производства высокоэффективных ДОЭ с переменным периодом дифракционных зон стала контактная фотолитография с использованием комплекта бинарных (имеющих два уровня пропускания) фотошаблонов. Специфика ДОЭ позволяет при использовании N фотошаблонов получить 2^N фазовых уровней [1]. Несмотря на высокую точность изготовления отдельных фотошаблонов происходит накопление ошибок при повторении операций совмещения фотошаблонов и экспонирования фоторезиста, приводящее к ухудшению характеристик ДОЭ [2].

В последние годы активно применяются аналоговые технологии на основе полутонных [3] и растровых [4] фотошаблонов. Методы прямой лазерной записи [5, 6] с аналоговым управлением интенсивностью записывающего пучка на плёнках рельефообразующих материалов (резистов) также широко применяются при синтезе высокоэффективных и высококачественных ДОЭ. Все эти аналоговые методы позволяют избавиться от многочисленных операций совмещения фотошаблона и сформированного на предыдущем шаге микрорельефа. Однако при их реализации необходимо использовать слабоконтрастные фоторезисты и проявители, чтобы зависимость толщины проявленного слоя фоторезиста от экспозиции была близка к линейной. По этой причине невозможно получить вертикальные стенки на границе дифракционных зон и, как следствие, высокую дифракционную эффективность для узких зон.

*Работа выполнена при частичной поддержке Сибирского отделения РАН (междисциплинарные интеграционные проекты № 43 и № 112), Президиума РАН (проект № 24.7 «Разработка и исследование методов генерации и детектирования широкополосного терагерцового излучения на основе преобразования фемтосекундных лазерных импульсов в растровых структурах на объёмных и многослойных полупроводниках») и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-02-00974-а и № 12-02-01118-а).

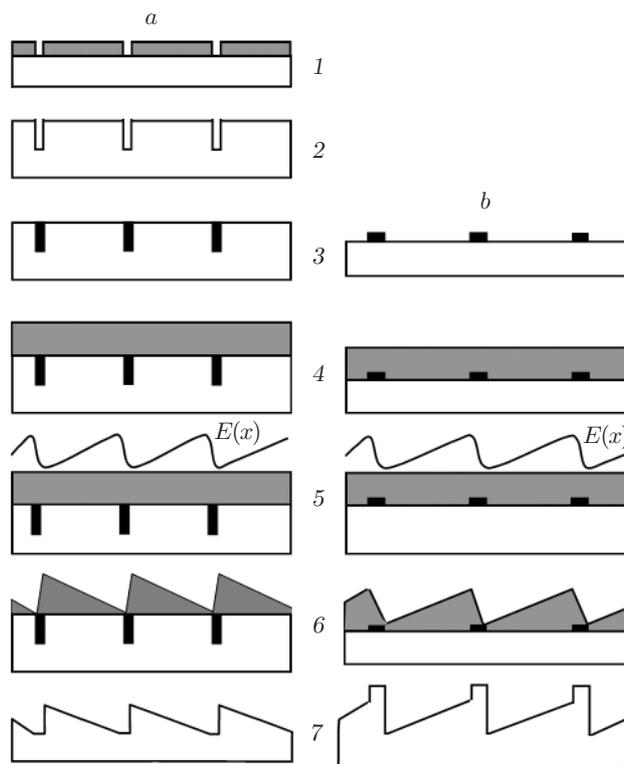


Рис. 1. Варианты метода контурной маски: *a* — объёмная [6], *b* — поверхностная

Эта проблема может быть решена путём комбинирования преимуществ бинарной многошаблонной и аналоговой технологий: вертикальных краёв зон, формируемых при «сухом» травлении (например, реактивное ионное травление) через металлическую маску, и пологого рельефа между границами, достигаемого при полутоновой технологии. Несколько вариантов такого процесса предложено в [7]. Один из них, основанный на использовании объёмной контурной маски (ОКМ), показан на рис. 1, *a*. Метод включает следующие этапы: 1 — формирование окон в резисте на границе дифракционных зон; 2 — ионно-плазменное травление подложки через окна в резисте; 3 — напыление на подложку слоя алюминия толщиной, превышающей глубину вытравленных канавок ОКМ, и выполнение операции химико-механической планаризации [8] до удаления алюминия с плоской поверхности подложки (остаётся только объёмная контурная маска в канавках); 4 — нанесение фоторезиста на подложку с контурной маской; 5 — экспонирование фоторезиста через полутоновый фотошаблон с предварительным совмещением полутонового фотошаблона и контурной маски; 6 — проявление фоторезиста; 7 — перенос рельефа с поверхности фоторезиста в подложку с помощью реактивного ионного травления и последующее травление контурной маски. Сложность этого процесса очевидна. Требуется не только совмещённый комплект из двух масок — полутоновой и бинарной — но и двукратное повторение операции сухого травления, а также выполнение сложной и дорогой операции химико-механической планаризации.

Цель предлагаемой работы — анализ особенностей применения более простой с технологической точки зрения версии метода контурной маски, предложенного в [9], и демонстрация возможности резкого повышения дифракционной эффективности изготавливаемых элементов за счёт оптимизации ширины линий контурной маски и глубины травления рельефа через маску. Отличия технологий и геометрических характеристик формируемого рельефа дают основание назвать наш вариант оптимизированным методом контурной маски (ОМКМ).

