

УДК 681.2-2; 681.7.034; 621.794.4; 533.924; 621.7-4

## Влияние скин-эффекта на структуру рельефно-фазовых оптических элементов, получаемых методом плазмохимического травления

© 2019 г. **С. Б. Одинокоев\***, доктор техн. наук; **Г. Р. Сагателян\***, доктор техн. наук;  
**М. С. Ковалев\***, канд. техн. наук; **К. Н. Бугорков\*\***

\*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва

\*\*Филиал Центра эксплуатации элементов наземной инфраструктуры — Научно-исследовательский институт прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова, Москва

E-mail: odinokov@bmstu.ru

Поступила в редакцию 07.05.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-09-78-86

Рассмотрены особенности явлений, протекающих при выполнении операции плазмохимического травления оптического стекла на установке с индуктивно связанной плазмой в технологическом процессе изготовления рельефно-фазовых оптических элементов, приводящих к неравномерному разрушению металлической (хромовой) маски. Показано, что при изготовлении таких элементов, характеризующихся весьма значительной вариацией ширины участков металлической маски, необходимо учитывать неравномерность плотности наведенных в маске — тонкопленочном проводнике, вихревых токов, вызванных применением высокочастотного разряда. Аналитически обосновано, что причиной неравномерности разрушения маски-проводника является скин-эффект, обуславливающий вследствие неравномерности нагрева неодинаковость процессов адсорбции и десорбции химически активных частиц по контуру и в сердцевинной части маски. Получены эпюры распределения амплитудных значений напряженности индуцированного электрического поля в направлении, поперечном относительно вектора напряженности, которые свидетельствуют о том, что если на относительно узких участках маски (шириной 1–2 мкм) последствия скин-эффекта не превышают 2%, то на относительно широких участках (шириной 10–20 мкм) скин-эффект приводит к различию в условиях протекания химических реакций на кромочных участках маски и в их средней части примерно в 5 раз.

**Ключевые слова:** дифракционные оптические элементы, плазмохимическое травление, маска, хром, скин-эффект, хемосорбция, десорбция.

**Коды OCIS:** 160.2750, 220.4000, 240.6700

При изготовлении деталей дифракционной оптики, содержащих функциональный микрорельеф на рабочих поверхностях, широко применяется метод плазмохимического травления (ПХТ) [1–5]. Функциональный рельеф формируется благодаря наличию маски, защищающей не подлежащие вытравливанию участки рабочей поверхности [6]. При обработке методом ПХТ оптического стекла обычно применяют металлические маски [7], поскольку они для соответствующих технологических условий являются химически более стойкими по сравнению с масками из фоторезистов, имеющими широкое применение в микроэлектронике

при ПХТ монокристаллического кремния [8]. Наиболее технологичным и часто используемым материалом металлической маски является хром [9], поскольку в микроэлектронике разработан состав для его жидкостного травления [10] при получении требуемого узора методами фотолитографии [11].

Основной функциональной характеристикой является обеспечиваемая металлической маской селективность травления [12, 13] оптического стекла относительно нее. Очевидно, что эта селективность определяется, прежде всего, химической стойкостью материала маски [14]. В целом, хром является химически стойким материалом.

Поскольку при ПХТ оптического стекла в качестве активного газа применяются соединения фтора — элегаз  $\text{SF}_6$  [15], фреон  $\text{CF}_4$  [16] и др., то под химической стойкостью хрома следует понимать затрудненность создания соединений хрома со фтором. Несмотря на достаточно специфические условия, необходимые для создания таких соединений методами обычной химии [17], в работе [18] экспериментально показано, что при ПХТ оптического стекла разрушение хромовой маски происходит именно за счет их образования.

В настоящее время операции ПХТ выполняют на установках с индуктивно связанной плазмой (ИСП) [19], которая формируется в переменном электромагнитном поле радиочастотного диапазона (чаще всего при частоте  $f = 13,56$  МГц), создаваемом антенной обычно в форме плоской спирали [20]. Обрабатываемая заготовка размещается внутри этого поля и благодаря электропроводности материала маски в ней наводятся соответствующие вихревые токи. Эти токи осуществляют нагрев маски, представляющей собой тонкую металлическую пленку, что не может не повлиять на характер химического взаимодействия поверхности маски с атомами и ионами фтора, попадающими на обрабатываемую поверхность из объема плазмы.

Часть типовых деталей дифракционной оптики представляет собой дифракционные решетки [21], т.е. конфигурации, набранные из простых элементов — линий. Такие конфигурации характеризуются постоянством площади поперечного сечения проводника и, соответственно, равномерным нагревом материала маски. Однако целый ряд деталей дифракционной оптики обеспечивает формирование изображений (например, прицельного знака [22], других фигур [23]) сложным двухуровневым узором рабочей поверхности. Такие узоры характеризуются переменной шириной проводника по всей подлежащей ПХТ поверхности.

Неравномерность ширины проводника приводит к неравномерному нагреву поверхности маски, что, в свою очередь, должно приводить к неравномерности распределения скорости соответствующих химических реакций и, как следствие, к неравномерному разрушению маски с искажением полученного в кварцевом стекле узора относительно узора, заданного конфигурацией маски. Однако неравномерность химического разрушения металлической маски, возникающая вследствие неравномерного нагрева, обусловленного неравномерностью распределения токов, наводимых ИСП, до настоящего времени не исследовалась.

Целью настоящей работы являлось установление особенностей неравномерности химического разрушения металлической маски при ПХТ на основе анализа распределения наводимых ИСП то-

ков с выдачей соответствующих рекомендаций по созданию узоров двухуровневой рабочей поверхности деталей дифракционной оптики.

