

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

Особенности плазмохимического травления кварцевого стекла при формировании глубокого рельефа на прецизионных деталях приборов

© 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 имени 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 25.02.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-05-70-77

Рассмотрены особенности явлений, протекающих при выполнении операции плазмохимического травления оптического стекла на установке с индуктивно связанной плазмой в технологическом процессе изготовления глубокого рельефа на прецизионных деталях приборов.

Ключевые слова: кварцевое стекло, маятниковый акселерометр, поверхностный рельеф, плазмохимическое травление, механизм «диффузия — реакция», диссипативные структуры.

Коды OCIS: 160.2750, 220.4000, 240.6700

Одним из основных приборов инерциальных навигационных систем, предназначенных для определения ускорения и местоположения объекта, является маятниковый акселерометр [1]. «Сердце» маятникового акселерометра — кварцевый маятниковый подвес, состоящий из двух катушек и пластины из кварцевого стекла КУ-1 по ГОСТ15130-86. Данное стекло получают методом высокотемпературного гидролиза [2] из тетрахлорида кремния высокой степени чистоты с общим содержанием примесей порядка 10^{-6} – 10^{-7} % по массе. В стекле отсутствуют мелкозернистые неоднородности. Оно обладает высокими химической чистотой и пропусканием в коротковолновой и ультрафиолетовой областях спектра, характеризуется радиационной устойчивостью и отсутствием люминесценции.

Конструктивно пластина маятникового подвеса (рис. 1) состоит из опорного кольца 1 и подвижной пластины 2, которая крепится к кольцу с помощью упругих балок-перемычек 3, выполняющих функцию пружин маятника. Нижняя перемычка 4 является технологической и ее удаляют после сборки подвеса перед его регулировкой.

Две верхние перемычки 3 являются элементами конструкции и обеспечивают подвижность маятника. Их толщина составляет 20 ± 4 мкм. На каждой стороне опорного кольца расположены по три платика 5 высотой 30 мкм, которые предназначены для обеспечения зазора в магнитной системе акселерометра.

В рамках опытно-конструкторских работ в лабораторных условиях такой рельеф пластины получают методом жидкостного травления в плавиковой кислоте [3]. Плавиковая кислота является весьма опасным веществом, главная опасность которого состоит в том, что при попадании на кожу в первый момент оно не вызывает сильной боли, легко и незаметно всасывается, но через короткое время вызывает отек, боль, химический ожог и общетоксическое действие [4].

В качестве альтернативного варианта получения рельефа пластины маятникового подвеса может быть использовано плазмохимическое травление (ПХТ) [5–7]. Однако технология ПХТ применительно к глубокому травлению кварцевого стекла в настоящее время исследована недостаточно.

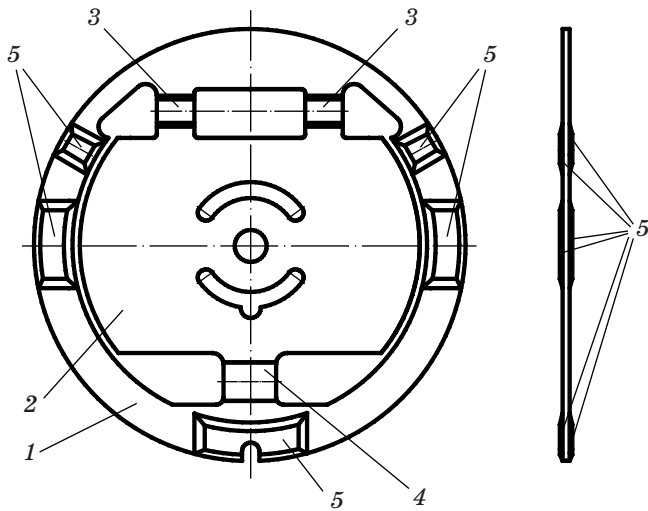


Рис. 1. Конструкция кварцевой пластины маятникового акселерометра. 1 — опорное кольцо, 2 — подвижная пластина, 3 — балки-перемычки, 4 — нижняя перемычка, 5 — пластины.

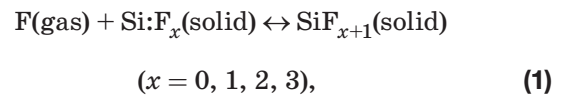
Имеющиеся разработки [8, 9] выполнены для технологии оптических деталей и характеризуются глубиной сформированного микрорельефа в пределах 1–2 мкм. К настоящему времени разработана технология изготовления микроэлектромеханических систем из кварцевого стекла с глубиной рельефа, формируемого методом ПХТ, 100–200 мкм [10].

