

ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ УЗЛОВ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В. А. ВАЛЕТОВ¹, О. С. ЮЛЬМЕТОВА², А. Г. ЩЕРБАК²

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: valetov.v@mail.ru

²ОАО Концерн ЦНИИ „Электроприбор“, 197046, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты работ по обеспечению технологии формирования растрового рисунка на узлах гироскопов, основанной на комплексном применении катодно-ионного напыления и лазерного маркирования тонкопленочного покрытия нитрида титана. Выявлены факторы, существенно влияющие на контрастность растрового рисунка, предложены методы управления этими факторами.

Ключевые слова: пучковые технологии, лазерное маркирование, вакуумное напыление, стехиометрия, нитрид титана.

Повышение точности и надежности гироскопических приборов во многом зависит от разработки качественно новых технологий их изготовления, например, электрофизических методов бездеформационного формообразования. Использование пучковых технологий (например, светолучевой и ионно-вакуумной обработки) обеспечивает требуемые параметры качества указанных изделий. В работе исследуется комбинированное применение технологий вакуумного напыления и лазерного маркирования как метода формирования растрового рисунка на поверхности узлов, являющихся важнейшими элементами оптоэлектронных систем съема информации в гироскопах.

Примером изделий с оптическими системами съема информации могут являться карданные и бескарданные электростатические гироскопы (ЭСГ). Подобные приборы разработаны в России, США и Франции, тогда как попытки их создания в ряде стран Европы (Англия, Германия, Италия) и Азии (Япония, Китай) не привели к успеху. В настоящее время наша страна экспортирует эти приборы, однако передовые позиции РФ в этой области могут быть утрачены, если технологии изготовления не будут развиваться в направлениях, обеспечивающих повышение точности, надежности и расширение функциональных возможностей приборов.

Технические характеристики карданных и бескарданных ЭСГ достигли такого уровня, что именно устройство съема информации становится препятствием для их совершенствования.

Сферический ротор, изготавливаемый, как правило, из бериллия, является основным узлом системы съема информации с ЭСГ. Существующая технология изготовления ротора ЭСГ включает последовательные операции формообразования бериллиевой сферической заготовки, сферодоводки и балансировки ротора, нанесения на сферическую поверхность ротора тонкопленочного покрытия нитрида титана (TiN) методом катодно-ионной бомбардировки, создания растрового рисунка посредством лазерного маркирования. Требуемое качество растра достигается с помощью лазерного маркирования, позволяющего формировать светоконтрастный рисунок практически на любом материале, обеспечивая высокую точность параметров процесса (мощность лазерного излучения, скорость движения луча, частоту следования импульсов и т.д.) [1].

Рисунок формируется за счет образования оксидной пленки под действием лазерного излучения, параметры этого процесса можно оценить с помощью термодинамических расчетов [2].

Выбирают такие режимы лазерной обработки, чтобы толщина полученного растрового рисунка была меньше толщины покрытия, это обеспечивает возможность построения алгоритма технологического процесса с обратными связями, т.е. позволяет при каких-либо отклонениях в параметрах готового ротора стравливать и повторно наносить износостойкое покрытие и формировать растровый рисунок. Это особенно важно, поскольку наиболее трудоемкими операциями изготовления ротора являются балансировка и сферодоводка (должна обеспечиваться геометрическая точность окончательно обработанной сферы с точностью до десятых и сотых долей микрометра).

Вместе с тем указанная технология имеет следующие недостатки:

1) для обеспечения требуемой толщины растрового рисунка (0,6—1,5 мкм) необходимо уменьшать интенсивность воздействия лазерного излучения на поверхность покрытия, снижая, в первую очередь, его мощность. Снижение мощности приводит к уменьшению контрастности рисунка [3], что крайне нежелательно, поскольку контрастность растрового рисунка является функциональным параметром ротора, непосредственно определяющим эксплуатационные характеристики гироскопа;

2) сложность получения требуемых значений контрастности и степени равномерности растрового рисунка растра за счет увеличения толщины покрытия TiN и, как следствие, растра, поскольку толщина покрытия более 2 мкм негативно сказывается на таких характеристиках ротора, как дисбаланс и геометрия;

3) низкая эффективность процесса варьирования всем комплексом параметров процесса лазерного маркирования (мощность излучения лазера, скорость перемещения сканера, плотность линий, частота следования импульсов) при толщине растра, не превышающей толщины покрытия TiN. Каждый указанный параметр в различной степени влияет на коэффициент отражения и толщину растра. Однако сложные комбинации всех параметров трудно обеспечивать с необходимой точностью, что определяет низкий уровень практической реализации.

Целью исследования являлось расширение технологических возможностей комбинированного использования двух пучковых технологий — вакуумного напыления и лазерного маркирования — в процессе изготовления ротора электростатического гироскопа. Для достижения поставленной цели следовало решить задачу выявления для последовательно выполняемых операций катодно-ионного напыления и лазерного маркирования общих признаков в растровом рисунке.

Рассмотрев механизмы формирования покрытия TiN при напылении и лазерном маркировании, можно отметить, что в обоих случаях большое значение имеют структурно-фазовые характеристики материала, которые влияют на свойства растрового рисунка. Для TiN, представляющего собой твердый раствор внедрения с широкой областью гомогенности, при стандартных условиях и режимах вакуумного напыления, цвет покрытия образцов изменяется от светлого золотисто-желтого (давление азота $P = 0,035$ Па) до темного золотисто-желтого ($P = 1,04$ Па) [3]. При $P = 0,058—0,81$ Па формируется мелкая плотная текстура, близкая к структуре TiN. Можно сказать, что при $P < 0,058$ Па образуется нитрид титана TiN_x , где $x = 0,58—1,00$.