## ТЕОРИЯ

Рассмотрим проводник в форме тонкой призмы, находящийся в переменном электромагнитном поле, характеризуемом напряженностью электрического поля  $E_{PCE}$  и скоростью ее изменения  $dE_{PCE}/dt$  (рис. 1). Это поле вызывает протекание в проводнике тока  $I$ .

Вокруг проводника с током имеется магнитное поле индукцией  $B$ , силовые линии которого являются concentрическими окружностями с центром на оси проводника. В результате изменения силы тока соответственно изменяется и индукция магнитного поля, но форма силовых линий при этом остается прежней. Поэтому в каждой точке внутри и снаружи проводника производная  $\partial B/\partial t$  направлена по касательной к линии индукции магнитного поля и, следовательно, линии  $\partial B/\partial t$  также являются окружностями, совпадающими с линиями индукции магнитного поля.

Индукция магнитного поля изменяется по закону электромагнитной индукции Фарадея (третье уравнение Максвелла) в системе СИ

$$\text{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля, В/м,  $B$  — магнитная индукция, Тл, и создает индуцированное электрическое поле  $E$ , силовые линии которого представляют замкнутые кривые (окружности) вокруг линий индукции (силовых линий) магнитного поля. Вектор напряженности  $E$  индукционного поля в более близких к оси проводника областях направлен противоположно вектору напряженности  $E_{PCE}$  электромагнитного поля,

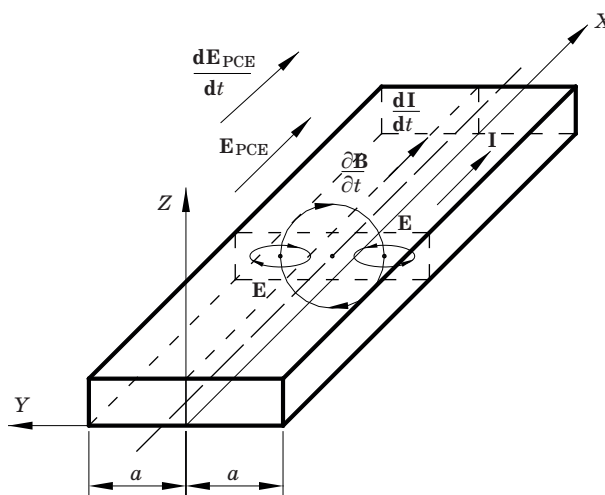


Рис. 1. Схема проявления скин-эффекта при ПХТ.

создающего ток  $I$ , а в более дальних — совпадает с ним. В результате плотность тока уменьшается в приосевых областях и увеличивается вблизи периферии проводника, т.е. возникает скин-эффект.

Составим уравнение, описывающее указанный скин-эффект. Для этого запишем четвертое уравнение Максвелла (теорему о циркуляции магнитного поля) для изотропной и однородной среды без дисперсии в системе СИ

$$\text{rot}\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  — магнитная постоянная, Гн/м,  $\mu$ ,  $\varepsilon$  — относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости материала маски (хрома),  $\mathbf{j}$  — плотность тока проводимости, А/м<sup>2</sup>,  $c$  — скорость света в вакууме, м/с.

В правой части уравнения (2) вторым слагаемым в рамках рассматриваемых условий (материал маски — металл) можно пренебречь. Следовательно, это уравнение принимает вид

$$\text{rot}\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}. \quad (3)$$

Одновременно по закону Ома имеем

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad (4)$$

где  $\sigma$  — удельная проводимость среды (металла), (Ом м)<sup>-1</sup>.

Подставляя выражение (4) в (3) и дифференцируя обе части полученного уравнения по времени, находим

$$\text{rot} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (5)$$

С учетом уравнения (1) выражение (5) запишется в виде

$$-\text{rot} \text{rot} \mathbf{E} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (6)$$

Поскольку

$$\text{rot} \text{rot} \mathbf{E} = \text{grad} \text{div} \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E}, \quad (7)$$

то, воспользовавшись первым уравнением Максвелла (законом Гаусса) в предположении отсутствия стороннего электрического заряда, так как в высокочастотной ИСП положительные и отрицательные заряды уравновешены, имеем

$$\text{div} \mathbf{E} = 0. \quad (8)$$

Тогда на основании уравнений (6)–(8) окончательно получаем

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (9)$$

Предположим, что ток течет по однородному бесконечному тонкому проводнику, занимающему область  $a > Y > -a$  вдоль оси  $X$ . Поверхностями

проводника являются плоскости  $Y = a$  и  $Y = -a$ . Таким образом

$$j_X = j_X(y, t), j_Y = j_Z = 0, \\ E_X = E_X(y, t), E_Y = E_Z = 0. \quad (10)$$

Тогда уравнение (9) приобретает вид

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}_X}{\partial t}. \quad (11)$$

Общее решение уравнения (11) имеет вид

$$E_X = A_1 \exp(-ky) + A_2 \exp(ky), \quad (12)$$

где

$$k = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \sigma \omega}{2}} + \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \sigma \omega}{2}} i, \quad (13)$$

причем  $\omega$  — круговая частота электромагнитного поля, создаваемого антенной в ИСП.

В основе уравнений (11) и (12) — гармоническая зависимость  $\mathbf{E}$  от  $t$

$$E_X(y, t) = E_0(y) \exp(i\omega t). \quad (14)$$

Поскольку нас не интересуют особенности зависимости  $\mathbf{E}$  от  $t$ , описывающие мгновенные значения напряженности  $E_X$  в любой момент времени  $t$ , а задача состоит в оценке распределения лишь амплитудных значений напряженности  $E_X$  от координаты  $y$  проводника, то в формуле (13) будем учитывать лишь действительную часть.