Ранее проведенными исследованиями [11, 12] было установлено, что при ПХТ боросиликатного стекла через хромовую маску с применением элгаса SF_6 в качестве химически активного компонента газовой смеси его химически активные частицы (ХАЧ) взаимодействуют с хромом и образуют на обрабатываемой поверхности стекла пленки трудноудаляемых соединений CrF_3 и CrF_4 . Вследствие этого происходит снижение скорости травления. Боросиликатное стекло содержит такие оксиды как B_2O_3 , Na_2O , K_2O , Al_2O_3 , которые не образуют с ХАЧ летучих соединений и, оседая на обработанной поверхности, снижают ее качество, затрудняя тем самым подбор рациональных режимов ПХТ.

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей ПХТ кварцевого стекла на глубину 30 мкм с последующим определением рациональных режимов соответствующей технологической операции. Для достижения этой цели необходимо было подобрать материал маски, химически более стойкий, чем обычно применяемый хром. В ракетно-космической отрасли разработан износо- и химически стойкий материал — композит «ТИАЛ», создаваемый методами тонкопленочной технологии [13] — магнетронным распылением одновременно титановой и алюминиевой мишеней. Имеется опыт его нанесения на подложки из кварцевого стекла [14] с формированием покрытий толщиной до 20 мкм.

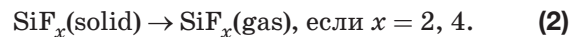
ТЕОРИЯ

Считается, что реакция химически активного газа с обрабатываемым материалом — кварцевым стеклом, происходит на поверхности заготовки. В целом, теоретические основы ПХТ базируются на рассмотрении физических и химических явлений только на поверхности [15]. При ПХТ кремния или кварцевого стекла ионы и атомы фтора, а также радикалы, образующиеся в плазме, находятся в газовой фазе и, попадая на поверхность заготовки, последовательно фторируют ее в соответствии с реакциями, протекающими по следующей схеме:



где $\text{Si:F}_x(\text{solid})$ — атом кремния на поверхности, контактирующей с плазмой, окруженный хемосорбированными атомами или ионами фтора в количестве x штук.

Собственно травление кремния или кварца заключается в образовании летучих веществ по схеме



Соединение SiF_4 является летучим [16], а соединение SiF_2 летучее только при высоких температурах, более того, при невысоких температурах оно склонно к формированию полимера $(\text{SiF}_2)_m$ [17].

Таким образом, для удаления материала необходимо, чтобы каждый атом кремния был окружен четырьмя атомами фтора. Однако, как известно [18], на поверхности кварцевого стекла (плавленного кварца) каждый из ионов кремния окружен тремя ионами кислорода. Поэтому добавление к этому окружению еще четырех атомов фтора в плоскости травления невозможно. Следовательно, процесс ПХТ кварцевого стекла осуществляется не только благодаря наличию на обрабатываемой поверхности атомов фтора, адсорбированных по схеме



где Surf — обрабатываемая поверхность, но и наличие атомов фтора в поверхностном слое заготовки, попавших в толщу материала благодаря диффузии.

Образование соединения SiF_4 по реакции (1) происходит при достижении некоторой пороговой концентрации атомов (ионов) фтора в тех областях поверхностного слоя, которые непосредственно примыкают к поверхности. В этот момент скорость травления (производительность процесса) в соответствии с реакцией (2) возрастает. В результате протекания химической реакции и уноса части поверхностного слоя концентрация ионов фтора

в приповерхностных областях снижается вследствие их удаления из толщи материала в составе продукта реакции. Поэтому скорость травления в этот момент снижается. Далее, вследствие того, что концентрация ионов фтора в приповерхностной области оказывается сниженной, возрастает градиент концентрации между собственно поверхностью, где концентрация фтора определяется процессом хемосорбции (3), и приповерхностным слоем. Увеличивается поток ионов и атомов фтора с поверхности в поверхностный слой с возрастанием их концентрации. При превышении концентрации фтора порогового значения протекают реакции (1) и (2), т.е. производительность процесса травления вновь возрастает и цикл повторяется.