1. Оптимизированный метод контурной маски. В предлагаемом методе используется поверхностная контурная маска (ПКМ), выполненная в виде тонкоплёночных металлических линий вдоль границ дифракционных зон без внедрения вглубь подложки. Существенной разницы между маской с вертикальными стенками, создаваемыми по методу, описанному в [6], и поверхностной металлической маской нет, так как канавки вдоль границ зон в работе [6] создаются путём травления через поверхностную маску в фоторезисте. Селективность сухого травления тонкой плёнки хрома по отношению к плавленому кварцу в десятки раз выше, чем у фоторезиста, что позволяет получать практически вертикальные стенки канавок [10]. Кроме того, полное заполнение узкой канавки алюминием путём напыления представляется затруднительным при глубине канавки существенно большей, чем её ширина. В то же время получение поверхностной тонкоплёночной (50–70 нм) хромовой маски не представляет особого труда и может быть осуществлено как фотолитографическими методами, так и термохимической лазерной записью [11].

Последовательность основных операций предлагаемого процесса изготовления высокоэффективного ДОО показана на рис. 1, *b*. Сокращение числа операций по сравнению с ОКМ (см. рис. 1, *a*) достигается за счёт более простого способа получения поверхностной контурной маски. Полутоновое распределение поглощённой энергии света $E(x)$ может быть создано фотолитографией с помощью полутонового или растрового фотошаблона, а также путём лазерной или электронно-лучевой записи. Естественным требованием к устройству, создающему $E(x)$, является наличие подсистемы совмещения ПКМ с полутоновым распределением экспозиции. Таким образом, предлагаемый процесс содержит только одну операцию сухого травления и не требует применения дорогостоящей химико-механической планаризации. Кроме того, ОКМ включает оптимизацию и геометрических характеристик контурной маски, и формируемого с её помощью рельефа. Моделирование дифракции света на сформированной подобным образом линейной решётке показало, что ширина линий ПКМ и глубина травления через неё могут быть оптимизированы с существенным повышением дифракционной эффективности.

2. Теоретическая оптимизация метода контурной маски. Процесс формирования рельефа моделировался на основе математического подхода, использованного в работе [12], как процесс прямой лазерной записи по резисту сфокусированным пучком. При этом формирование рельефа линейной решётки без контурной маски представлялось в виде нормированной суммы гауссовых распределений интенсивности пучка $I_i(x)$ (рис. 2, *a*) с диаметром W (по уровню 0,5). Расстояние между соседними максимумами распределений $I(x)$ равно Δx . Мощность пучка P на i -м шаге изменялась пропорционально (с коэффициентом α) расчётной глубине рельефа дифракционной зоны в точке с координатой $i\Delta x$. При этом глубина рельефа считалась пропорциональной поглощённой энергии света, что вполне справедливо для фоторезистов, подвергнутых равномерной предэкспозиции для выхода на линейный участок характеристической кривой резиста [13]. Численные расчёты велись в среде математического моделирования Matlab.

Рельеф, получаемый травлением через контурную маску, моделировался заменой части обратного ската на границах дифракционных зон выступом с плоской вершиной и вертикальными стенками (рис. 2, *b*). Выступ имел заданную ширину D и глубину ΔH по отношению к наивысшей точке рельефа идеальной дифракционной решётки. Ширина обратного ската (BWS — Backward Slope) определялась как расстояние между максимумом и минимумом высоты рельефа на границе зон. Глубина идеального профиля H (см. рис. 2, *b*, штриховые линии) в расчётах принята равной 1 при фазовом скачке 2π на границах дифракционных зон.

Для сравнения результатов моделирования с результатами, полученными в работе [12] (посвящена различным методам оптимизации распределения экспозиции при прямой лазерной записи по фоторезисту), были выбраны те же параметры модели: диаметр записи