Постоянные интегрирования  $A_1$  и  $A_2$  могут быть определены из граничных условий, заключающихся в том, что при  $Y = a$  и  $Y = -a$   $E_X = E_0$ . То есть

$$\begin{cases} E_0 = A_1 \exp(-ka) + A_2 \exp(ka) \\ E_0 = A_1 \exp(ka) + A_2 \exp(-ka) \end{cases}. \quad (15)$$

Решая систему уравнений (15) относительно  $A_1$  и  $A_2$ , получаем

$$A_1 = A_2 = \frac{E_0}{\exp(-ka) + \exp(ka)}. \quad (16)$$

Итоговая расчетная формула приобретает вид

$$E_X(y) = \frac{E_0}{\exp(-ka) + \exp(ka)} (\exp(-ky) + \exp(ky)). \quad (17)$$

В соответствии с формулой (4) плотность тока в проводнике пропорциональна напряженности электрического поля, рассчитываемой по формуле (17). Важно отметить, что на особенности реакций на поверхности маски в процессе ПХТ влияние оказывает не ток, протекающий по проводнику, а вызываемый этим током нагрев проводника. Температура в каждой точке проводника пропор-

циональна выделенной в ней электрической мощности, которая, в свою очередь, пропорциональна квадрату плотности тока, т.е. квадрату величины, вычисляемой по формуле (17).

Неблагоприятным процессом является истончение и последующее исчезновение маски вследствие протекания химических реакций между материалом маски и химически активными частицами (ХАЧ), образующимися в плазме из газовой смеси. Результаты протекания химических реакций, предопределяющиеся процессами адсорбции на поверхности маски и десорбции с нее ХАЧ, имеют ряд особенностей [24]. Так, доля подвергаемых хемосорбции ХАЧ из общего их потока на поверхность описывается коэффициентом прилипания  $s$ , который зависит от температуры  $T$  и доли  $\theta$  участков, уже покрытых адсорбентом

$$s(\theta, T) = s_0(T)(1 - \theta), \quad (18)$$

где  $s_0$  — начальный коэффициент прилипания при нулевой покрытости поверхности маски адсорбентом.

В свою очередь величина  $s_0$  обычно описывается следующей формулой:

$$s_0 = s_{00}(T)\exp(-W_{\text{ads}}/T), \quad (19)$$

где  $W_{\text{ads}}$  — потенциальный барьер, который необходимо преодолеть физически адсорбированной частице для того чтобы стать химически адсорбированной.

Множитель при экспоненте  $s_{00}$  уменьшается с повышением температуры, и такая зависимость  $s_{00}$  от  $T$  обусловлена тем, что, для того чтобы попасть в потенциальную яму, соответствующую хемосорбции, ХАЧ должна передать часть своей энергии поверхности. При повышении температуры поверхности эта передача затруднена. В итоге значение  $s_{00}$  изменяется в диапазоне от 1 до  $10^{-6}$ , что приводит в целом к сильной ниспадающей зависимости  $s_0$  от  $T$ , несмотря на то, что вторая компонента в формуле (19) возрастает с увеличением  $T$ .

Кроме адсорбции взаимодействие ХАЧ с поверхностью проводника характеризуется также процессом десорбции. Скорость десорбции связана с температурой поверхности следующей зависимостью:

$$K_{\text{desor}} = K_0 \exp(-W_{\text{ads}}/T), \quad (20)$$

где  $K_0$  — количество попыток ХАЧ «выбраться» из потенциальной ямы кривой адсорбции, определяемое частотой собственных колебаний адсорбированной частицы,  $W_{\text{ads}}$  — глубина потенциальной ямы адсорбции (физисорбции или хемосорбции).

Из выражения (20) можно видеть, что с увеличением температуры скорость десорбции ХАЧ с поверхности маски существенно возрастает.

Обобщая изложенное, можно утверждать, что интенсивность химических реакций взаимодей-

ствия ХАЧ с поверхностью металлической маски будет снижаться пропорционально четвертой степени величины  $E_X(y)$ , рассчитываемой по формуле (17), поскольку она обусловлена снижением адсорбции и повышением десорбции пропорционально повышению температуры поверхности проводника, а сама эта температура пропорциональна квадрату плотности тока, связанной с выражением (17) по формуле (4).

Неравномерность распределения хемосорбированных с учетом десорбции ХАЧ по поверхности маски из проводящего материала, предопределяющая неравномерность соответствующего химического разрушения маски, иллюстрируется графиками на рис. 2.

Графики, представленные на рис. 2, построены для маски из хрома толщиной 40 нм при частоте подаваемого на антенну переменного напряжения 13,56 МГц. Необходимые для расчета численные характеристики тонкой хромовой пленки взяты из источников [25, 26].

Из рассмотрения графиков на рис. 2 видно, что если на узких участках металлической маски (рис. 2а) вызываемые скин-эффектом последствия практически не оказывают влияния на ее химическое разрушение (разница в условиях протекания химических реакций поперек сечения проводника не превышает 2%), то на широких участках (рис. 2б) эти условия различаются в 5 раз. Таким образом, при рассмотрении ПХТ разнообразных дифракционных решеток, характеризующихся узкими защищаемыми маской участками равномерной ширины, явлением скин-эффекта можно пренебречь. В то же время, если узор рабочей поверхности дифракционного оптического элемента (ДОЭ) состоит из участков переменной ширины, достигающих десятки микрометров, следует учитывать реальную возможность неравномерного химического разрушения маски вследствие процессов, сопровождающих явления скин-эффекта (предполагается использование ИСП для реализации процесса ПХТ).