Можно видеть, что ПХТ кварцевого стекла происходит в соответствии со сложным механизмом «диффузия — реакция» [19].

Рассматриваемый процесс является диффузией из постоянного источника [20], поскольку в вакуумной камере постоянно происходит формирование ХАЧ из поступающего химически активного газа, а условия в камере являются установившимися. При этом фактически источником диффузанта является постоянно формирующийся тонкий слой хемосорбированных атомов или ионов фтора.

Изменение во времени концентрации ХАЧ в поверхностном слое обрабатываемой заготовки описывается функциональными зависимостями, приведенными на рис. 2.

Если в результате ПХТ удаление материала происходит со скоростью v , то распределение концентрации ХАЧ в поверхностном слое заготовки в зависимости от глубины x и времени t можно выразить через дополнительную функцию оши-

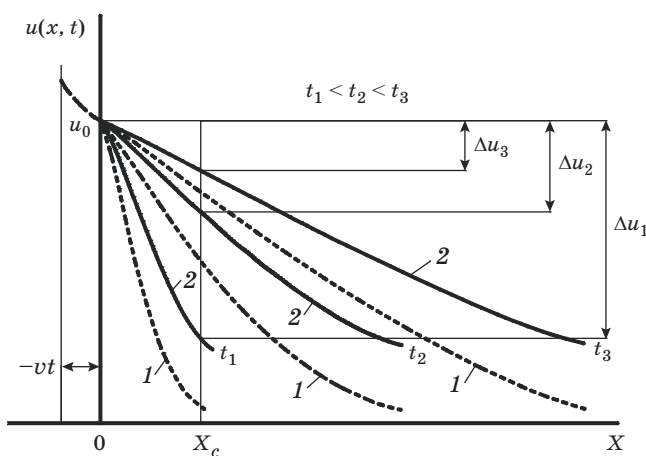


Рис. 2. Распределение концентраций $u(x, t)$ ХАЧ по глубине x поверхностного слоя заготовки без удаления (кривые 1) и после удаления ПХТ обрабатываемого материала посредством ПХТ в различные моменты времени t .

бок [21], преобразовав известное представление [22] следующим образом:

$$u(x, t) = \frac{1}{\operatorname{erfc}\left(-\frac{vt}{2\sqrt{Dt}}\right)} u_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}}\right) = \frac{1}{\int_{-\frac{vt}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} \exp(-p^2) dp} u_0 \int_{\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} \exp(-p^2) dp, \quad (4)$$

где u_0 — пороговая концентрация ХАЧ в поверхностном слое, D — коэффициент диффузии, p — параметр интегрирования.

Если в формуле (4) предположить, что $v = 0$, то получим известное из микроэлектроники [20] решение, отображаемое на рис. 2 кривыми 1. В случае если поверхность раздела фаз в системе вакуум — заготовка постоянно обновляется за счет протекания процесса ПХТ, распределение концентрации ХАЧ в поверхностном слое описывается кривыми 2.

Поскольку сама химическая реакция (2) протекает при достижении некоторой пороговой концентрации u_0 , то очевидно, что с увеличением времени обработки, т.е. с увеличением глубины травления и глубины проникновения ХАЧ в поверхностный слой, скорость травления v должна возрастать, поскольку на каждой текущей глубине x_c уменьшается разность Δu между пороговой и текущей концентрациями ХАЧ.

Другую особенность операции ПХТ кварцевого стекла можно выявить, рассмотрев дифференциальное уравнение параболического типа, являющееся уравнением диффузии, при следующих начальных и граничных условиях:

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad u(0, t) = \mu(t). \quad (5)$$

Частными решениями такого дифференциального уравнения являются функции

$$u(x, t) = A_n \exp\left[-\left(\frac{\pi n}{l}\right)^2 Dt\right] \sin \frac{\pi n}{l} x. \quad (6)$$

Здесь A_n — коэффициенты разложения Фурье [23] функции $\varphi(x)$, представляющей собой начальное условие (5), по синусам в интервале $(0, l)$

$$A_n = \varphi_n \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(\xi) \sin \frac{\pi n}{l} \xi d\xi, \quad (7)$$

где ξ — переменная интегрирования.

Эти частные решения представляют собой затухающие со временем синусоидальные распределения концентрации u , причем чем меньше номер гармоники n , тем больше период синусоиды в про-

странстве и тем меньше коэффициент затухания этой синусоиды во времени за счет множителя $\exp[(-\pi n/l)^2 Dt]$.