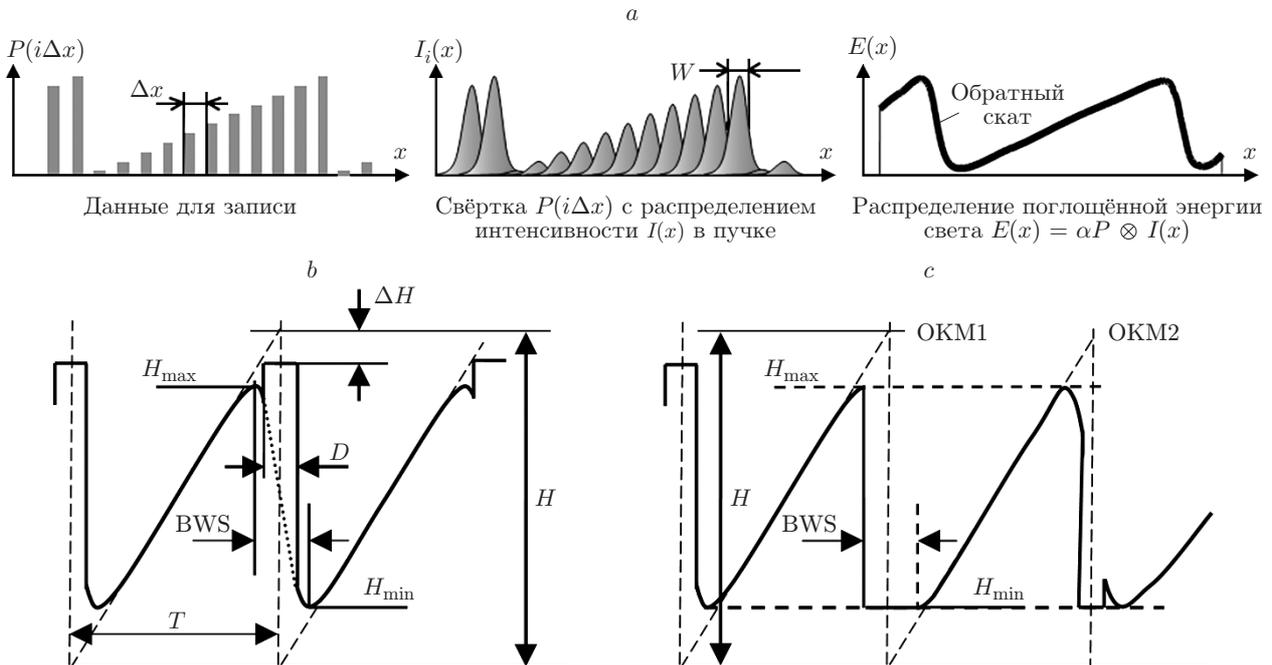


Рис. 2. Форма рельефа дифракционных зон, сформированных различными методами: *a* — при неоптимизированной записи, *b* — ОКМ, *c* — с помощью ОКМ, имеющих разную ширину канавок (ОКМ1, ОКМ2 — ширина равна BWS и 0,4BWS). H — глубина рельефа идеальной линейной решётки с периодом T

вающего пучка $W = 1,65$ мкм по уровню 0,5 от максимума (или радиус 1,4 мкм по уровню e^{-2}) и величина пошагового перемещения пятна $\Delta x = 0,4$ мкм. Расчёт дифракционной эффективности в первом (DE_1) и нулевом (DE_0) порядках дифракции производился в рамках скалярной теории дифракции:

$$DE_1 = |FT_1(\varphi)|^2, \quad DE_0 = |FT_0(\varphi)|^2,$$

где FT_0 и FT_1 — нулевая и первая фурье-компоненты фазовой функции φ рассчитанного профиля. Моделирование формы, рельефа и дифракционной эффективности для прямой записи без контурной маски полностью совпадает с результатами работы [12], полученными для аналогичных параметров и подтверждёнными, в свою очередь, экспериментально. Это доказывает корректность нашей математической модели и при моделировании рельефа с использованием контурной маски.

Произведённые расчёты с вариациями D и ΔH показали, что оптимальная величина ΔH для повышения DE_1 равна 0 для всех периодов. В то же время оптимальная величина D зависит от периода и от целевой функции оптимизации — максимума DE_1 (далее D_1) или минимума DE_0 (далее D_0). На рис. 3 приведены зависимости D_1/W и D_0/W от нормированного периода решётки T/W , а также кривые D_1/BWS и D_0/BWS , которые могут быть полезны для выбора D на практике по измеренным значениям BWS. Усреднённое значение D_1/BWS в диапазоне нормированных периодов T/W от 3 до 50 равняется 0,73, а усреднённое значение D_0/BWS — 0,84. Зависимость ширины обратного ската от периода (кривая BWS/W) показывает расширение области отклонения от идеального рельефа с увеличением периода, что требует расширения линий контурной маски. Выбор оптимальной ширины D на практике должен основываться на требованиях конкретной задачи в отношении нулевого порядка дифракции.

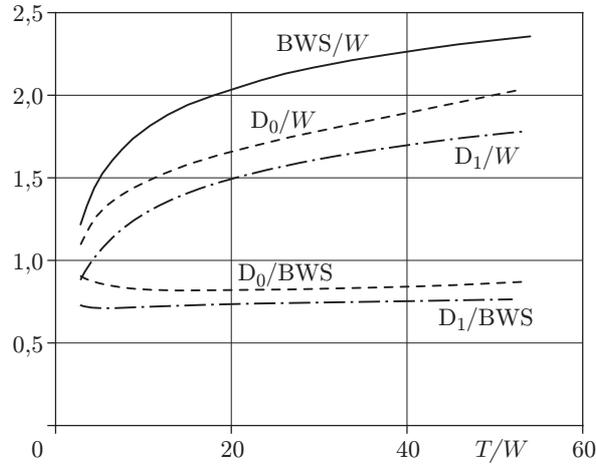


Рис. 3. Зависимости нормированных значений ширины линий ПКМ, оптимизированных по максимуму DE_1 (D_1/BWS и D_1/W) или по минимуму DE_0 (D_0/BWS и D_0/W), и зависимость нормированной ширины обратного ската BWS/W от нормированного периода решётки

На рис. 4 показана зависимость DE_1 от периода линейных решёток, рассчитанная с указанными выше параметрами W и Δx для различных методов оптимизации рельефа в целях повышения дифракционной эффективности. Зависимость для обычной прямой лазерной записи без применения оптимизации или контурной маски представлена кривой DLW. Кривая ОКМ для метода оптимизированной контурной маски построена для ширины линий ПКМ, оптимизированных для достижения максимума DE_1 . Для сравнения на этом рисунке даны кривые ОКМ1 и ОКМ2, рассчитанные для случаев использования метода с объёмной контурной маской [6], приводящего к формированию рельефа, показанного на рис. 2, с. Метод ОКМ1 соответствует $D = BWS$, а ОКМ2 — $D = 0,4BWS$. Коэффициент 0,4 найден по профилограмме рельефа и ширине контурной маски, приведённым в [6]. При-

