

Обеспечение равномерной толщины токопроводящего покрытия на внутренней поверхности полусферического резонатора магнетронным напылением

В. С. Кондратенко, Г. Р. Сагателян, А. В. Шишлов, М. Н. Былинкин

Рассмотрены возможности технологического обеспечения равномерности распределения толщины тонкоплёночного металлического покрытия, наносимого методом магнетронного напыления на внутреннюю поверхность тонкостенного кварцевого резонатора, выполненного в форме полусферы. Показана возможность минимизации разнотолщинности покрытия оптимизацией диаметра кольцевой зоны эмиссии магнетрона в сочетании с расстоянием от резонатора до мишени и из напыляемого материала. Дальнейшее повышение равномерности покрытия возможно на основе применения неподвижного экрана с отверстием, форма и расположение которого рассчитываются аналитически, а окончательная конфигурация контура уточняется эмпирически.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, резонатор, полусфера, тонкоплёночное покрытие, равномерность толщины, магнетронное напыление, экранирование, кинематика, пространственный планетарный механизм.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-6-523-532

Введение

Волновые твердотельные гироскопы (ВТГ), реализуя структуру статического типа, не имеют вращающегося ротора и содержат деталь, имеющую сложную конфигурацию, с

тонкоплёночным металлическим покрытием. В основе работы ВТГ лежит явление инерционности упругих волн в инерционной системе координат [1–5]. ВТГ с полусферическим резонатором из плавленого кварца предназначен для измерения угловой скорости вращения и угла поворота объекта [6, 7].

Принцип его действия основан на колебаниях полусферической оболочки с формированием стоячей волны с двумя узловыми меридианами, причём эта стоячая волна совершает движение прецессии при повороте резонатора вокруг собственной оси. Достоинством именно полусферической формы резонатора является высокий коэффициент прецессии, повышающий разрешающую способность ВТГ [8].

Для снятия информации о соответствующем текущем распределении амплитуд колебаний, резонатор содержит на внутренней поверхности полусферы сплошное тонкоплёночное покрытие из металла [9], которое выполняет роль кольцевого электрода, создающего переменное электромагнитное поле, под-

Кондратенко Владимир Степанович¹, зав. кафедрой, д.т.н., профессор.

E-mail: vsk1950@mail.ru

Сагателян Гайк Рафаэлович², д.т.н., профессор.

Шишлов Андрей Владимирович³, нач. отделения, к.т.н.

Былинкин Михаил Николаевич³, вед. инженер.

¹ ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет».

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

² ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

³ Филиал АО ЦЭНКИ –

«НИИ ПМ им. акад. В. И. Кузнецова».

Россия, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, 12А.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2021 г.

© Кондратенко В. С., Сагателян Г. Р., Шишлов А. В., Былинкин М. Н., 2021

держивающее вынужденные колебания кромки резонатора в определенных пределах. Измерение параметров стоячей волны осуществляется специализированной электронной системой. Технические характеристики ВТГ во многом определяются качеством этого покрытия.

Показателями качества являются толщина и равнотолщинность. Толщина покрытия влияет на добротность колебаний резонатора, а

равномерность толщины покрытия – на однородность формируемого сигнала. Следует также учесть, что для снятия информационного сигнала токопроводящее покрытие должно быть также нанесено и на ножку резонатора с внутренней стороны полусферы (рис. 1, а). Длинная двусторонняя крепежная ножка введена в конструкцию резонатора для уменьшения рассеяния энергии колебаний в опорах [10].

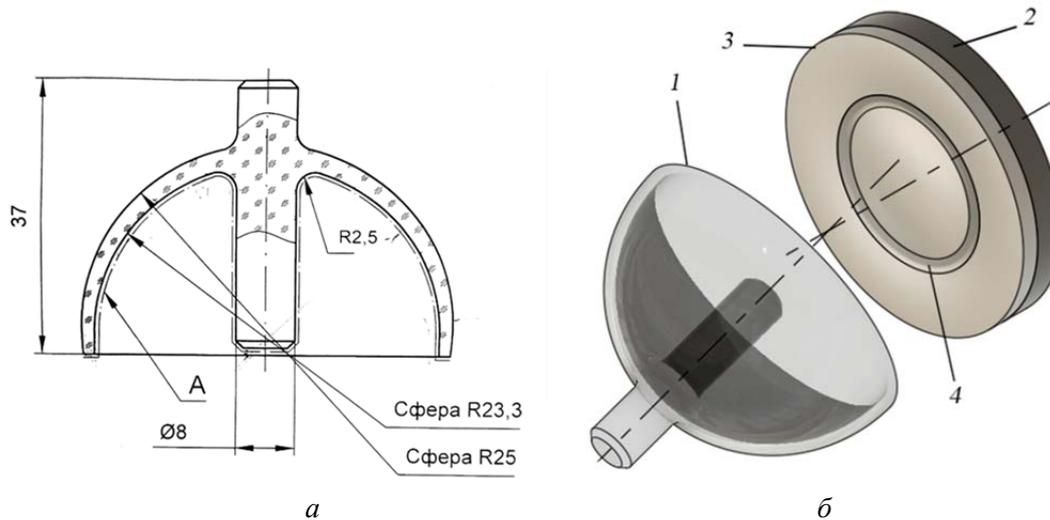


Рис. 1. Резонатор волнового твердотельного гироскопа (а) и его расположение относительно магнетрона при напылении (б): 1 – полусферический резонатор; 2 – магнетрон; 3 – мишень; 4 – углубление кольцевой формы.