Таким образом, решение представляется в виде ряда Фурье — бесконечной суммы гармонических функций координаты x с убывающими со временем амплитудами. Нелинейность, обусловленная наличием механизма «диффузия — реакция», приводит к тому, что система оказывается своеобразным «фильтром», выделяющим некоторые члены из гармонического ряда и поддерживающим их существование, в то время как более высокие гармоники затухают во времени. То есть в поверхностном слое заготовки должны наблюдаться флуктуации ХАЧ по глубине. Известно [24, 25], что в нелинейных системах с диффузией при наличии малых флуктуаций могут возникнуть автоволновые процессы и периодические по пространству постоянные во времени структуры (диссипативные структуры).

Следовательно, концентрация ХАЧ фтора, диффундировавших из индуктивно связанной плазмы через хемосорбированный на поверхности заготовки слой в толщу кварцевого стекла, должна в перпендикулярном к обрабатываемой поверхности направлении характеризоваться диссипативными структурами ХАЧ фтора, что, в свою очередь, должно приводить к волнообразному характеру зависимости скорости травления от глубины травления.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальные исследования проводились на установке RIE-300 производства фирмы *Torr International, Inc.* [26]. Конструкция установки позволяет проводить ПХТ одновременно с двух сторон заготовки с подачей на плоскую антенну сигнала частотой 13,56 МГц, мощностью до 300 Вт.

Применявшиеся в эксперименте образцы представляли собой полированные заготовки кварцевых пластин маятникового подвеса диаметром 26 и толщиной 0,5 мм (рис. 3).

Маска на образцах создавалась магнетронным напылением нанокompозитного покрытия TiAl [27] на вакуумной установке *UniCoaT 600* [28] с использованием специальной технологической оснастки. Толщина покрытия составляла 1,5 мкм. Технологическая оснастка для напыления представляла собой две металлические пластины с вырезами, повторяющими конфигурацию и расположение напыляемых областей, между которыми размещался напыляемый образец (рис. 4). Центрирование образца и двух пластин осуществлялось с помощью штифтов, устанавливаемых в центральное отверстие и нижний паз.

Для двухстороннего травления была разработана и изготовлена специальная оснастка (рис. 5),

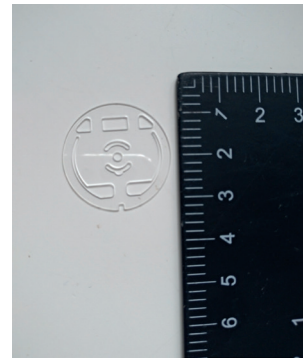


Рис. 3. Образец для проведения эксперимента.

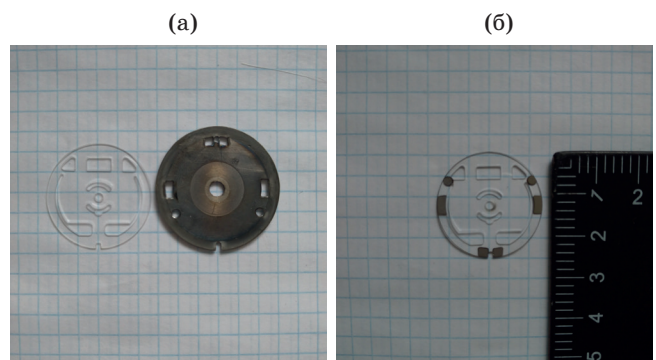


Рис. 4. Специальная технологическая оснастка для нанесения маски (а) и образец после напыления маски (б).

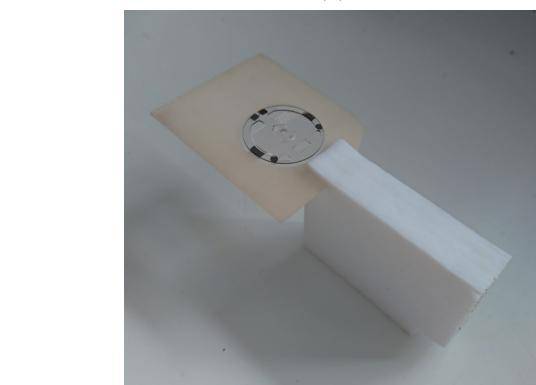
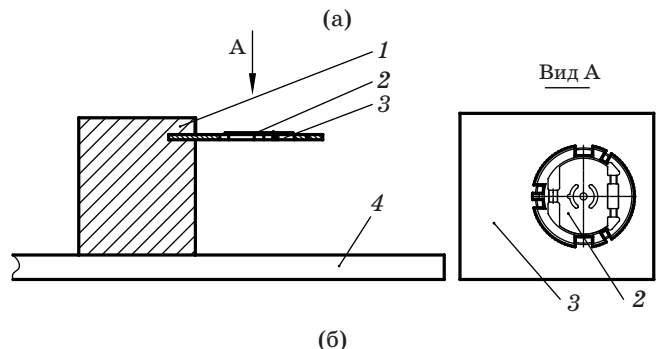