При лазерном маркировании растрового рисунка весьма важно обеспечить его контрастность ($K = 0,55—0,75$) [4]:

$$K = \frac{R_b - R_r}{R_b + R_r}, \quad (1)$$

где R_b и R_r — коэффициенты отражения базовой (покрытой нитридом титана) и растровой поверхности ротора соответственно.

Из выражения (1) следует, что получить необходимое значение K можно, варьируя как величину R_r , определяемую параметрами процесса лазерного маркирования, так и R_b , задаваемую стехиометрией покрытия TiN.

Экспериментально выявлено, что наиболее эффективный способ получения раstra с требуемой контрастностью и толщиной — варьирование стехиометрического состава TiN с приближением цвета к светлому золотисто-желтому.

В процессе лазерного маркирования происходит изменение структурно-фазового состава покрытия с окислением его поверхности и образованием оксидов титана, из которых основными являются TiO_2 , Ti_2O_3 и TiO (в качестве материала покрытия применяют вещества от TiO_2 до Ti_2O_3). С точки зрения получения требуемой контрастности раstra наибольший интерес представляет оксид Ti_2O_3 , который имеет темно-фиолетовый цвет. Условия формирования Ti_2O_3 определяются посредством термодинамических расчетов и уточняются экспериментально.

Таким образом, поставленная в работе задача была решена выбором структурно-фазового состава покрытия TiN в качестве общего признака последовательных процессов формирования покрытия и лазерного маркирования, а достижение цели обеспечено тем, что процесс нанесения покрытия осуществляют в условиях, определяющих образование нитрида титана формулы TiN_x , где $x=0,6—0,9$. Покрытия указанного состава формируют, регулируя давление азота при вакуумном напылении в пределах $0,45—0,75$ от значения давления, требуемого для получения стехиометрического состава покрытия [5].

Таким образом, предложенная технология базируется на комплексном применении вакуумного напыления покрытия TiN и лазерного маркирования рисунка, выявлено, что общим регулируемым фактором является структурно-фазовый состав покрытия. Определены технологические методы регулирования этого фактора. В процессе напыления регулируется стехиометрия покрытия TiN, а на стадии лазерного маркирования — химический состав рисунка. В целом это значительно повышает уровень технологического обеспечения процесса изготовления ротора ЭСГ и позволяет получить качественно новые функциональные параметры растрового рисунка.

Предложенное решение позволяет не только расширить технологические возможности процесса изготовления ротора, но и улучшить экономические показатели, так как гарантированно обеспечивает возвратный характер процесса и дает возможность повторного выполнения наиболее критичных и важных операций при изготовлении таких трудоемких конструкций, как ротор электростатического гироскопа.

При апробации предложенной технологии в ГНЦ РФ ЦНИИ „Электроприбор“ изготовлена опытная партия бериллиевых роторов электростатических гироскопов, получены положительные результаты. В настоящее время разрабатывается техническая документация для ее использования в серийном изготовлении электростатических гироскопов (роторов).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-08-31097

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юльметова О. С. Разработка технологических методов управления функциональными характеристиками узлов гироскопов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2011. 24 с.
2. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Юльметова Р. Ф. Анализ химических взаимодействий при лазерном маркировании растрового рисунка на узлах гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. Вып. 05 (75). С. 91.
3. Матлахов В. П. Зависимость физико-механических свойств нитрид-титановых покрытий от давления азота // Вестн. БГТУ. 2006. № 2. С. 93—96
4. Юльметова О. С., Щербак А. Г. Исследование процесса формирования светоконтрастного раstra посредством лазерного маркирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. Вып. 05(69). С. 28—34.

5. Патент РФ № 2498224. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, Б. Е. Ландау, А. Я. Бузык, В. П. Вейко, В. А. Валетов. 10.11.2013.

Сведения об авторах

- Вячеслав Алексеевич Валетов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Ольга Сергеевна Юльметова** — канд. техн. наук; ОАО Концерн ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: olga@yulmetova.ru
- Александр Григорьевич Щербак** — д-р техн. наук; ОАО Концерн ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: a_sch@gtn.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Валетов В. А., Юльметова О. С., Щербак А. Г. Применение пучковых технологий при изготовлении узлов гироскопических приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 308—311.

APPLICATION OF BEAM TECHNOLOGIES TO GYROSCOPIC INSTRUMENT MANUFACTURING

V. A. Valetov¹, O. S. Yulmetova², A. G. Scherbak²

¹ ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: valetov.v@mail.ru

² Concern CSRI Elektropribor, JSC, 197046, Saint Petersburg, Russia

Technology of raster drawing on gyroscopic instrument components is considered. Results of investigation carried out to support the technology based on integrated application of as cathode-ion sputtering of titanium nitride coating and laser marking of the coating are presented. Factors significantly affecting the raster drawing contrast are revealed, methods for control over the factors are proposed.

Keywords: beam technologies, laser marking, vacuum deposition, stoichiometry, titanium nitride.

Data on authors

- Vyacheslav A. Valetov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Olga S. Yulmetova** — PhD; Concern CSRI Elektropribor, JSC; E-mail: olga@yulmetova.ru
- Alexander G. Scherbak** — Dr. Sci.; Concern CSRI Elektropribor, JSC; E-mail: a_sch@gtn.ru

Reference for citation: Valetov V. A., Yulmetova O. S., Scherbak A. G. Application of beam technologies to gyroscopic instrument manufacturing // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 4. P. 308—311 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-308-311