Принципиальным недостатком метода термического (вакуумного) напыления является существенная неравномерность толщины покрытия на деталях сложной формы [11]. Азимутальная неравномерность покрытия при магнетронном напылении на полусферический резонатор рассмотрена в [12]. Обеспечение заданных толщины и равномерности толщины покрытия является актуальной задачей.

Основная проблема, возникающая при изготовлении резонатора ВТГ – нанесение металлического покрытия с малым уровнем внутреннего трения [13], обусловленного стехиометрией покрытия. Наиболее стабильную стехиометрию металлического покрытия обеспечивает магнетронное напыление. Кроме того, реализуемая в вакуумных камерах непосредственно предшествующая напылению ионная очистка снижает шероховатость покрытия за счет подавления роста столбчатых кристаллов [14].

Одним из способов технологического обеспечения требуемого распределения тол-

щины покрытия является дополнительное размещение между деталью и мишенью экрана с отверстием определенной конфигурации в сочетании с выбором рациональной схемы напыления. Для определения оптимальной формы такого отверстия необходимо создать математическую модель, устанавливающую взаимосвязь геометрических и кинематическими факторов процесса с распределением по внутренней полусферической поверхности резонатора и цилиндрической поверхности ножки скорости роста толщины покрытия при напылении магнетронном кольцевой конструкции [15–17].

Теория

При применении магнетронов круглой формы распыление мишени происходит из формирующейся в виде кольца лунки (рис. 1, б). Для расчёта распределения толщины покрытия по внутренней поверхности резонатора можно принять область распыления мишени в

виде бесконечно узкого кольца, которое в расчетах принимается за окружность заданного диаметра. Резонатор установлен наклонно и совершает пространственное планетарное

движение: напыление производится при вращении резонатора с частотой n_1 вокруг собственной оси и, одновременно, с частотой n_2 вокруг вертикальной оси (рис. 2).

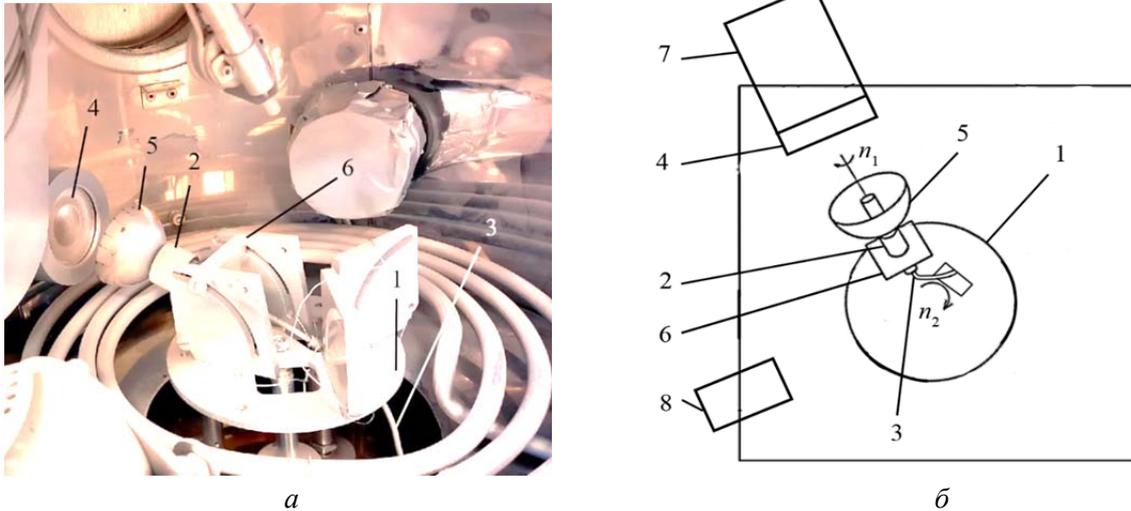


Рис. 2. Фотография (а) и схема (б) компоновки вакуумной камеры: 1 – карусель; 2 – цанговый патрон; 3 – гибкий вал (трос); 4 – мишень из алюминиевого сплава; 5 – деталь – резонатор; 6 – наклонное приспособление; 7 – магнетрон; 8 – ионный источник.

Расчёт распределения толщины напыляемого покрытия

Рассмотрим частный случай – когда ось магнетрона совпадает с осью резонатора. Вследствие симметричности задачи в принятой расчетной модели (рис. 3) напыление происходит из точек B_1, B_2 . При этом резонатор совершает одно вращательное движение – вокруг собственной оси. Полученный для этого случая результат должен стать основой для обоснованного усложнения рассматриваемой схемы напыления.

Скорость роста толщины пленки осаждаемого материала в точке A при магнетронном напылении из точечного источника согласно закону Кнудсена-Ламберта [18] равна:

$$\xi = \frac{k_1 k_2 \cos \varphi \cos \varepsilon}{r^2}, \tag{1}$$

где k_1 – коэффициент конденсации материала, (мкм мм²)/частиц; k_2 – коэффициент эмиссии, соответствующий максимуму диаграммы направленности распыления, частиц/(с мм²); φ – угол эмиссии, соответствующий направлению от точки B к точке A ; ε – угол конденсации в точке A , соответствующий источнику

в точке B ; r – расстояние от источника до точки осаждения (между точками B и A), мм.