Рис. 5. Конструкция (а) и внешний вид (б) оснастки для двухстороннего травления заготовок пластины маятникового подвеса. 1 — подставка, 2 — образец, 3 — держатель, 4 — полочка.

обеспечивающая расположение образца в реакторе RIE-300 таким образом, чтобы доступ газа осуществлялся к обеим подвергаемым травлению поверхностям.

Оснастка представляла собой подставку 1, изготовленную из фторопласта и обеспечивающую расположение образца на требуемом расстоянии от антенны. В паз подставки устанавливался держатель 3, изготовленный из керамической пластины (ВК 97) методом лазерной резки на установке «Кварц-М1». За счет специального профиля прорезанного в керамической пластине отверстия образец 2 опирался участками, на которых было нанесено износостойкое покрытие TiAl, на «зубцы» держателя. В собранном виде оснастка с образцом устанавливалась на штатную диэлектрическую полочку 4 установки RIE 300.

Образец устанавливался в центре антенны на расстоянии 6 мм от диэлектрического окна.

Каждый опыт представлял собой технологическую операцию, состоящую из 9 переходов, при которых чередовались переходы собственно ПХТ продолжительностью 10 мин с переходами кислородной очистки продолжительностью 10 мин. При этом первый и последний переходы — кислородная очистка продолжительностью 10 мин.

Мощность излучаемой антенной электромагнитной волны составляла в случае переходов ПХТ 250 Вт, а в случае переходов кислородной очистки 200 Вт. Требуемая среда создавалась изменением расхода газов. При кислородной очистке — расход кислорода $50 \text{ см}^3/\text{мин}$, расход аргона $50 \text{ см}^3/\text{мин}$. При собственно ПХТ — расход элегаза $100 \text{ см}^3/\text{мин}$, расход кислорода $40 \text{ см}^3/\text{мин}$, расход аргона $35 \text{ см}^3/\text{мин}$. В рабочей камере при кислородной очистке формировалось давление вакуума 65 Па, а при собственно ПХТ — 57 Па.

В качестве исследуемого параметра рассматривалась скорость травления кварцевого стекла, которая оценивалась увеличением размера выступов в процессе каждого опыта, т.е. за один цикл обработки стекла. На профилографе-профилометре

модели «Talysurf-7» [29] снимали профилограммы поверхности образца до и после опыта. Увеличение размера выступов в каждом опыте определялось как разность высот после и до проведения опыта. Опыты проводились до достижения размера выступов 30 мкм.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 6.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о правомерности выводов, изложенных в теоретической части. Действительно, можно видеть, что скорость травления кварцевого стекла с увеличением продолжительности травления имеет тенденцию к возрастанию.

Эти результаты можно описать следующим квадратичным уравнением регрессии:

$$h = 3162 - 84,01N + 26,41N^2, \quad (8)$$

где h — глубина травления за один цикл обработки (40 мин травления), нм, N — номер цикла травления.

Анализируя уравнение (8), можно видеть, что коэффициент при квадратичном члене положительный, т.е. со временем травления его скорость имеет тенденцию ускорения. Это можно объяснить тем обстоятельством, что функция $\text{erfc}(x)$ быстро возрастает при отрицательных x , близких к нулю с увеличением $|x|$. В нашем случае отрицательные значения аргумента x соответствуют уже удаленному в процессе травления материалу. Поэтому чем больше толщина стравливаемого слоя, тем больше оказывается значение числителя в формуле (4). Это означает, что ускоряется рост концентрации u ХАЧ в поверхностном слое, что и приводит к ускорению роста скорости травления.