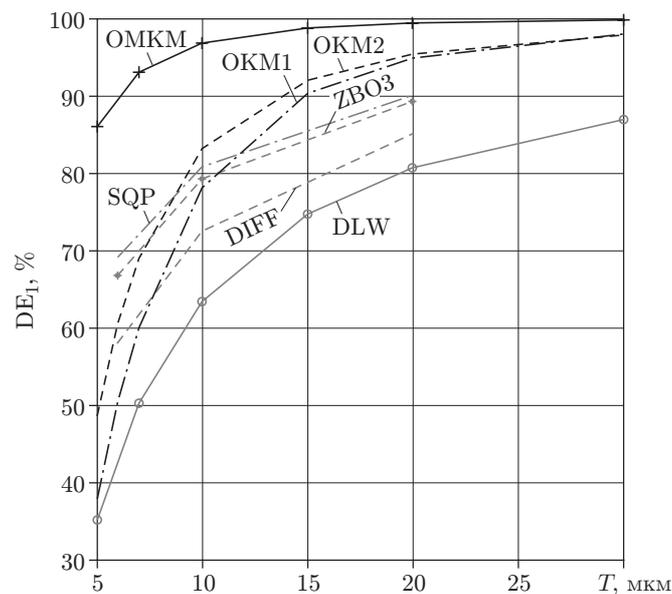


Рис. 4. Зависимость DE_1 от периода решётки для различных методов увеличения дифракционной эффективности ДОО с кусочно-непрерывным рельефом

рост DE_1 в результате проведённой нами оптимизации составил от 2 до 37 % в зависимости от периода решётки. На рис. 4 показаны также зависимости DE_1 для линейных решёток с периодами 6, 10 и 20 мкм, полученные в работах [12, 14] путём оптимизации распределения экспозиции различного типа. Кривая DIFF соответствует разностному алгоритму (Differential Algorithm) [12], кривая SQP (Sequential Quadratic Programming) — оптимизации с применением последовательного квадратичного программирования [12], ZBO3 (Zone Boundary Optimization) — методу приграничной оптимизации с трёхступенчатой передаточной функцией [14]. Сравнение зависимостей на рис. 4 демонстрирует существенное преимущество предлагаемого оптимизированного метода контурной маски перед всеми рассмотренными методами.

3. Упрощённая экспериментальная проверка ОМКМ проведена на растянутом в горизонтальной плоскости рельефе в фоторезисте, сформированном полностью путём прямой лазерной записи на установке CLWS-300IAE [11]. Сглаженный рельеф на рис. 2, *b* был заменён треугольным (рис. 5, *a*) с обратным скатом, имеющим наклон более крутой, чем рабочая часть дифракционной зоны. Треугольная форма рельефа выбрана потому, что она существенно проще реализуется в программном обеспечении круговой лазерной записывающей системы CLWS-300IAE. Форма, получаемая методом контурной маски, эмулировалась также с помощью прямой лазерной записи в виде выемки с плоским дном (рис. 5, *b*).