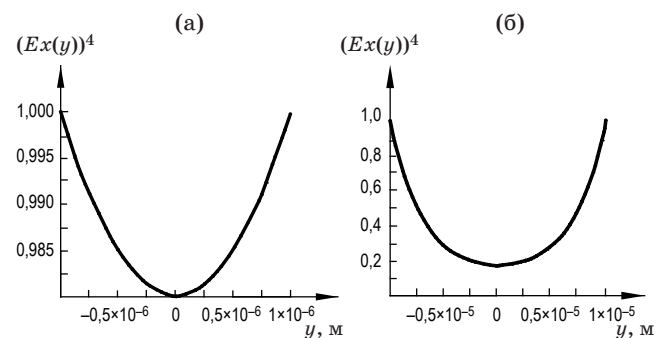


Рис. 2. Расчетные формы распределения химической стойкости проводящей маски в процессе ПХТ при ширине проводника (участка металлической маски) 2 (а) и 20 (б) мкм.



## ЭКСПЕРИМЕНТ

Дифракционные оптические элементы изготавливались на стандартных заготовках фотошаблонов (ФШ) для интегральных микросхем (ИМС) из стекла, содержащего до 15% оксидов натрия, калия, кальция, размером 127×127 мм при толщине хромового слоя 40 нм [26, 27]. Методом электронно-лучевой литографии [28] получали узор, обеспечивающий формирование прицельного знака [29]. Исходный узор рабочей поверхности ДОЭ представлен на рис. 3. Разрезанием ФШ ИМС получали образцы для ПХТ размером 20×20 мм.

На рис. 3б светлые области соответствуют оставшемуся после вытравливания хрома, исполняющему в дальнейшем при выполнении операций ПХТ целочного стекла (темные области на рис. 3б) роль металлической маски. Для выполнения операции ПХТ образцы укладывались на носитель из меди, переносимый из шлюза в рабочую камеру

и обратно с помощью манипулятора. В рабочей камере носитель закреплялся на столике, охлаждаемом проточной водой, и дополнительно охлаждался потоком гелия через отверстия в столике.

Экспериментальные исследования проводились на установке для ПХТ «Caroline 15 PE» [20, 30], формирующей с помощью планарной антенны ИСП на частоте 13,56 МГц. Плазмохимическое травление сопровождалось применением в качестве активного газа  $\text{CF}_4$  при следующих расходах компонентов газовой смеси:  $\text{CF}_4$  — 2,5 л/час,  $\text{O}_2$  — 1,0 л/час, Ar — 0,8 л/час, He (подача на столик) — 1,2 л/час. На антенну подавался сигнал мощностью 500 Вт. На столик сигнал не подавался, т.е. ПХТ проводилось без напряжения автосмещения, что соответствует чисто химическому удалению материалов образца и маски. В рабочей камере формировалось давление 0,08 Па.

Операция ПХТ состояла из предварительной кислородной очистки (КО), нескольких чередующихся переходов — собственно ПХТ и КО и окончательной КО [31]. При КО расходы газов были следующими:  $\text{O}_2$  — 2,5 л/час, Ar — 2,5 л/час, He (подача на столик) — 1,2 л/час. Продолжительность КО составляла 1–2 мин, продолжительность переходов собственно ПХТ 15–30 с.

На рис. 4 представлен один из характерных результатов операции ПХТ, проведенной при описанных выше условиях. Сплошные светлые поля (см. рис. 3) превратились в оконтуренные фигуры. Очевидно, что произошло протравливание хромовой маски в зонах, соответствующих уширениям конфигурации защитного узора.

Профилографическое исследование показало, что глубина травления стекла в области 1 составила 200–300 нм. Сравнение изображений, полученных в отраженном (рис. 4а) и проходящем (рис. 4б) свете, указывает на одинаковую прозрачность областей 1, 3 и 4. Это свидетельствует о полном удалении хрома в протравленных областях, а также указывает на то, что растущая одновременно с процессом травления пассивирующая пленка полимеризованного фреона являющаяся оптически прозрачной. Вместе с тем по контурам светлых полей (см. рис. 3б) хромовая маска сохранилась и воспринимается в виде светлых (рис. 4а) и темных (рис. 4б) линий. Оптическая непрозрачность темных линий на рис. 4б свидетельствует о том, что в пределах этих линий практически сохранена исходная толщина хромового покрытия.

Структура, представленная на рис. 4, сформировалась при относительно большой продолжительности процесса ПХТ. В целях выяснения особенностей самого процесса химического разрушения хромовой маски были реализованы процессы ПХТ малой продолжительности — один процесс