Вместе с тем можно видеть, что уравнение (8) содержит также линейный член с отрицательным коэффициентом перед ним. Это, в свою очередь, означает, что с увеличением продолжительности травления скорость травления имеет, наряду с указанной выше тенденцией к ускорению роста, также и тенденцию к снижению скорости травления. Такой характер влияния времени травления на скорость травления обусловлен наличием пассивации обрабатываемой поверхности. Пассивация выражается в полимеризации химически активного газа на подвергаемой травлению поверхности вследствие протекания на ней газотранспортной реакции. Поэтому значение u_0 на рис. 2 и в математической модели (4) с увеличением продолжительности травления снижается.

Наряду с общими тенденциями, описываемыми уравнением регрессии (8), результаты экспериментальных исследований дают основание для рассмотрения волнообразного характера зависимости

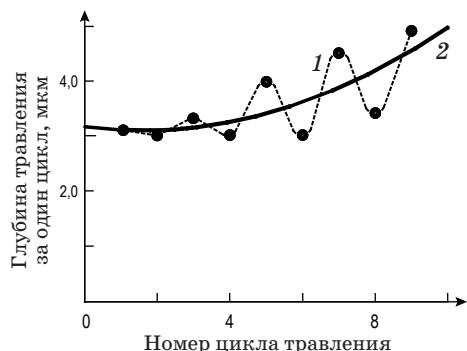


Рис. 6. Зависимости глубины травления от номера цикла травления. 1 — полученная экспериментально, 2 — аппроксимированная по выражению (8).

скорости травления от его продолжительности. Как указано в теоретической части, такой характер полученной зависимости может быть обусловлен образованием в поверхностном слое заготовки диссипативных структур, которые, в свою очередь, вызваны наличием флуктуаций концентрации ХАЧ, описываемых математической моделью (6).

Превращение флуктуаций в диссипативные структуры происходит в нелинейных системах, а рассматриваемая нами система нелинейна. Она представляет собой содержащий ХАЧ плазмы поверхностный слой образца из кварцевого стекла, находящегося в высокочастотном электромагнитном поле. Эти частицы, располагаясь в толще поверхностного слоя, приводят к травлению стекла, а расположенные на поверхности, способствуют росту пассивирующей пленки. Рост пленки чередуется с ее удалением под воздействием частиц кислорода без удаления слоя обрабатываемого материала.

При кислородной очистке ХАЧ, уже находящиеся в поверхностном слое, диффундируют в его толщу без добавления новых ХАЧ. Этот процесс известен как диффузия из ограниченного объема [30]. Решение уравнения диффузии в этом случае основывается на функции Гаусса, а именно [31]

$$u(x, t) = \int_0^{\infty} G(x, \xi, t) \varphi(\xi) d\xi, \quad (9)$$

где функция

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp \left[-\frac{(x - \xi)^2}{4Dt} \right] \quad (10)$$

является фундаментальным решением уравнения диффузии, а функция $\varphi(\xi)$ — это распределение концентрации ХАЧ вдоль оси x в соответствии с кривыми 2 на рис. 2 в момент начала перехода с кислородной очистки.

Перераспределение ХАЧ в поверхностном слое заготовки в соответствии с формулами (9), (10) приводит к выравниванию их концентрации. Таким образом, мы имеем дело с двумя чередующимися процессами: возникновение в поверхностном слое весьма неравномерного распределения ХАЧ в соответствии с формулой (4) в процессе выполнения переходов ПХТ и выравнивание этого распределения в соответствии с формулами (9) и (10) при выполнении переходов кислородной очистки. А это и есть нелинейность условий диффузии ХАЧ, которая должна приводить к возникновению флуктуаций их концентрации по глубине поверхностного слоя.

Практическим следствием волнообразности зависимости скорости травления кварцевого стекла от глубины травления является ограничение, накладываемое на возможности технологического

обеспечения точности размера высоты выступов при ПХТ. Это обусловлено не только тенденцией к возрастанию скорости травления с увеличением глубины травления, что можно считать систематической переменной погрешностью, но и волнообразным характером этой зависимости, возникающим, в конечном счете, вследствие флуктуаций концентрации ХАЧ, что является случайной погрешностью. В нашей задаче случайную погрешность можно охарактеризовать доверительным интервалом $\pm 0,5$ мкм на 9-м цикле травления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе аналитических и экспериментальных исследований технологических возможностей применения плазмохимического травления для формирования выступов на кварцевой пластине маятникового акселерометра можно сделать следующие выводы.