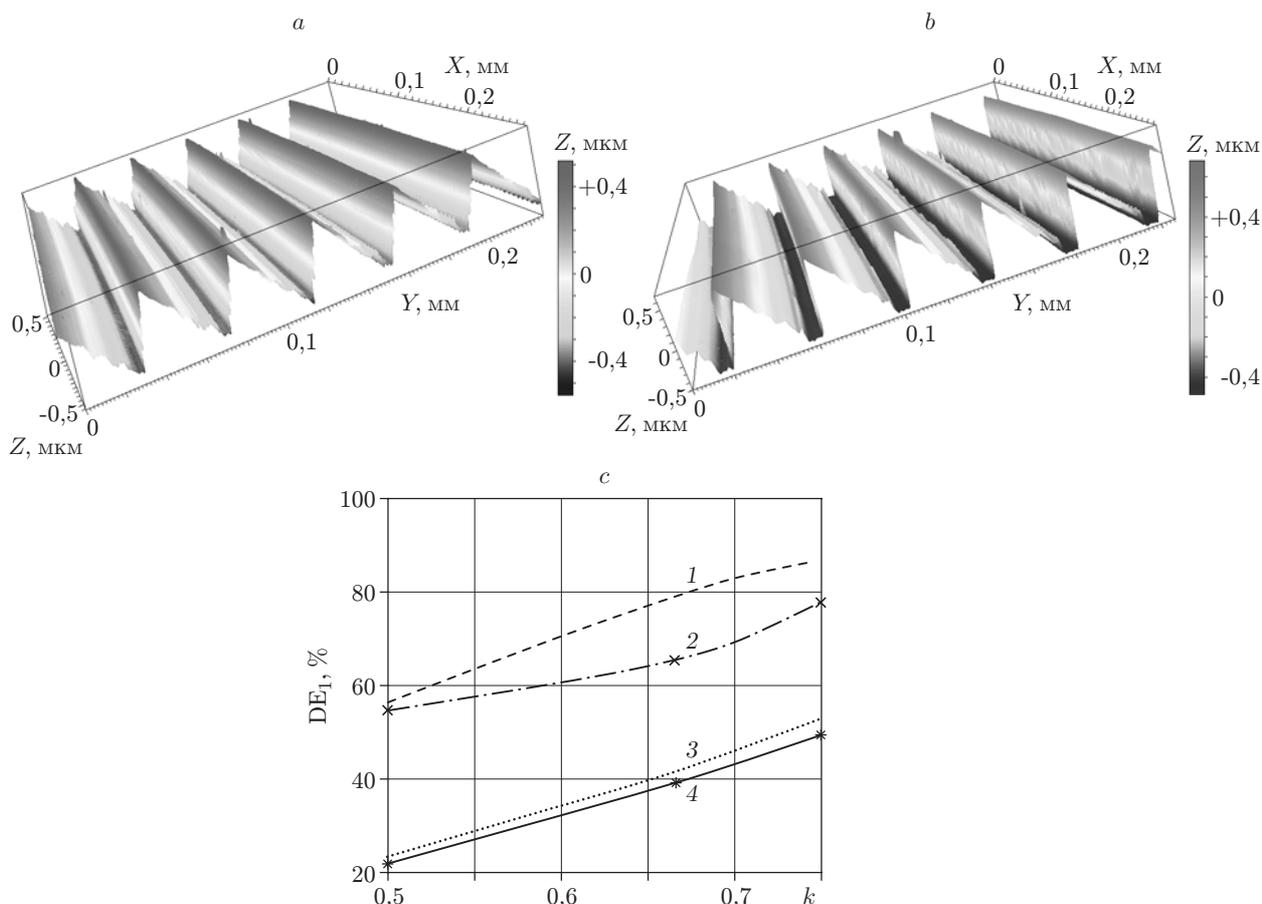


Рис. 5. Профилограммы двух вариантов экспериментально изготовленного профиля для проверки метода: *a* — треугольный рельеф; *b* — рельеф с выемкой, эмулирующей результат действия ПКМ; *c* — зависимости $DE_1(k)$ (кривые 1, 2 — линии для рельефа с выступом, 3, 4 — для треугольного рельефа; 1, 3 — расчётные данные, 2, 4 — экспериментальные данные)

Инверсия рельефа не влияет на дифракционную эффективность решётки. Масштабирование рельефа в горизонтальной плоскости было необходимо для упрощения характеристики формы рельефа с использованием профилометра — интерферометра белого света WLI (фирма "Breitmeier Messtechnik GmbH", Германия).

На рис. 5, *c* даны расчётная и измеренная дифракционные эффективности для этого рельефа в зависимости от k — отношения ширины рабочей части дифракционных зон к их периоду. Экспериментальные результаты демонстрируют существенное увеличение дифракционной эффективности решётки с выемкой, показанной на рис. 5, *b*, по сравнению с решёткой на рис. 5, *a*.

4. Влияние ошибок процесса изготовления ДОО на дифракционную эффективность. Для реального применения предложенного метода необходимо знать его чувствительность к ошибкам, возникающим при выполнении этапов технологического процесса. Далее приведены результаты моделирования влияния трёх основных специфических погрешностей: ширины линий контурной маски, совмещения контурной маски с границами дифракционных зон и глубины травления. Параметры модели были выбраны такие же, как и в разд. 2. Однако для общности результатов ошибки изготовления и периоды решёток T , для которых проводятся вычисления, даются нормированными на диаметр записывающего пучка W . Моделирование проводилось для нормированных периодов решёток T/W , изменяющихся от 3 до 36.

Для удобства сравнения влияния ошибок изготовления на дифракционную эффективность в нулевом и первом порядках дифракции далее вместо DE_1 будет использоваться относительное падение эффективности dDE_1 , определяемое следующим образом:

$$dDE_1 = (DE_1 - \max(DE_1)) / \max(DE_1),$$

где $\max(DE_1)$ — максимум DE_1 для данного периода решётки, найденный при отсутствии ошибок. Зависимость DE_1 , при которой $dDE_1 = 0$, от периода линейной решётки показана кривой ОКМ на рис. 4.

4.1. *Ошибка ширины линий контурной маски D* может быть вызвана несколькими причинами: технологией, ошибкой расчёта D по ошибочно измеренной BWS, невозможностью записи ПКМ с расчётной $D(T)$ для ДОО со сложной топологией. На рис. 6, *a, b* приведены зависимости DE_0 и dDE_1 от нормированной ширины линий контурной маски D/W при различных T/W . По положениям экстремумов этих кривых построены графики для зависимостей D_1/BWS , D_0/BWS , D_1/W и D_0/W от T/W , показанных на рис. 3. На первый взгляд, зная диаметр записывающего пучка W , можно по этим графикам определить зависимость $D(T)$ для записи конкретной ПКМ. Однако процесс жидкостного проявления фоторезиста приводит к росту BWS по отношению к его величине для распределения поглощённой энергии света. Поэтому для определения реальной зависимости $D(T)$ необходимо измерить ширину обратного ската BWS как расстояние между положениями максимума и минимума профиля у границ дифракционных зон с различными периодами. Это может быть осуществлено с помощью электронной или атомно-силовой микроскопии. При увеличении периода идентифицировать экстремумы рельефа становится трудно. Но фактически при $T/W > 10$ ширину линий контурной маски можно не менять, так как экстремумы зависимостей дифракционной эффективности становятся слабо выраженными (см. рис. 6, *a, b*).

Анализ кривых на рис. 6 показывает, что ошибка D до $\pm 20\%$ позволяет сохранить DE_0 ниже 1%. При этом относительное падение dDE_1 не превысит 2,5%, что особенно важно для применений, связанных с построением изображения и аксиально-симметричных ДОО. К ошибке величины D наиболее чувствительны решётки с периодом до $6W$.