Квадратичная зависимость для расстояния обусловлена квадратичным возрастанием площади напыляемой поверхности, приходящейся на один стерадиан телесного угла для распыления из точки B .

Совместим начало системы координат XOY с центром сферы резонатора. Центр магнетрона расположим в точке C с координатами $(X_c, 0)$. Тогда точка эмиссии B имеет координаты $(X_c, D/2)$. Ножка резонатора, имеющая диаметр $2a$, характеризуется точками $F_3 (X_{F3}; Y_{F3})$ и $F_4 (X_{F4}; Y_{F4})$, причем, для любой точки A на поверхности резонатора можно записать:

$$r = \sqrt{(A_x - B_x)^2 + (A_y - B_y)^2}, \tag{2}$$

где A_x, A_y и B_x, B_y – координаты точек A и B соответственно.

Угол эмиссии φ – это угол между нормалью к плоскости магнетрона и вектором \vec{r} . А так как в данном случае нормаль параллельна оси X , то

$$\varphi = \text{arctg} \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x}. \tag{3}$$

Угол конденсации ε – это угол между нормалью к поверхности сферы (она проходит через начало системы координат) в точке A и вектором \vec{r} .

Нетрудно заметить, что

$$\alpha + \varphi + \varepsilon = 0, \tag{4}$$

откуда

$$\varepsilon = \alpha + \varphi. \tag{5}$$

В формуле (5) угол φ , как и угол α , надо брать со своим знаком.

Напыление на ножку резонатора осуществляется одновременно с напылением внутренней сферы. Скорость напыления ξ на ножку рассчитывается по формуле (1), так же, как и для напыления на полусферическую поверхность. Основным отличием данной расчетной схемы от расчетной схемы для напыления на полусферическую поверхность является то, что угол конденсации определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \varphi. \tag{6}$$

Поскольку в текущем положении в некоторые области резонатора напыление не происходит, необходимо учесть влияния теневых областей на распределение толщины покрытия. Зону, в которую не будет попадать луч от точечного источника напыления, будем называть тенью для этого источника. На рис. 3 темно-серым цветом указаны области, в которых напыление происходит из источников B_1 и B_2 одновременно, светло-серым указаны области, в которых напыление происходит только из одного источника. Задать теневые зоны можно с помощью границ для угла φ . Эти границы будем задавать с помощью множеств Φ_1, Φ_2 . Так как задача симметричная, разберем напыление только из точки B_1 .

Условие, при котором скорость роста пленки, напыляемой из точки B , на внутреннюю полусферу резонатора в точке A не нулевая, можно получить, вычитая из множества Φ_1 множество Φ_2 :

$$\varphi \in \Phi_1 \setminus \Phi_2. \tag{7}$$

Так как нас в большей степени интересует форма распределения покрытия, а не значение

скорости роста пленки в конкретной точке, то с учетом того, что задача симметричная, для расчета скорости напыления ξ_{ω} с учетом вращения из источника B_1 можно записать:

$$\xi_{\omega}(\alpha) = \xi(\alpha) + \xi(-\alpha). \tag{8}$$

Определяли относительную разность скорости напыления δ :

$$\delta = \frac{\xi_{\max} - \xi_{\min}}{\xi_{\text{cp}}} \times 100\%, \tag{9}$$

где ξ_{\max}, ξ_{\min} – наибольшая и наименьшая скорости напыления; ξ_{cp} – среднее значение функции.

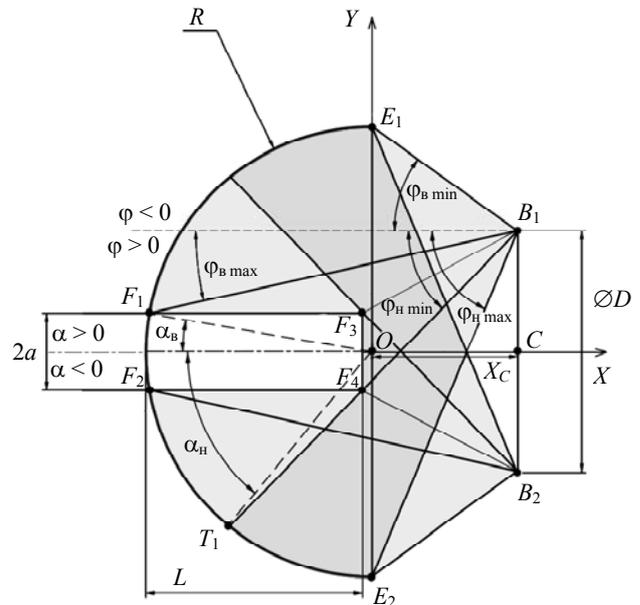


Рис. 3. Схема напыления при соосном расположении детали и магнетрона.

Провели оптимизацию по параметру δ , рассчитываемому по формуле (9). Факторами являлись диаметр окружности распыления D и расстояние между центром сферы резонатора и центром магнетрона X_c . Постоянными параметрами являлись радиус внутренней сферы резонатора $R = 23,3$ мм; радиус ножки резонатора $a = 4$ мм; длина ножки во внутренней части резонатора $L = 22,3$ мм.