Предусмотренные конструкцией кварцевой пластины выступы высотой 30 мкм на обеих ее сторонах могут быть получены методом плазмохимического травления на установке с индуктивно связанной плазмой при помещении заготовки пластины непосредственно в объем плазмы.

В качестве материала маски может быть рекомендован тонкопленочный нанокompозитный материал «ТИАЛ», наносимый на заготовку магнетронным напылением. Глубина травления 30 мкм получена с применением маски из этого материала толщиной 1,5 мкм, т.е. тонкопленочное покрытие «ТИАЛ» обеспечивает селективность травления 20 по отношению к кварцевому стеклу.

С целью разрушения пассивирующей пленки, растущей в процессе плазмохимического травления на обрабатываемой поверхности одновременно с удалением обрабатываемого материала, рекомендуется чередовать переходы плазмохимического травления с переходами кислородной очистки. Экспериментально установлена возможность получения глубины травления 3–5 мкм за одну технологическую операцию, состоящую из 9-ти чередующихся переходов продолжительностью 10 мин каждый. При этом переходы плазмохимического травления выполняются с применением элегаза SF_6 в смеси с аргоном и кислородом, а переходы кислородной очистки — с применением кислорода в смеси с аргоном.

Выведено предположение о том, что скорость травления при плазмохимическом травлении определяется не только концентрацией химически активных частиц непосредственно на обрабатываемой поверхности, но и их концентрацией в поверхностном слое, куда химически активные частицы попадают в результате диффузии из хемосорбированного слоя. Это предположение подтверждено как аналитическими исследованиями

на основе рассмотрения механизма диффузии химически активных частиц из неограниченного объема в условиях постоянного обновления поверхности раздела сред, так и результатами эксперимента, демонстрирующими тенденцию к возрастанию скорости травления при переходе к каждому последующему циклу плазмохимического травления.

Из предположения о значимости роли диффундировавших в поверхностный слой заготовки химически активных частиц в формировании скорости травления следует, что плазмохимическое травление кварцевого стекла происходит по механизму «диффузия — реакция». Аналитически показано, что чередование переходов плазмохимического травления и кислородной очистки, вызывающее нелинейность процесса диффузии химически активных частиц в толщу поверхностного слоя, создает условия для возникновения флуктуаций концентрации химически активных частиц, что, в свою очередь, должно приводить к возникновению

диссипативных структур распределения химически активных частиц по глубине поверхностного слоя. Экспериментально установленный волнообразный характер изменения глубины травления за один цикл при переходе от одного цикла травления к следующему может свидетельствовать о формировании диссипативных структур концентрации химически активных частиц.

Полученное на основании экспериментальных исследований уравнение регрессии позволяет оценить требуемое количество операций плазмохимического травления для достижения заданной глубины травления.

Экспериментальными исследованиями установлено, что доверительный интервал предсказания по уравнению регрессии глубины травления на 9-м цикле травления составляет $\pm 0,5$ мкм.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00304).

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов С.Ф., Пономарев Ю.А., Майоров Д.В. и др. Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 10. С. 1–23. <http://tech-nomag.edu.ru/doc/219257.html>
2. Зверев В.А., Кривопустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Часть 2. Уч. пособие для конструкторов оптических систем и приборов. СПб.: изд. СПб НИУ ИТМО, 2013. С. 23–27.
3. Ветрова Е.В., Смирнов И.П., Козлов Д.В. и др. Особенности создания чувствительных элементов кремниевых и кварцевых маятниковых акселерометров // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т. 4. Вып. 2. С. 95–102.
4. U.S. Department of Health and Human Services. Hazardous Substances Data Bank (HSDB, online database). National Toxicology Information Program, National Library of Medicine. [Электронный ресурс]. Bethesda, MD. 2015. <http://toxnet.nlm.nih.gov/newtoxnet/hsdb.htm>
5. Kaiser T.J., Allen M.G. A pendulous oscillating gyroscopic accelerometer fabricated using deep-reactive ion etching // J. Microelectromechanical Systems. 2003. V. 12. № 1, February. P. 21–28.
6. 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.
7. Kovalev M.S., Odinokov S.B., Zlokazov E.Yu., et al. A combination of computer generated Fresnel holograms and light guide substrate with diffractive optical elements for optical display and sighting system // Proc. SPIE 10818, Holography, Diffractive Optics, and Applications VIII, 1081823 (8 November 2018); doi: 10.1117/12.2501171; <https://doi.org/10.1117/12.2501171>
8. Wang S., Zhou C., Ru H., et al. Optimized condition for etching fused-silica phase gratings with inductively coupled plasma technology // Appl. Opt. 2005. V. 44. № 21. P. 4429–4434.
9. Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. М.: Радио и связь, 2009. 220 с.
10. Pedersen M., Huff M. Plasma etching of deep high-aspect ratio features into fused silica // J. Microelectronical Systems. 2017. V. 26. № 2. P. 448–455.
11. Бугорков К.Н., Сагателян Г.Р. Плазмохимическое травление стекла с применением высокочастотной диодной системы // Естественные и технические науки. 2017. № 8. С. 87–91.
12. Бугорков К.Н., Сагателян Г.Р. Возможности плазмохимического травления стекла по диодной схеме // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 11. С. 44–63.
13. Федотов А., Агабеков Ю., Мачикин В. Многофункциональные нанокompозитные покрытия // Наноиндустрия. 2008. № 1. С. 24–26.
14. 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.