4.2. *Погрешность совмещения.* Расчёт зависимостей DE_0 (рис. 7, *a, c*) и DE_1 (рис. 7, *b, d*) от нормированной на W погрешности dS совмещения ПКМ и полутонного

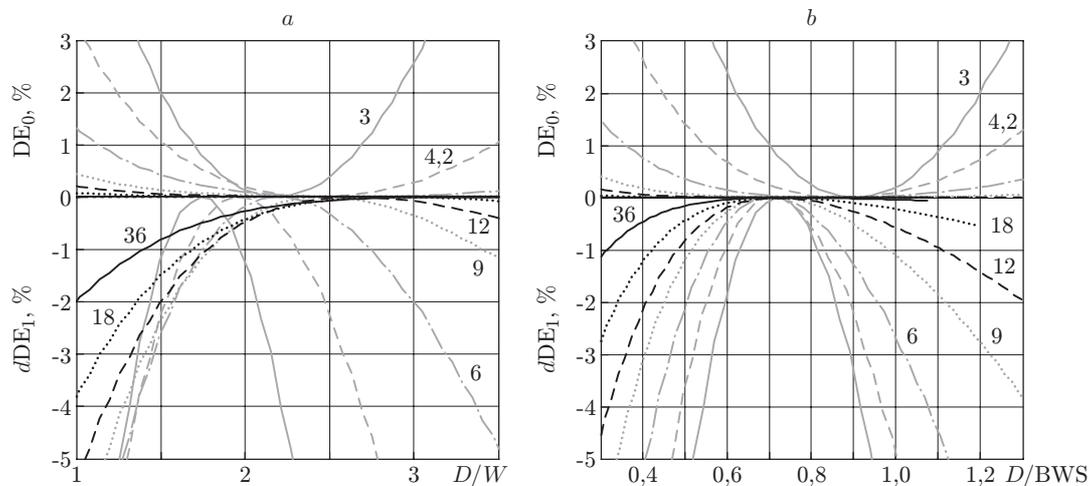


Рис. 6. Зависимости dDE_1 (кривые ниже 0 по оси ординат) и DE_0 (кривые выше 0 по оси ординат): от D/W (a) и D/BWS (b) для T/W от 3 до 36

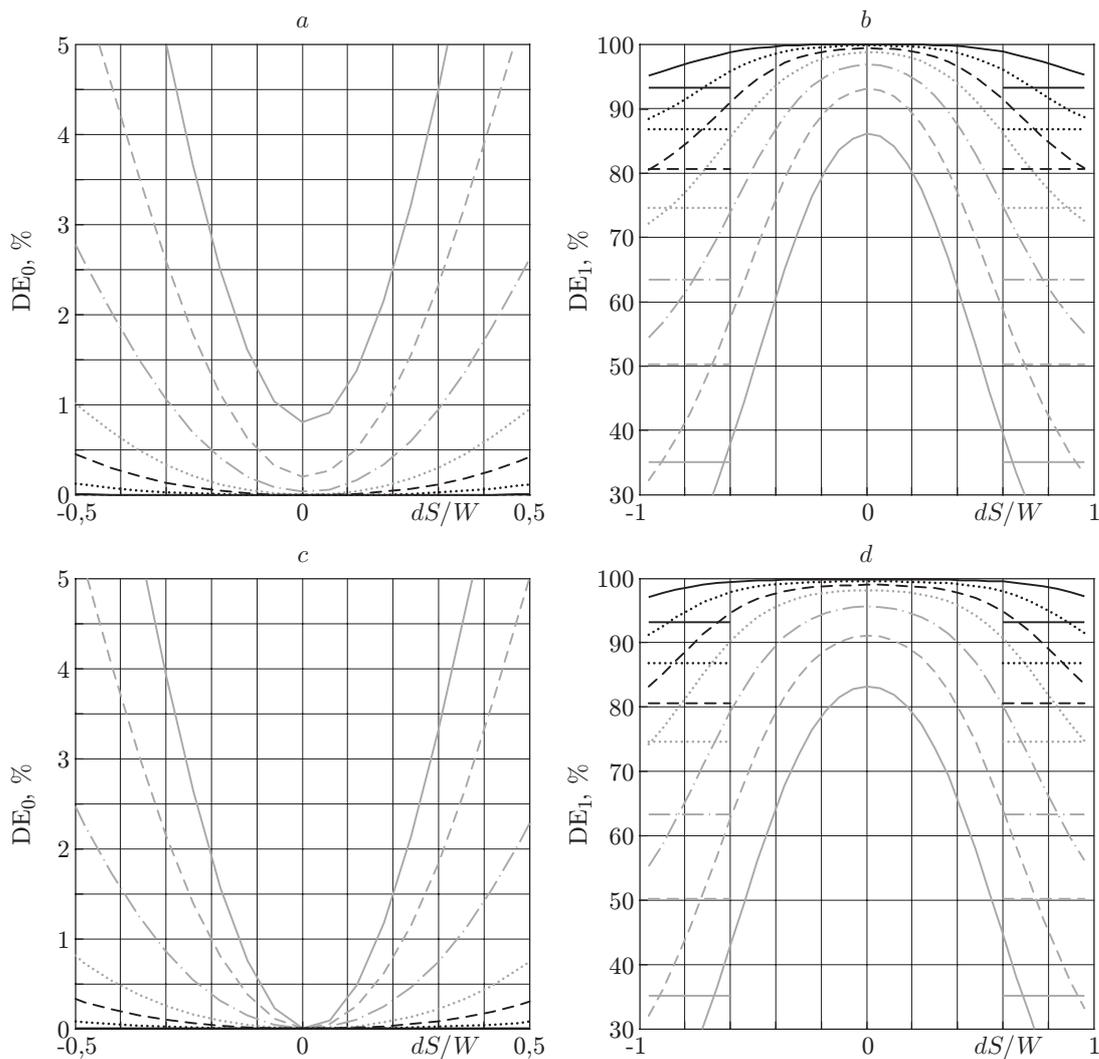


Рис. 7. Зависимости DE_0 и DE_1 от относительной ошибки совмещения при различной величине T/W (обозначения кривых см. на рис. 6): ширина линий ПКМ равна D_1 (a, b) и D_0 (c, d)