Путем перебора варьируемых факторов D и X_c выявлено наименьшее значение относи-

тельной разности $\delta = 3,21\%$ при значениях факторов: $D = 8$ мм и $X_C = 30,5$ мм. Следует отметить, что изготовление магнетрона со столь малым диаметром окружности напыления мишени практически невозможно. На установке ROBVAC VSM300 диаметр кольца распыления $D = 25$ мм. Фиксирование этого параметра при оптимизации относительной разности δ приводит к следующему: наименьшее значение $\delta = 10,83\%$ достигается при $X_C = 29$ мм. Диаграмма зависимости относительной разности δ от X_C при фиксированном значении D представлена на рис. 4.

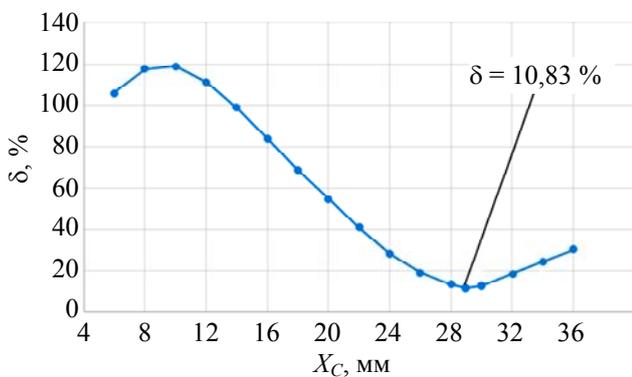


Рис. 4. Диаграмма зависимости δ от X_C при фиксированном размере магнетрона $D = 25$ мм.

Рассчитанные с помощью программы Mathcad графики зависимостей после оптимизации скоростей напыления ξ_ω на внутреннюю поверхность сферы и ξ на ножку представлены на рис. 5. Основное требование к покрытию на ножке резонатора состоит в том, что толщина этого покрытия должна быть больше, чем толщина покрытия на полусферической поверхности, что обусловлено непосредственным механическим контактом ножки с надеваемым на неё измерительным электродом системы управления.

Можно сделать вывод, что добиться низких значений разнотолщинности одним только подбором параметров напыления, таких как расстояние между центрами магнетрона и сферы резонатора X_C и диаметр окружности распыления D , невозможно. Следовательно, необходимо ограничить напыление из каждого источника в нижнюю, или иначе, в противоположную часть резонатора.

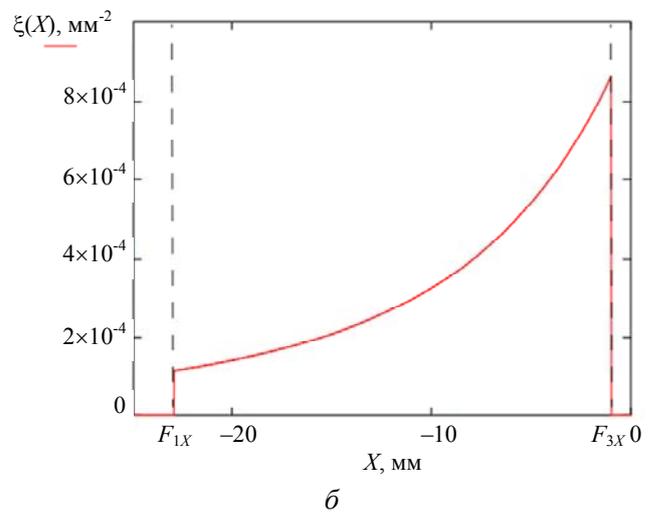
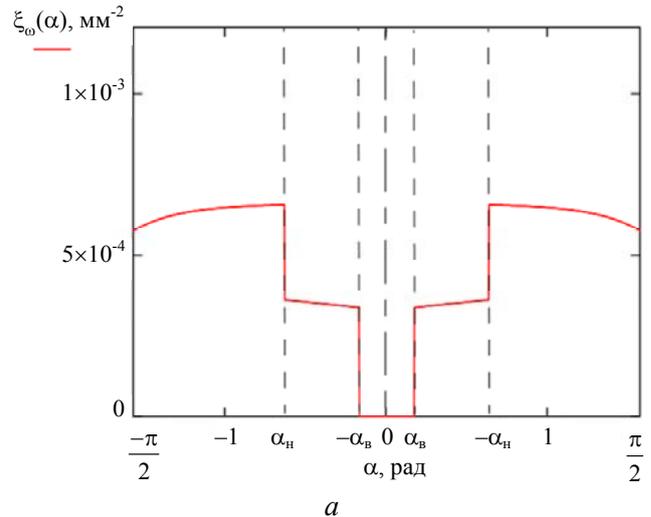


Рис. 5. Графики зависимостей скорости напыления ξ_ω от угла α (а) для внутренней сферы и скорости напыления ξ от координаты X для ножки (б).

Экранирование для создания равнотолщинного покрытия

Наиболее технологичным конструктивным решением является размещение экрана на одной оси с заслонкой магнетрона (см. рис. 2).

Построение взаимного расположения экрана, резонатора и магнетрона при частном случае, рассмотренном выше, когда ось магнетрона совпадает с осью резонатора, изображено на рис. 6. Здесь: A – произвольная точка на сферической поверхности; G – точка пересечения вектора BA с плоскостью экрана S_1S_2 ; G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 – точки пересечения векторов $E_1B, F_1B, F_3B, F_4B, E_2B$, с плоскостью экрана S_1S_2 соответственно. G_1G_5 – функциональная область экрана.