15. *Lieberman M.A., Lichtenberg A.J.* Principles of plasma discharges and materials processing. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. P. 285–325.
16. *Галперин В.А., Данилкин Е.В., Мочалов А.И.* Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях [Электронный ресурс]: уч. пособие / под ред. Тимошенко С.П. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. С. 39–42.
17. *Гофман У., Рюдорф В., Хаас А. и др.* Руководство по неорганическому синтезу: в 6-ти томах. Т. 3. Пер. с. нем. / Под ред. Брауэра Г. М.: Мир, 1985. 392 с.
18. *Чукин Г.Д.* Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема. М.: ООО «Принта», 2008. 172 с.
19. *Курушина С.Е.* Анализ поведения пространственных диссипативных структур в системах реакция – диффузия в поле внешних флуктуаций в окрестности точки бифуркации // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 3. С. 340–349.
20. *Томилин В.И., Томилина Н.П., Чернов В.К. и др.* Физико-химические основы технологии электронных средств: уч. пособие по лабораторному практикуму. Красноярск: изд. СФУ, 2007. С. 7–26.
21. *Lehtinen N.G.* Error functions [Электронный ресурс]. 2010. <http://nlpc.stanford.edu/nleht/Science/reference/error-fun.pdf>
22. *Chang S.H., Cosman P.C., Milstein L.B.* Chernoff-type bounds for the Gaussian error function // IEEE Trans. Commun. 2011. V. 59. № 11. P. 2939–2944.
23. *Привалов И.И.* Ряды Фурье. Учебник для вузов. М.: изд. МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017. 164 с.
24. *Ризниченко Г.Ю.* Лекции по математическим моделям в биологии. Серия Математическая биология, биофизика. М. – Ижевск: изд. «РХД», 2011. 560 с.
25. *Ванаг В.К.* Диссипативные структуры в реакционно-диффузионных системах. М. – Ижевск: изд. Института компьютерных исследований, 2008. 300 с.
26. *Одинокое С., Сагателян Г., Бугорков К. и др.* Закономерности и особенности двухстороннего плазмохимического травления деталей из оптического стекла // Наноиндустрия. 2018. № 1. С. 50–62.
27. *Варданян Э.Л., Ягафаров И.И., Будилов В.В. и др.* Математическое моделирование процесса нанесения упрочняющих покрытий на основе интерметаллида системы Ti-Al // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 6. С. 7–10.
28. Вакуумная опытно-промышленная установка нанесения «ионных» покрытий UNICOAT-600. Паспорт. Дзержинск: НПФ «Элан-Практик», 2006. 8 с. <http://www.elanpraktik.ru/wp-content/uploads/2017/10/UniCoat-600-pasport.pdf>
29. Taylor Hobson Ltd., 2018. Form Talysurf® CNC Series — 06/2018. https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/product_downloads/form_talysurf_cnc_series/fts-cnc-series_lowres_en.pdf
30. *Гук Е.Г., Каманин А.В., Шмидт Н.М. и др.* Диффузия легирующих примесей из полимерных диффузентов и применение этого метода в технологии полупроводниковых приборов. Обзор // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. Вып. 3. С. 257–269.
31. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики: уч. пособие. М.: изд. МГУ, 1999. С. 228–242.