распределения экспозиции проводился для величины D/W , оптимизированной для достижения максимума DE_1 (см. рис. 7, *a, b*) и минимума DE_0 (см. рис. 7, *c, d*). Анализировались решётки, имеющие нормированный период T/W от 3 до 36. На рис. 7, *b, d* отрезками горизонтальных линий такого же типа, как и кривые, показаны величины DE_1 для решёток, сформированных без контурной маски. Нормировка ошибки совмещения на диаметр записывающего пятна оправдана тем, что для изготовления контурной маски будет использоваться то же устройство, что и для полутонного экспонирования резиста. Подсистема совмещения также может применять записывающий световой пучок для поиска меток совмещения, и её точность будет зависеть от диаметра этого пучка. Если ошибка совмещения не превышает $\pm 10\%$ диаметра пучка, то увеличение DE_0 не превысит $0,7\%$, а падение DE_1 — 2% . При увеличении ошибки до $\pm 20\%$ DE_0 резко возрастёт до $2,1\%$, а падение DE_1 достигнет 6% для малых периодов. Такие изменения уже могут рассматриваться как критические для некоторых применений. Из рис. 7, *c, d* следует, что при оптимизации по минимуму нулевого порядка чувствительность к ошибкам совмещения уменьшается особенно для DE_1 . Но платой за это, как следует из рис. 6, является падение DE_1 до 3% для $T/W = 3$. Таким образом, никакого выигрыша не достигается. Из рис. 7, *b, d* следует, что если ошибка совмещения превышает $0,6$ ширины линий контурной маски, то её применение становится малоэффективным.

4.3. *Ошибка глубины травления.* При переносе кусочно-непрерывного рельефа ДОО из плёнки фоторезиста в подложку время травления выбирается достаточным для того, чтобы рельеф полностью перешёл в материал подложки. Превышение этого времени не оказывает особого влияния на форму рельефа. В случае использования контурной маски выбор момента окончания травления становится критическим параметром, который может привести к ошибке выполнения выступа, образуемого контурной маской. Под ошибкой травления здесь понимается относительное отклонение $\Delta H/H$ высоты выступов, сформированных контурной маской на границе дифракционных зон, от расчётного значения H (см. рис. 2). При этом предполагается, что рабочая наклонная часть дифракционных зон имеет расчётный наклон. Как и в разд. 4.2, расчёты велись для D/W , оптимизированной как по максимуму DE_1 (рис. 8, *a*), так и по минимуму DE_0 (рис. 8, *b*).

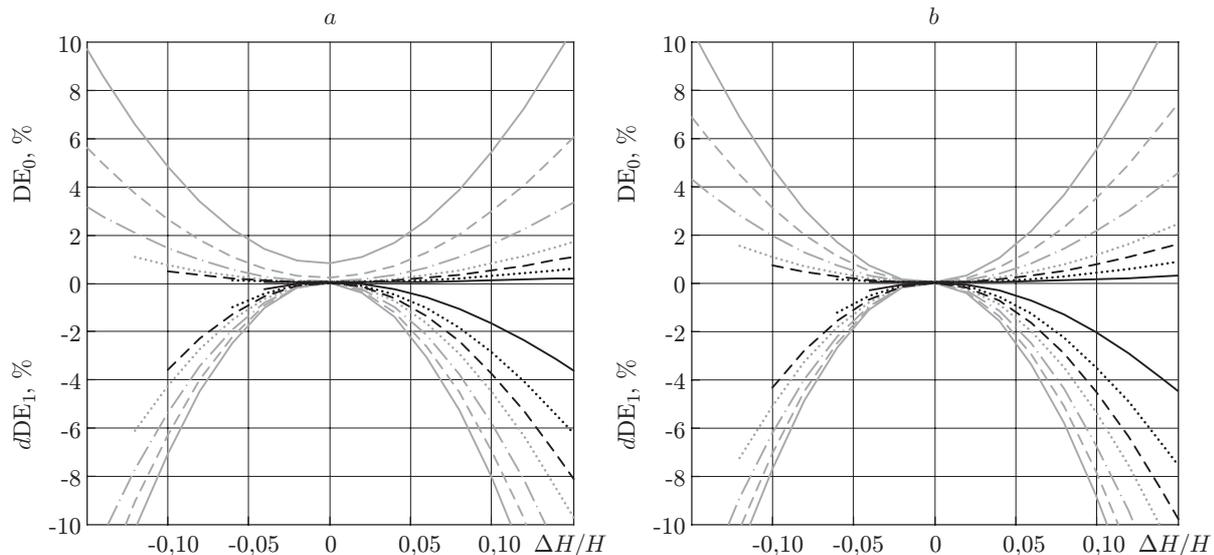


Рис. 8. Зависимости dDE_1 (кривые ниже 0 по оси ординат) и DE_0 (кривые выше 0 по оси ординат) от ошибки $\Delta H/H$ для T/W от 3 до 36 (обозначения кривых см. на рис. 6): ширина линий ПКМ равна D_1 (*a*) и D_0 (*b*)

На практике изменение скорости травления от загрузки к загрузке может достигать $\pm 5\%$, что приводит к аналогичной ошибке $\Delta H/H$. Из рис. 8 следует, что такая ошибка приведёт к увеличению DE_0 до $1,5\%$ и падению DE_1 почти до 3% . Влияние ошибки уменьшается только при $T/W > 12$. В связи с этим правильное определение момента окончания травления является критическим параметром предлагаемого метода.