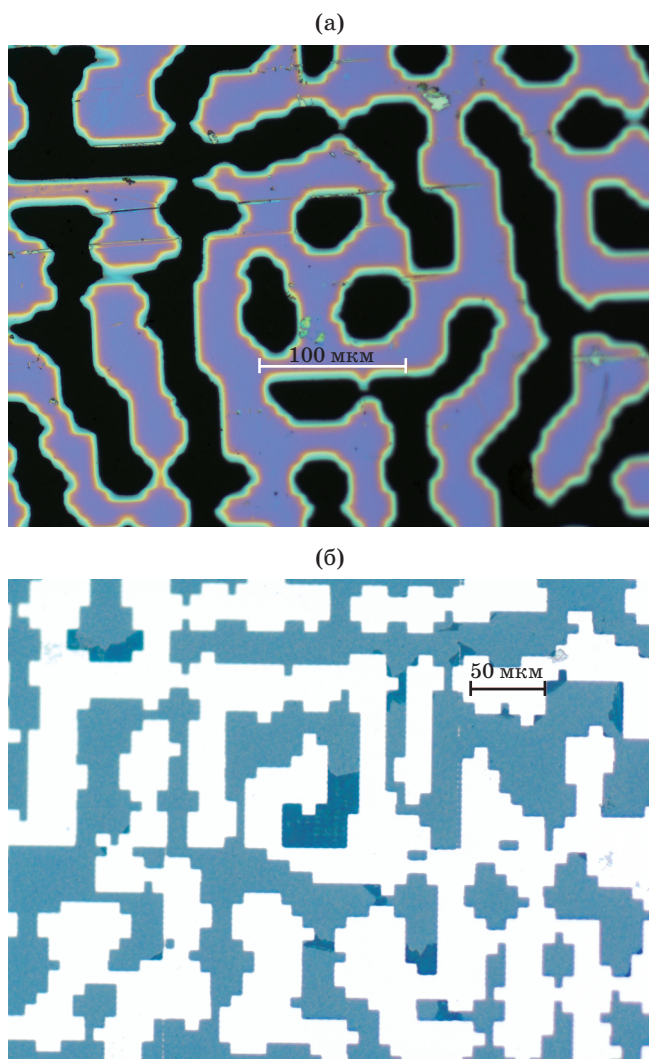
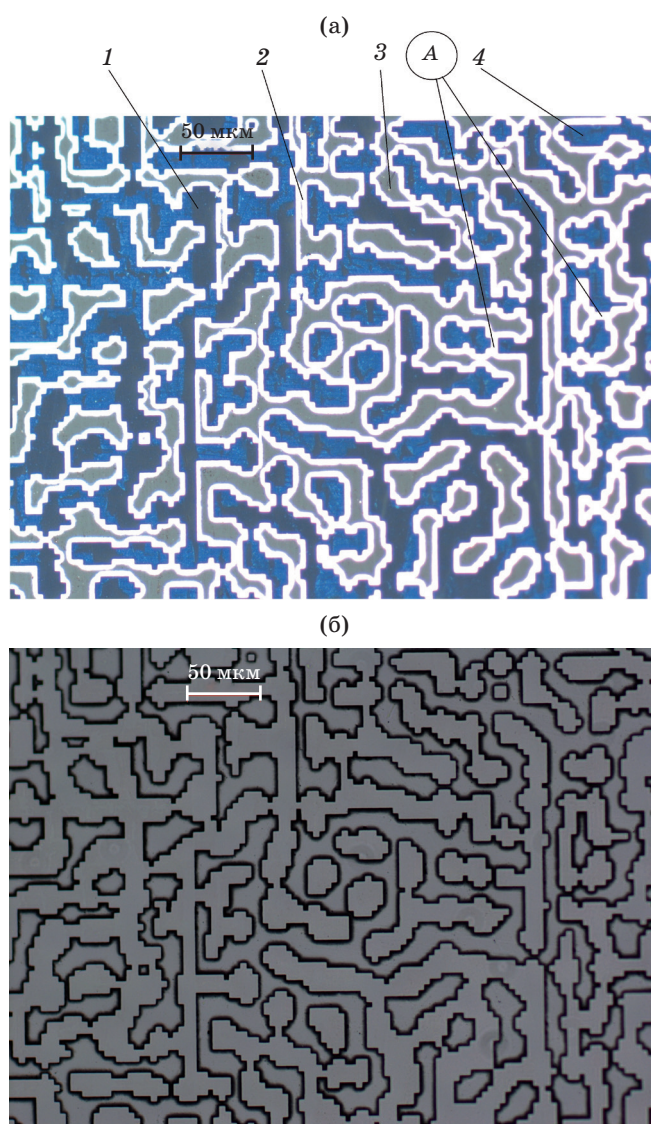


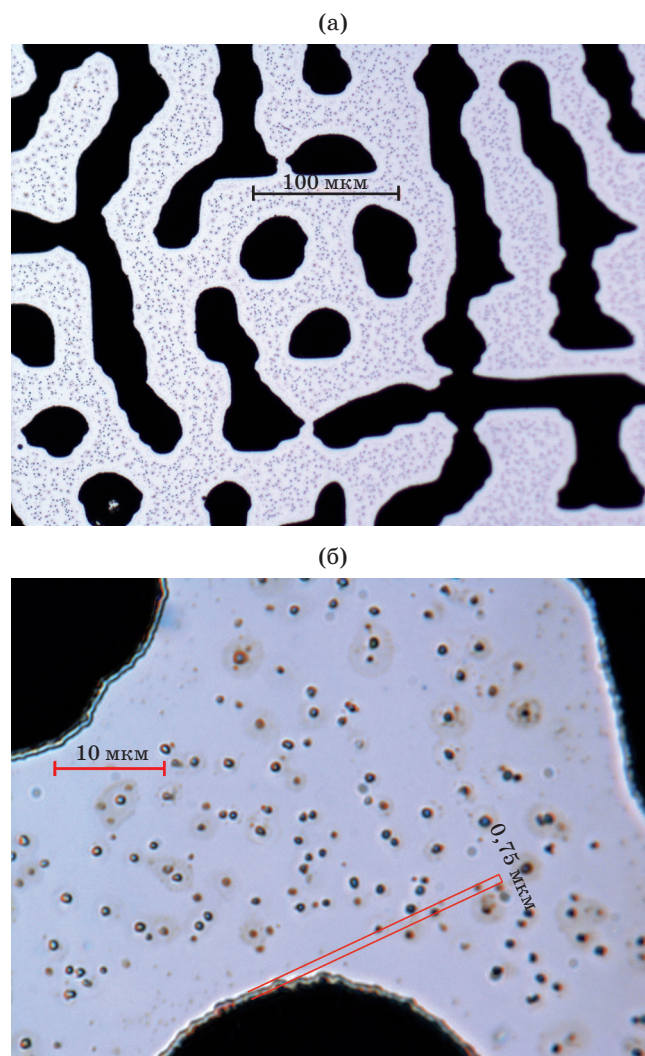
Рис. 3. Исходные узоры рабочей поверхности ДОЭ после электронно-лучевой литографии (а) и после удаления электронного резиста (б).