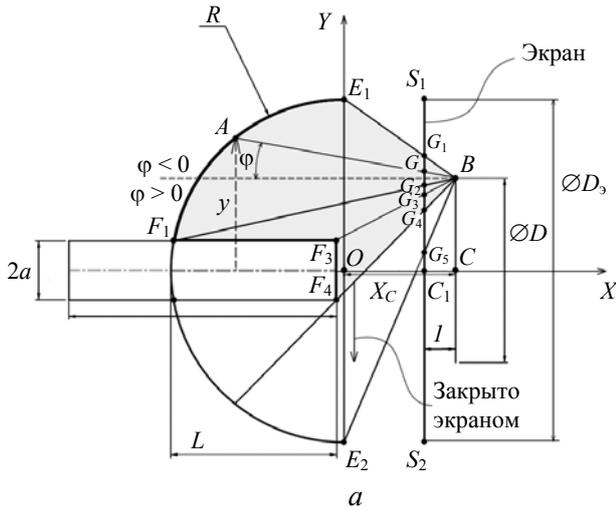
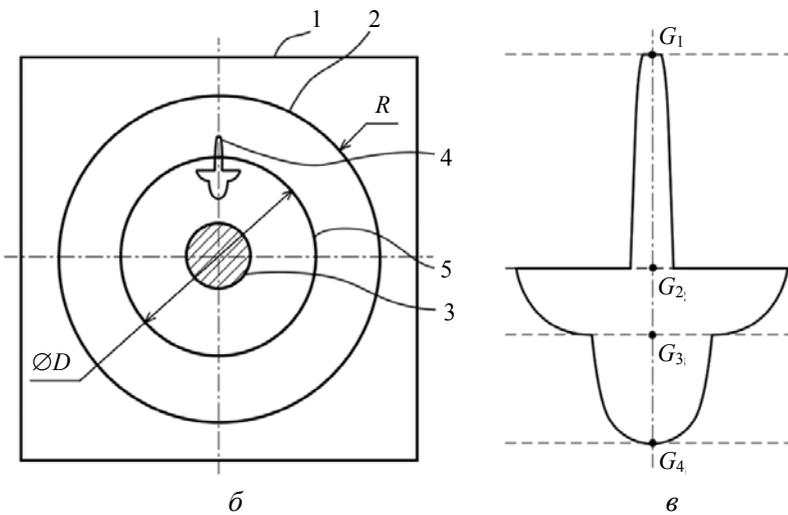


Рис. 6. Определение конфигурации отверстия в экране: принцип расчёта (а), построение в декартовой системе координат положения экрана относительно источника напыления и резонатора (б); возможная форма отверстия в экране (в).



Принципы, в соответствии с которыми определяется форма отверстий в экране:

- напыление на сферическую поверхность осуществляется через щель G_1G_2 , ширина которой в точке G обратно пропорциональна скорости напыления в точке A ;
- напыление на цилиндрическую поверхность ножки резонатора осуществляется через широкое отверстие G_2G_3 , не ограничивающее или слабо ограничивающее скорость роста пленки на этой поверхности, и ширина которой в точке G обратно пропорциональна скорости напыления на ножку в точке A ;
- напыление в точку F_1 пересечения сферической и цилиндрической поверхностей осуществляется через наиболее широкую часть отверстия в точке G_2 .
- напыление в торец F_3F_4 ножки резонатора осуществляется через широкое отверстие G_3G_4 , без ограничения скорости роста пленки;
- напыление на нижнюю часть резонатора исключается отсутствием отверстий в области G_4G_5 экрана.

Итоговая конфигурация отверстия в экране представлена на рис. 6, в.

Для повышения производительности напыления экран может содержать круговой массив отверстий, как это показано на рис. 7.

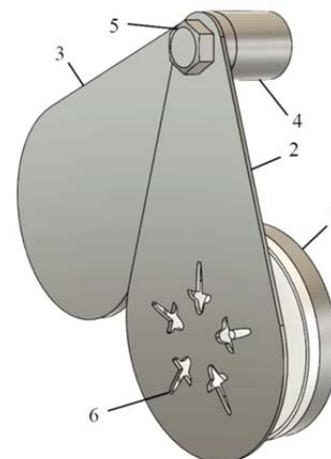


Рис. 7. Относительное расположение магнетрона и экрана: 1 – магнетрон; 2 – экран; 3 – заслонка; 4 – место крепления заслонки и экрана к магнетронной установке; 5 – крепежный болт; 6 – отверстия.

Эксперимент

Экспериментальное исследование проводили на установке магнетронного напыления ROVAC VSM300.

Для обеспечения возможности измерения толщины покрытия профилографическим методом, поверхность близкую к внутренней сферической, составили из плоских образцов-пластинок, зафиксированных на определенном расстоянии друг от друга (рис. 8). Пластинки были изготовлены разрезанной алмазным диском стандартной полированной подложки из монокристаллического кремния диаметром 60 мм и толщиной 200 мкм. Ширина пластинок составляла 4 мм, длина – 6 мм, толщина – 200 мкм. Для фиксации пластинок они крепились на специальный термостойкий скотч на расстоянии 0,8 мм друг от друга.