Заключение. Метод контурной маски сочетает преимущества аналоговых и бинарных процессов. Он позволяет резко увеличить дифракционную эффективность в первом порядке дифракции и сократить интенсивность нулевого порядка. Средняя оптимальная ширина линий контурной маски равна $0,72$ от ширины обратного ската для получения максимума первого порядка и $0,85$ — минимума нулевого порядка.

Анализ чувствительности ОМКМ к ошибкам изготовления показывает, что отклонение ширины линий ПКМ от расчётных значений может достигать $\pm 20\%$. Ошибка совмещения по возможности не должна превышать $\pm 10\%$ диаметра экспонирующего резист пучка. Наиболее критичной является ошибка глубины травления, которая не должна превышать $\pm 5\%$ глубины идеальной решётки. Указанные допуски лежат в рамках возможностей технологических процессов и оборудования микроэлектронного производства. Проблема контроля глубины травления может быть решена следующим образом. Измерение глубины H кусочно-непрерывного дифракционного рельефа производится по так называемой «аппроксимированной глубине» [16]. Корректная глубина травления через ПКМ определяется с помощью тестовой бинарной структуры, размещённой рядом с рабочей областью ДОО. Максимум и минимум экспозиции для записи тестовой структуры должны быть такими же, как для записи основного кусочно-непрерывного рельефа. Ширина плоских верхней и нижней частей теста должна быть не менее $10W$ и достаточно большой для надёжного измерения с помощью профилометра. Момент окончания травления определяется как время полного удаления фоторезиста с выступов тестовой структуры.

Метод контурной маски может быть применён как для фотолитографических технологий, так и для прямой лазерной записи по фоторезисту. По принципу работы ОМКМ близок к идее оптимизации границ дифракционных зон при прямой лазерной записи [13]. Проектировать контурную маску можно с помощью подходов, описанных в работе [13] для расчёта ступенчатой передаточной функции при оптимизации распределения экспозиции, создаваемого прямой лазерной записью по фоторезисту. При реализации ОМКМ на установках прямой записи необходимо использовать ПКМ с пониженным коэффициентом отражения, чтобы уменьшить её влияние на систему автофокусировки лазерного пучка. Оптимизированный метод контурной маски может быть также применён при увеличении дифракционной эффективности управляемых динамических голограмм с асимметричным профилем дифракционных зон [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спектор Б. И. Об одном методе синтеза фазовой структуры киноформов // Автометрия. 1985. № 6. С. 34–38.
2. Пальчикова И. Г., Рябчун А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка // Автометрия. 1985. № 6. С. 38–42.
3. Корольков В. П., Малышев А. И., Никитин В. Г и др. Полутонные фотошаблоны на основе LDW-стекло // Автометрия. 1998. № 6. С. 27–37.
4. Полещук А. Г. Изготовление элементов дифракционной оптики с помощью полутонной и фоторастровой технологий // Автометрия. 1991. № 3. С. 66–76.
5. Gale M. T., Rossi M., Pedersen J., Schuetz H. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists // Opt. Eng. 1994. **33**, N 11. P. 3556–3566.

6. **Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Shimansky R. V.** Optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements // Proc. SPIE. 2007. **6732**. 67320P.
7. **Pat. 6930834 US.** Method of manufacturing diffractive optical element /M. Ogusu, Y. Iwasaki. Publ. August 16, 2005.
8. **Wolf S.** Silicon Processing for the VLSI Era. Sunset Beach, USA: Lattice Press, 2002. Vol. 4: Deep-Submicron Process Technology. Ch. 8 Chemical mechanical polishing. P. 313–432.
9. **Корольков В. П.** Применение контурной маски для повышения дифракционной эффективности ДОО с кусочно-непрерывным рельефом // Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013»: Сб. матер. Новосибирск: СГГА, 2013. С. 20–24.
10. **Korolkov V. P., Poleshchuk A. G., Veiko V. P. et al.** Study of microstructure topography and hardness evolution at direct laser writing on chrome films // Abstr. Intern. Conf. "Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies" (FLAMN-10). St.-Petersburg, Russia, July 5–8, 2010. P. 90–91.
11. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P., Korolkov V. P.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. **38**, N 8. P. 1295–1301.
12. **Hessler T., Rossi M., Kunz R. E., Gale M. T.** Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements // Appl. Opt. 1998. **37**, N 19. P. 4069–4079.
13. **Korolkov V. P., Pruss C., Reichelt S., Tiziani H. J.** Preliminary results in investigation of diffractive high-efficiency objectives // Компьютерная оптика. 2002. Вып. 23. С. 33–39.
14. **Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Shimansky R. V.** Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements // Appl. Opt. 2006. **45**, Is. 1. P. 53–62.
15. **Корольков В. П., Остапенко С. В.** Характеризация профилограмм кусочно-непрерывного дифракционного микрорельефа // Оптический журнал. 2009. **76**, № 7. С. 34–41.
16. **Венедиктов В. Ю.** Тонкие динамические голограммы с асимметричным профилем штриха решётки // Автометрия. 2012. **48**, № 2. С. 12–19.

Поступила в редакцию 6 мая 2013 г.