**Рис. 4.** Узоры рабочей поверхности ДОЭ, наблюдаемые в отраженном (а) и проходящем (б) свете. 1 — области протравленного стекла, 2 — сохранившаяся после ПХТ хромовая маска, 3 — области протравленной хромовой маски, 4 — участки с «высадкой» полимеризующегося фреона.

длительностью 15 с. Типовое состояние маски после таких процессов представлено на рис. 5.

Из рассмотрения рис. 5а видно, что на поверхности маски сформировалось множество точек, а рассмотрение микрофотографии маски с большим увеличением (рис. 5б) показывает, что эти точки являются зародышами формирующегося фторсодержащего покрытия. На рис. 5а видно, что точки-зародыши по контуру узора маски не формируются. На рис. 5б можно заметить, что вокруг точек-зародышей начинают формироваться измененные области материала маски, возникающие, очевидно, вследствие протекания химических реакций хрома с фтором.



**Рис. 5.** Состояние поверхности хромовой маски при кратковременном ПХТ (микрофотографии). а — увеличение 200 $\times$ , б — увеличение 1500 $\times$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнивая микрофотографии маски, представленные на рис. 4 и 5, можно видеть, что остатки маски сохраняются в тех ее областях, на которых не формируются точки-зародыши фторсодержащей пленки. Это хорошо согласуется с графиками, представленными на рис. 2. Действительно, если мы имеем участок с узким проводником (это зона А на рис. 4), соответствующий графику на рис. 2а, то скин-эффект практически отсутствует, проводник прогревается равномерно и, соответственно, неравномерность химического разрушения маски не наблюдается. Данные условия ПХТ характерны для изготовления самых разнообразных дифракционных решеток. Здесь, как правило, применяются периоды не более 2–3 мкм. Соответственно ширина узких участков металлической маски не превышает 1–2 мкм. При изготовлении таких ДОЭ вполне возможно обеспечивать высокую се-



лентивность травления, представляющую собой отношение глубины травления стекла к толщине травленного слоя маски. С увеличением периода дифракционной решетки до 10–20 мкм на вершинах микрорельефа, созданного методом ПХТ, наблюдаются краевые выступы [30], что объясняется проявлением последствий скин-эффекта.

Графику на рис. 2б соответствуют широкие участки проводника, которые характерны для большей части поверхности маски и, как это видно из микрофотографий на рис. 4, подверженные неравномерному химическому разрушению. В основе данной неравномерности, как это можно видеть из микрофотографий на рис. 5, лежит подавление процессов возникновения зародышей фторсодержащей пленки, протекающих в прилегающих к контуру областях на рассматриваемой поверхности. Препятствуют появлению зародышей ослабление адсорбции и интенсификация десорбции, обусловленные повышением температуры маски в этих областях, что, в свою очередь, обусловлено проявлением скин-эффекта.

Появление зародыша фторсодержащей пленки — это протекание химической реакции при попадании ХАЧ в потенциальную яму, т.е. при нахождении ХАЧ на расстоянии  $Z$  от поверхности, при котором для кривой 1 (рис. 6), соответствующей процессу хемосорбции,  $W_{\text{ads}} < 0$ .

Потенциальная яма хемосорбции располагается на расстоянии 1–1,5 Å от поверхности [24]. В эту яму ХАЧ попадает из другой потенциальной ямы — той, которая соответствует процессу физичесорбции и в которой ХАЧ удерживаются силами Ван-дер-Ваальса (межмолекулярными силами). При нормальных условиях (кривая 2) эта потенциальная яма расположена на расстоянии 1–3 Å от поверхности маски. Для попадания из ямы физичесорбции в яму хемосорбции ХАЧ должны преодолеть потенциальный барьер  $W_{\text{ads}}$  в соответствии с формулой (19). Нагреву маски соответствует от-

даление от ее поверхности потенциальной ямы физичесорбции (кривая 3). Можно видеть, что высота потенциального барьера в этом случае значительно выше. Соответственно уменьшается вероятность химической реакции фтора с хромом, т.е. вероятность возникновения зародыша фторсодержащей пленки.

Этим объясняется сильная ниспадающая зависимость от температуры множителя  $s_{00}(T)$  в уравнении (19). Кроме того, в полном соответствии с уравнением (20) в зонах повышенного нагрева маски наблюдается ускорение скорости десорбции физически адсорбирующихся на поверхности маски ХАЧ. Таким образом, сохранность металлической маски при ПХТ во многом определяется ее конфигурацией. Узкие конфигурации более химически стойки благодаря затрудненности хемосорбции и интенсификации десорбции физически адсорбированных ХАЧ вследствие нагрева металлической маски наведенными (индукционными) токами высокой частоты.

Необходимо отметить, что высота потенциального барьера уменьшается при наличии на поверхности загрязняющих веществ — следов от фоторезиста или электронного резиста, а также химических реактивов, применявшихся для их удаления. Поэтому наличие широких участков в конфигурации узора металлической маски ужесточает требования к качеству отмывки заготовок ДОЭ от остатков резиста перед выполнением операции ПХТ.

Также следует отметить, что при наличии в конфигурации маски ДОЭ широких участков стандартная толщина хромового покрытия на заготовках ФШ ИМС 40–50 нм недостаточна. Следует заказывать специальные заготовки ФШ ИМС с толщиной хромового покрытия 100–200 нм. Однако нанесение на заготовку ФШ ИМС хромового покрытия толщиной более 100 нм весьма затруднительно вследствие исключительно высокой адгезии пленки хрома к стеклу: относительно толстая хромовая пленка вызывает разрушение поверхностного слоя стеклянной подложки [32, 33]. Эта проблема решается двумя путями.