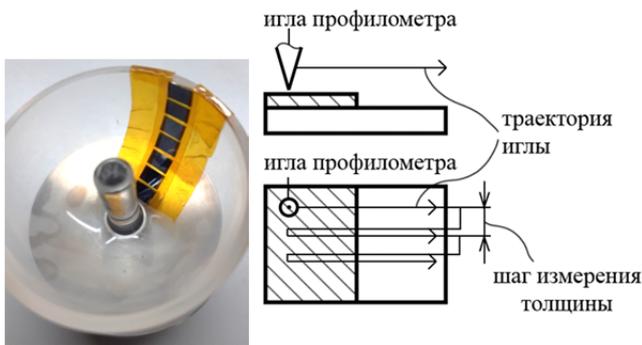


Рис. 8. Расположение образцов-пластинок на внутренней поверхности резонатора (а) и траектории движения иглы профилографа-профилометра при измерениях (б).

На половину каждой пластинки вдоль полосы наносили маску для процесса напыления. Перед измерениями маску удаляли.

Измерение толщины покрытия на пластинке проводили на профилографе-профилометре Taylor Hobson PGI 420 так, чтобы игла профилометра за один заход проходила по поверхности напыленного металла и поверхности кремния. Данные о распределении толщины покрытия вдоль полосы с пластинками получали проведением множества таких измерений с шагом 1 мм.

Для напыления резонатор располагали в вакуумной камере наклонно. На рис. 9 представлены углы и расстояния, соответствующие моменту расположения оси собственного вращения детали в плоскости, проходящей

через ось ее переносного вращения, перпендикулярно плоскости магнетрона. Частота вращения карусели $n_2 = 5$ об/мин. Частота вращения резонатора вокруг своей оси $n_1 = 12$ об/мин. Ионную очистку поверхности резонатора производили в течение $t = 15$ мин. Продолжительность процесса напыления составляла $t = 180$ с.

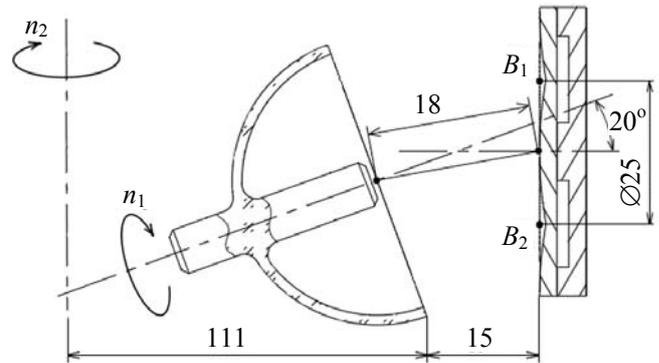


Рис. 9. Схема взаимного расположения резонатора и мишени: B_1 , B_2 – источники распыления; n_1 , n_2 – частоты вращения резонатора и карусели.

Откачивали вакуум до величины остаточного давления $P_{нач} = 4 \times 10^{-6}$ мм.рт.ст. Подачей в камеру аргона доводили вакуум до рабочего давления $P_{раб} = 2,2 \times 10^{-3}$ мм.рт.ст.

На основе результатов, полученных при 31 измерении вдоль полоски с пластинками, получили диаграмму зависимости толщины покрытия от номера измерения, представленную на рис. 10. Эта диаграмма построена с учётом неодинаковости отстояния различных точек плоскости каждой пластины от соответствующей ей точки на внутренней сферической поверхности резонатора.

Пренебрегая значением времени напыления и коэффициентами k_1 и k_2 из формулы (1), можно наложить расчетный и экспериментальный графики друг на друга, как это показано на рис. 10. По оси ординат: для экспериментального графика – толщина покрытия; для расчетного графика – скорость напыления в масштабе, удобном для сравнения графиков.

Резкое снижение толщины покрытия у ножки, представленные точками 1–3 на расчетном графике и точками а–с на экспериментальном графике, объясняется экранированием полусферической поверхности ножкой резонатора. Разницу в ширине этой зоны можно объяснить наклоном резонатора относительно

магнетрона в эксперименте и отсутствием наклона в расчетной модели. Меньшую разницу между большим и меньшим значениями в этом промежутке на экспериментальном графике можно объяснить наличием сложного вращения резонатора в эксперименте, в отличие от простого вращения резонатора вокруг своей оси в расчетной модели.

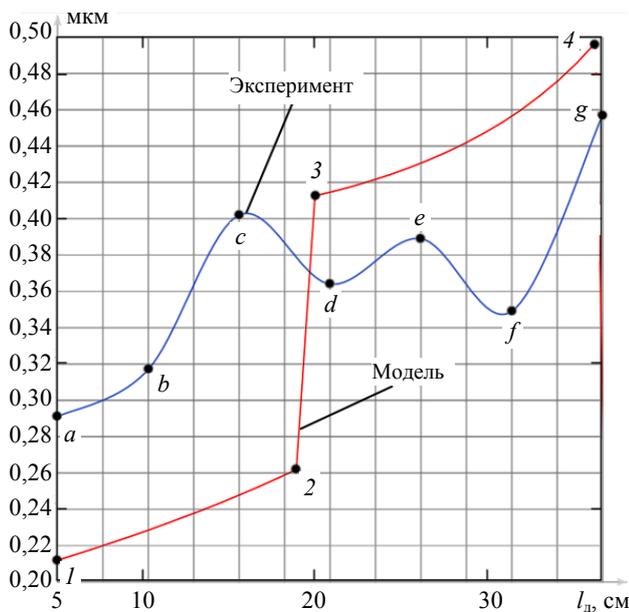


Рис. 10. Совмещение результатов эксперимента с расчётом по предложенной модели.

Так же локальные минимумы значения толщины в измерениях d и f можно объяснить экранированием поверхности в результате сложного вращения резонатора. Можно предположить, что экраном в этих точках являются либо ножка резонатора, либо внешняя полусферическая поверхность резонатора.

На основании результатов экспериментальных исследований, уточняющих разработанную аналитическую модель, можно предложить оптимальную конфигурацию отверстия в экране, представленную на рис. 11. Поскольку необходимо учесть уменьшение толщины покрытия в точках d и f , то в областях отверстия, через которые происходит напыление в эти точки, ширина щели должна быть увеличена. В отличие от соосного (рис. 7), при наклонном расположении резонатора экран должен содержать лишь одно такое отверстие.

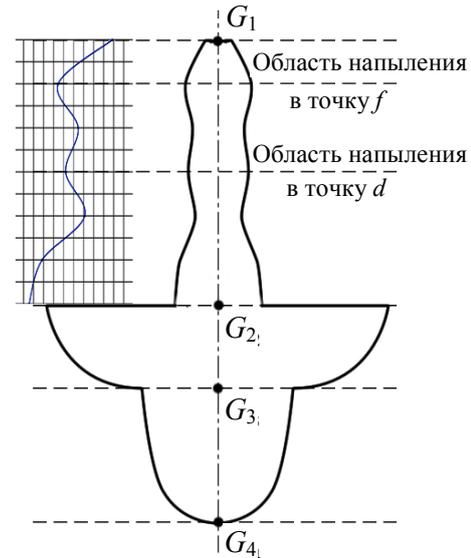


Рис. 11. Форма отверстия в экране для напыления на ножку резонатора и внутреннюю сферическую поверхность.

Заключение

Создана математическая модель для визуализации скорости магнетронного напыления на внутреннюю полусферическую поверхность резонатора и цилиндрическую поверхность ножки резонатора волнового твердотельного гироскопа при соосном расположении резонатора и магнетрона с вращением резонатора вокруг своей оси. Это позволяет понизить разнотолщинность получаемого покрытия на основе применения разработанной методика определения оптимальной формы отверстия в экране для напыления на внутреннюю поверхность резонатора.

Созданная математическая модель позволяет определить распределение скорости напыления и разнотолщинность покрытия как на внутренней поверхности так и на ножке резонатора ВТГ при магнетронном напылении. Для обеспечения минимальной разнотолщинности покрытия разработана методика экспериментально-аналитической оптимизации конфигурации отверстия в экране, неподвижном относительно магнетрона.

Результаты выполненной работы используются на филиале ЦЭНКИ «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bryan G. H.* On the beats in the vibrations of revolving cylinder or bell. – Cambridge: Proc. Cambr. Phil. Soc., 1890.
2. *Ишлинский А. Ю.* Классическая механика и силы инерции. – М.: Наука, 1987.
3. *Журавлев В. Ф., Климов Д. М.* Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985.
4. *Loper E. J., Lynch D. D.* Projected System Performance based on Recent HRG Test Result. Proceedings of the IEEE/AIAA 5th Digital Avionics System Conference, Seattle, WA, USA, 31 October–3 November 1983; pp. 1811–1816.
5. *Волчихин И. А., Волчихин А. И., Малютин Д. М. и др.* // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 9. Ч. 2. С. 59.
6. Переваги використання динамічно настроюваних гіроскопів у безплатформових інерціальних навігаційних системах / О.М. Сапегін, М.О. Романов // Актуальні задачі сучасних технологій: Збірник тез доповідей Том 1. IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, 25–26 листопада 2015р., м. Тернопіль. – 2015. С. 32–33.
7. *Рогинский В. Д., Юрманов С. Ю., Денисов Р. А.* Патент 2518632. Российская Федерация. Способ возбуждения колебаний в чувствительном элементе твердотельного волнового гироскопа и устройство для его осуществления: № 2012137980/28; заявл. 05.09.2012; опубл. 10.03.2014.
8. *Вахлярский Д. С.* Оптимизация формы резонатора волнового твердотельного гироскопа по критерию минимума расщепления собственных частот: дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 195 с.
9. *Loper Jr. E. J., Lynch D. D.* Патент 4157041. United States. Sonic vibrating bell gyro: № 05/908,548; заявл. 22.05.1978; опубл. 05.06.1979.
10. *Loper Jr. E. J., Lynch D. D.* Патент 4951508. United States. Vibratory rotation sensor: № US07/366,223; заявл. 12.06.1989; опубл. 28.08.1990.
11. *Окада С.* Метод вакуумного испарения // Кагаку то коге (яп.). 1985. Т. 59. № 3. С. 95.
12. *Чижев А. С., Евлашин О. А., Веричев В. В.* Геометрическая модель процесса напыления покрытия на полусферическую поверхность в магнетронной распылительной системе. Сб.: Новые тенденции в развитии технологических процессов производства материалов и изделий. – М., 1990. С. 12–19.
13. *Лукин Б. С.* Физико-химические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. – М.: Изд-во МАИ, 2005.
14. *Заболотный В. Т., Вальднер В. О., Старостин Е. Е.* // Перспективн. матер. 1996. № 4. С. 29.
15. *Шишлов А. В.* Технологическое обеспечение равномерности покрытий для деталей гироскопических приборов на установках магнетронного напыления: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 205 с.
16. *Сагателян Г. Р., Шишлов А. В., Шашурин В. Д.* // Технология металлов. 2017. № 4. С. 22.
17. *Sagatelyan G. R., Shishlov A. V., Shashurin V. D.* // Russian metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017. № 13. P. 1165.
18. *Шишлов А. В., Сагателян Г. Р.* // Приборы. 2015. № 3. С. 37.