Во-первых, в качестве материала маски можно применять другой материал, в частности композиционный (т.е. состоящий из двух и более веществ), который, наряду с высокими химической стойкостью и адгезией к стеклу, обладает также эластичностью покрытий толщиной в несколько микрометров, полученных по тонкопленочной технологии. Таким материалом является, например «тиал» (титан-алюминий), из которого получены маски для ПХТ толщиной до 20 мкм [34]. Однако для этого материала не разработан до настоящего времени селективный по отношению к фоторезисту травитель, что не позволяет реализовывать процессы фотолитографии. То есть его применение для изготовления деталей дифракционной оптики

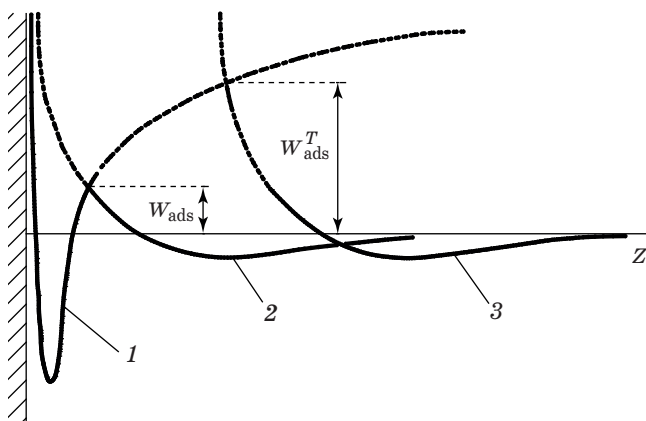


Рис. 6. Кривые потенциалов хемосорбции (1) и физичесорбции (2) ХАЧ при нормальных условиях и при нагреве (3) поверхности маски.

невозможно (маску для ПХТ из этого материала получают напылением через накладной шаблон).

Во-вторых, хромовое покрытие толщиной 1–2 мкм можно получить методом магнетронного напыления на подложку из кварцевого стекла (в частности, КУ1) при соответствующей специальной механической подготовке (шлифовка, полирование) напыляемой поверхности. Суть технологии заключается в проведении операций термообработки, которые устраняют в поверхностном слое следы микротрещин, сопровождающих процесс шлифовки. В этом случае ДОО изготавливают не на собственно заготовке ФП ИМС, а на подложке, содержащей хромовое покрытие, нанесенное на поверхность, подвергнутую шлифовке, полированию и термоупрочнению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изложенного можно сделать следующие выводы.

При изготовлении дифракционных оптических элементов, характеризующихся значительной вариацией ширины участков металлической маски, необходимо учитывать неравномерность плотности наведенных в маске токов, вызванных применением индуктивно связанной плазмы высокочастотного разряда.

Расчет показывает, что на относительно широких участках маски (ширина 10–20 мкм) скин-

эффект приводит к различию в условиях протекания химических реакций на кромочных ее участках и в их средней части примерно в 5 раз.

Неравномерность химического разрушения металлической маски в индуктивно связанной плазме высокочастотного разряда экспериментально показана на примере маски из хрома, имеющей вариацию ширины тонкопленочного проводника в пределах 2–30 мкм.

Оптико-микроскопическое исследование показывает, что неравномерность протравливания маски обусловлена тем, что образование зародышей фторсодержащей пленки, химически разрушающей маску по контуру ее широких участков, затруднено.

В качестве рекомендаций можно рассматривать применение для операций плазмохимического травления покрытий из хрома повышенной толщины. При этом в целях получения покрытий толщиной 1–2 мкм следует применять особую подготовку поверхности подложки, включающую операции шлифовки, полирования и термообработки (термоупрочнения поверхностного слоя).

Также рекомендуется повысить степень отмычки заготовки при наличии в узорах дифракционных оптических элементов участков шириной 10–20 мкм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 3.2236.2017/4.6).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соифер В.А., Котляр В.В., Досколович Л.Л. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанопотоники // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33. № 4. С. 352–368.
2. Methods for computer design of diffractive optical elements / Ed. by Soifer V.A. NY: Wiley, 2002. 784 p. ISBN: 978-0-471-09533-0
3. Одинокое С.Б., Сагательян Г.Р., Ковалев М.С. Расчет, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов: учебное пособие. М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 42–59.
4. Одинокое С.Б., Сагательян Г.Р., Ковалев М.С., Бугорков К.Н. Особенности плазмохимического травления кварцевого стекла при формировании глубокого рельефа на прецизионных деталях приборов // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 5. С. 70–77.
5. Odinokov S.B., Sagatelyan G.R., Kovalyov M.S., et al. Creation of DOE to form the calibration dot patterns inside the optical systems // Computer Optics. 2013. V. 37. № 3. P. 341–351.
6. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях [Электронный ресурс]: учебное пособие / под ред. Тимошенко С.П. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 283 с.
7. Li W.T., Bulla D.A.P., Love J., Luther-Davies B., Charles C., Boswell R. Deep dry-etch of silica in a helicon plasma etcher for optical waveguide fabrication // J. Vac. Sci. Technol. A. 2005. V. 23(1), Jan/Feb. P. 146–150. doi: 10.1116/1.1842114
8. Vinogradov A.I., Zaryankin N.M., Prokopenko E.P., Timoshenkov S.P., Mikhailov Yu.A. The optimization of parameters of deep plasma chemical etching of silicon for the elements of microelectromechanic systems // Russian Microelectronics. 2011. V. 40. № 7, December. P. 441–445.
9. Подлиннов В.В., Колпаков В.А., Казанский Н.Л. Исследование травления диоксида кремния во внеэлектродной плазме с использованием хромовой маски // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 830–836.
10. Жидкостное травление хрома / Frast-M [Электронный ресурс]. <http://frast.ru/travlcr.html>
11. Кручинин Д.Ю., Фарафонов Е.П. Фотолитографические технологии в производстве оптических деталей: учебное пособие. Екатеринбург: изд. Урал. ун-та, 2014. 51 с. ISBN 978-5-7996-1110-1