PACS: 81

Ensuring uniform thickness of the conductive coating on the inner surface of the hemispherical resonator by magnetron sputtering

V. S. Kondratenko¹, G. R. Sagatelyan², A. V. Shishlov³, and M. N. Bilinkin³

¹ MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia
E-mail: vsk1950@mail.ru

² FSBEI of HE "Bauman Moscow State Technical University (National Research University)"
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

³ Division of JSC TsENKI – "Kuznetsov research institute of applied mechanics"
12A Prud-Klyuchiki st., Moscow, 111024, Russia

Received October 11, 2021

The possibilities of technological ensuring of the uniformity of thickness distribution of a thin-film metal coating produced by magnetron sputtering on the inner surface of a thin-walled silica resonator made in the shape of a hemisphere are considered. The possibility of

minimizing the thickness of the coating by optimizing the diameter of the annular magnetron emission zone in combination with the distance from the resonator to the target made of sprayed material is shown. A further increase in the evenness of thickness of the coating is possible on the basis of the use of a fixed screen with a hole, the shape and location of which are calculated analytically, and the final configuration of the contour is specified empirically.

Keywords: wave solid-state gyroscope, resonator, hemisphere, thin-film coating, thickness uniformity, magnetron sputtering, shielding, kinematics, spatial planetary mechanism.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-6-523-532

REFERENCES

1. G. H. Bryan, *On the beats in the vibrations of revolving cylinder or bell*. (Cambridge: Proc. Cambr. Phil. Soc., 1890).
2. A. Yu. Ishlinskiy, *Classical mechanics and inertia forces*. (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].
3. V. F. Zhuravlyov and D. M. Klimov, *Wave solid-state gyroscope*. ed. A.Yu. Ishlinskiy (Nauka, Moscow, 1985) [in Russian].
4. E. J. Loper and D. D. Lynch, Projected System Performance based on Recent HRG Test Result. in *Proceedings of the IEEE/AIAA 5th Digital Avionics System Conference*. (Seattle, WA, USA, 31 October–3 November 1983); pp. 1811–1816.
5. I. A. Volchikhin and D. M. Malyutin, *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, Vip. 9, Ch. 2, 59 (2017) [in Russian].
6. O. M. Sapegin and M. O. Romanov, *Perevagi vikoristaniya dinamichno nastroyuvannikh giroskopiv u bezplat-formovikh inertsiálnikh navigatsiynikh sistemakh. Aktualni zadachi suchasnikh tehnologiy: Zbirnik tez dopovidey. Tom 1. IV Mizhdunarodnoy nauko-technichnoy konferentsii molodikh uchionikh ta studentiv, 25–26 listopada 2015 r., Ternopol. 2015. P. 32–33* [in Ukrainian].
7. V. D. Roginskiy, S. Yu. Yurmanov, and R. A. Denisov, Method of excitation of oscillations in the sensing element of a solid-state wave gyroscope and a device for its implementation. *Rus. Patent No. 2012137980*. on 10.03.214 [in Russian].
8. D. S. Vakhlyarskiy, Optimization of the resonator shape of a wave solid-state gyroscope according to the criterion of minimum splitting of natural frequencies / dissertation for the degree of Candidate of Technical Science (BMSTU, Moscow, 2019). – 195 p. [in Russian].
9. E. J. Loper Jr. and D. D. Lynch, Sonic vibrating bell gyro. United States Patent No. 4157041 US05/908,548; on 05.06.1979.
10. E. J. Loper Jr. and D. D. Lynch, Vibratory rotation sensor. United States Patent No. 4951508 US07/366,223; on 28.08.1990.
11. S. Okada, *Kigaku to koge* **59** (3), 95 (1985) [in Japanese].
12. A. S. Chizhov, O. A. Yevlashin, and V. V. Verichev, Geometric model of the process of coating spraying on a hemispherical surface in a magnetron spray system. *Noviye tendentsii v razvitii tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva materialov i izdeliy*. Moscow, 1990. P. 12–19 [in Russian].
13. B. S. Lunin, *Physico-chemical fundamentals of the development of hemispherical resonators of wave solid-state gyroscopes*. (MAI Publisher, Moscow, 2005) [in Russian].
14. V. T. Zabolotniy, V. O. Valdner, and E. E. Starostin, *Perspektivniye materialy*, No. 4, 29 (1996) [in Russian].
15. A. V. Shishlov, Technological provision of uniformity of coatings for parts of gyroscopic devices on magnetron sputtering installations / dissertation for the degree of Candidate of technical sciences (BMSTU, Moscow, 2016). – 205 p. [in Russian].
16. G. R. Sagatelyan, A. V. Shishlov, and V. D. Shashurin, *Technologiya metallov*, No. 4, 22 (2017) [in Russian].
17. G. R. Sagatelyan, A. V. Shishlov, and V. D. Shashurin, *Russian metallurgy (Metally)* **2017** (13), 1165 (2017).
18. A. V. Shishlov and G. R. Sagatelyan, *Pribori*, No. 3, 37 (2015) [in Russian].