12. Волков А.В., Моисеев О.Ю., Полетаев С.Д., Чистяков И.В. Применение тонких пленок молибдена для контактных масок при изготовлении микрорельефов элементов дифракционной оптики // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38. № 4. С. 757–762.
13. Волков А.В., Володкин Б.О., Дмитриев С.В., Ерополов В.А., Моисеев О.Ю., Павельев В.С. Тонкопленочная медь как маскирующий слой в процессе плазмохимического травления кварца // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 4. С. 53–55.
14. Noemaun A.N., Mont F.W., Cho J., Schubert E.F., Kim G.B., Sone Ch. Inductively coupled plasma etching of graded-refractive-index layers of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{SiO}_2$  using an ITO hard mask // J. Vac. Sci. Technol. A. 2011. V. 29(5), Sep/Oct. P. 051302-1–051302-6.
15. Knizikevicius R. Simulations of Si and  $\text{SiO}_2$  etching in  $\text{SF}_6 + \text{O}_2$  plasma // Acta Physica Polonica A. 2010. V. 117. № 3. P. 478–483.
16. Kokkoris G., Gogolides E., Boudouvis A.G. Etching of  $\text{SiO}_2$  features in fluoro-carbon plasmas: Explanation and prediction of gas-phase-composition effects on aspect ratio dependent phenomena in trenches // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. № 5 (1 March). P. 2697–2707.
17. Herbstein F.H., Kapon M., Reisner G.M. Crystal structures of chromium (III) fluoride trihydrate and chromium (III) fluoride pentahydrate. Structural chemistry of hydrated transition metal fluorides. Thermal decomposition of chromium (III) fluoride nonhydrate // Z. für Kristallographie. 1985. Bd. 171. № 1–4. S. 209–224. doi: 10.1524/zkri.1985.171.14.209
18. Бугорков К.Н., Сагателян Г.Р. Возможности плазмохимического травления стекла по диодной схеме // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 11. С. 44–63.
19. Dudin S.V., Zykov A.V., Dahov A.N., Farenik V.I. Experimental research of ICP reactor for plasma-chemical etching // Problems Atomic Sci. and Technol. Ser.: Plasma Physics (12). 2006. № 6. P. 189–191.
20. Волков А.В. Исследование технологических режимов плазменного ионно-химического травления на установке “Caroline PE15” [Электронный ресурс]: электрон. учеб.-метод. пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). Электрон. и граф. дан. (2,6 Мбайт). Самара, 2013–1 эл. опт. диск (CD-ROM).
21. Стафеев С.С., Налимов А.Г., О’Фаолейн Л., Котляр М.В. Бинарные дифракционные решетки для управления поляризацией и фокусировкой лазерного света: обзор // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 3. С. 299–314.
22. Одинокоев С.Б., Сагателян Г.Р., Дроздова Е.А., Бетин А.Ю. Жидкостное травление кремния при изготовлении голограммных оптических элементов // Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век. 2018. Т. 10. № 2. С. 38–51.
23. Казанский Н.Л., Скиданов Р.В. Бинарный делитель пучка // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 3. С. 329–334.
24. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of plasma discharges and materials processing. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. P. 303–307.
25. Андреев В.Г., Ангелуц А.А., Вдовин В.А., Лукичев В.Ф., Шкуринов А.П. Особенности электрической проводимости пленок хрома нанометровой толщины // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 1. С. 66–71.
26. Мансуров Г.Н., Петрий О.А. Электрохимия тонких металлических пленок: монография. М.: МГОУ, 2011. С. 97–106.
27. Фотошаблоны на основе кварца и стекла / АО «НИИ МВ» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.niimv.ru/products/maskirovannyye-plastiny.html>
28. Сагателян Г.Р., Одинокоев С.Б., Попов В.В. Разработка и изготовление комбинированных голограммных и дифракционных оптических элементов / В кн.: Голография. Наука и практика: сб. тр. 12-й Междунар. конф. «ГолоЭкспо-2015». Казань: изд. КНИТУ-КАИ, 2015. С. 258–263. ISBN: 978-5-7579-2066-5
29. Kovalev M.S., Odiokov S.B., Zlokazov E.Yu., and Stsepuro N.G. A combination of computer generated Fresnel holograms and light guide substrate with diffractive optical elements for optical display and sighting system // Proc. SPIE 10818. 2018. Holography, Diffractive Optics, and Applications VIII, 1081823 (8 November). doi: 10.1117/12.2501171; <https://doi.org/10.1117/12.2501171>
30. Одинокоев С.Б., Сагателян Г.Р., Гончаров А.С., Ковалев М.С., Соломашенко А.Б., Вереникина Н.М. Экспериментальные исследования процесса плазмохимического травления стекла при изготовлении дифракционных и голограммных оптических элементов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный научно-технический журнал. 2012. № 5. С. 391–410. doi: 10.7463/0512.0408094
31. Бугорков К.Н., Сагателян Г.Р. Плазмохимическое травление стекла с применением высокочастотной диодной схемы // Естественные и технические науки. 2017. № 8. С. 87–91.
32. Одинокоев С.Б., Сагателян Г.Р. Технология изготовления дифракционных и голограммных оптических элементов с функциональным микрорельефом поверхности методом плазмохимического травления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 2. С. 92–104. ISSN 0236-3933
33. Шишлов А.В. Технологическое обеспечение равномерности покрытий для деталей гироскопических приборов на установках магнетронного напыления // Диссерт. канд. техн. наук. 05.11.14. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 208 с.
34. Сагателян Г.Р., Шишлов А.В., Пашурин В.Д. Нанесение функциональных металлических тонкопленочных покрытий на ответственные детали гироскопических приборов космического назначения // Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век. 2016. Т. 8. № 3. С. 32–38.