

УПРАВЛЕНИЕ КОНТРАСТНОСТЬЮ РАСТРОВОГО РИСУНКА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

О. С. ЮЛЬМЕТОВА¹, А. Г. ЩЕРБАК¹, В. П. ВЕЙКО²,
С. А. ЩЕРБАК³, Р. Ф. ЮЛЬМЕТОВА²

¹ОАО «Концерн ЦНИИ „Электронприбор“», 197046, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: olga@yulmetova.ru

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий
Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия

Предложена расчетная методика определения условий и области варьирования параметров лазерной маркировки растровых рисунков на сферических роторах электростатических гироскопов. Методика обеспечивает возможность управления контрастом раstra при сохранении погрешности на уровне сотых долей микрометра. Разработаны средства математического обеспечения, основанные на моделировании процесса управления контрастностью. На первом этапе процедуры используется непараметрическая аппроксимация (известными считаются лишь самые общие сведения об изучаемой зависимости, которая выявляется в общем виде), а на втором — параметрическая аппроксимация (модель изучаемой зависимости считается известной и осуществляется количественное обозначение параметров модели). Обоснована целесообразность использования предложенной модели при лазерной маркировке для общего случая и для конкретного варианта маркирования тонкопленочного покрытия нитрида титана. Представлено семейство кривых, определяющих зависимость контраста от мощности лазера для различных вариантов стехиометрического состава нитрида титана TiN_x ($x = 0,80—1,00$). Приведены результаты практического использования технологии.

Ключевые слова: лазерная маркировка, растровый рисунок, контраст, моделирование, аппроксимация, нитрид титана, стехиометрия.

Введение. Широкое использование лазерных технологий в различных областях науки и техники [1] позволило на качественно новом уровне преодолеть технологические проблемы маркировки растровых рисунков [2—4] на прецизионных узлах гироскопических приборов [5], в частности, сферических роторов электростатического гироскопа [6, 7], используемого на космических объектах и в морских навигационных системах. Растровый рисунок является основным элементом оптоэлектронной системы съема информации с ротора. При этом максимальная погрешность изготовления ротора составляет сотые доли микрометра, что во многом обуславливает точность гироскопа.

Для управления свойствами формируемого на тонкопленочном покрытии растрового рисунка [8] возможно использовать дополнительные факторы, например изменение стехиометрии покрытия, — с целью регулирования контрастности этого рисунка.

При формировании растрового рисунка необходимо решать многокритериальные задачи обеспечения комплекса требований по контрасту, глубине рисунка раstra и точности его конфигурации в условиях неоднозначной корреляции операций технологического цикла с результатами лазерной маркировки. При этом допустимые отклонения от исходной конфигурации обрабатываемого сферического ротора составляют сотые доли микрометра. Это определяет необходимость разработки технологических приемов и методов, позволяющих формировать растр с возможностью регулирования его основных свойств.

Цель настоящей работы — создание математического обеспечения, позволяющего рассчитать требуемые условия и области варьирования параметров лазерной обработки для формирования растровых рисунков на прецизионных поверхностях узлов giroприборов.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- выбрать наиболее значимую характеристику растрового рисунка;
- определить принципы использования математического аппарата при создании расчетной методики.

Предметом исследования являются режимы формирования на тонкопленочном покрытии нитрида титана светоконтрастного растрового рисунка, предварительно нанесенного на сферическую поверхность ротора электростатического гироскопа [5, 8].

Моделирование технологического процесса лазерного маркирования. Наиболее важной функциональной характеристикой растрового рисунка была выбрана контрастность, в наибольшей степени определяющая качество раstra в целом, а параметром лазерной обработки, определяющим указанную характеристику, — мощность лазерного излучения [2—4]. Как известно, контрастность изменяется за счет варьирования при лазерной маркировке структурно-фазового состава поверхности с образованием модифицированного слоя определенной толщины [9, 10]. Модель процесса управления контрастностью включает в себя последовательные этапы обработки данных, связанные с процедурой выбора оптимальной аппроксимирующей функции [11]. На первом этапе используется непараметрическая аппроксимация (известны лишь самые общие сведения выявляемой в общем виде зависимости), а на втором — параметрическая аппроксимация (модель изучаемой зависимости считается известной), определение параметров модели.

Для выявления зависимости контраста растрового рисунка от мощности лазерного излучения с помощью непараметрической аппроксимации целесообразно построить математическую модель процесса исходя из известных выражений. При этом предполагается, что изменяются только мощность лазера, скорость сканирования, частота следования импульсов и т.д. Кроме того, принято допущение, что при лазерной маркировке условия изменения структурно-фазового состава поверхности постоянны.

Применяя основные положения непараметрической аппроксимации, когда считаются известными лишь самые общие сведения о зависимости контраста растрового рисунка от мощности лазерного излучения, можно использовать следующий алгоритм построения.

Из зависимости $K = \frac{K_6 - K_p}{K_6 + K_p}$ (где K — контрастность растрового рисунка, K_6 — ко-

эффициент отражения базовой поверхности и K_p — коэффициент отражения поверхности раstra, полученного локальной модификацией базовой поверхности), при условии, что зна-

чение $\frac{K_p}{K_6}$ мало, получим

$$K \approx 1 - \frac{K_p}{K_6} \quad (1)$$

Очевидно, что контрастность растрового рисунка определяется изменением величины K_p в процессе воздействия лазерного излучения на базовую поверхность. Например, при лазерной маркировке тонкопленочного покрытия нитрида титана происходит образование оксида титана, что и обеспечивает требуемые значения K_p и, как следствие, K . Подобные процессы можно отнести к термически активируемым [10], поскольку лазерная маркировка основана на локальном нагревании маркируемой поверхности, поэтому они описываются уравнениями Аррениуса и можно предположить, что K_p уменьшается экспоненциально с увеличением мощности P лазера. Отсюда следует:

$$K_p \propto e^{-P/P_0}, \quad (2)$$

где P_0 — мощность, при которой K_p уменьшается в e раз.

Но из формулы (2) следует, что при достаточно больших мощностях $K_p \rightarrow 0$ (следовательно, $K \rightarrow 1$), это соответствует случаю абсолютно черного тела и не отражает реальной физической ситуации. Поэтому разумно ввести поправку: $K_p \approx K_{p\min}^* + K_p$, где $K_{p\min}^*$ — минимально достижимое значение K_p , K_p экспоненциально зависит от мощности лазера и стремится к нулю при достаточно больших мощностях, т.е. $K_p \propto e^{-P/P_0}$ (K_p пропорционально e^{-P/P_0}), или, обозначив в явном виде коэффициент пропорциональности, имеем: $K_p = A e^{-P/P_0}$ (A — константа, конкретизирующая характер зависимости $K_p \propto e^{-P/P_0}$, причем значение A , в свою очередь, зависит от свойств материала и обратно пропорционально K_6).

Таким образом, $K = 1 - \frac{K_{p\min}^* + A e^{-P/P_0}}{K_6}$, или, обозначив $1 - \frac{K_{p\min}^*}{K_6} = K_{\max}$ (минимально достижимое K_p соответствует максимально достижимому K , определяемому характером взаимодействия маркируемого материала с лазерным излучением) и $\frac{A}{K_6} = A$, получим:

$$K \approx K_{\max} - A e^{-P/P_0}. \quad (3)$$

Формула (3) выводилась в предположении малости K_p , при этом $K_p \propto e^{-P/P_0}$. Следовательно, K_p будет мало, если показатель экспоненты большой по абсолютной величине, т.е. формула (3) справедлива для $P \gg P_0$.

На втором этапе выполняется параметрическая аппроксимация, при которой модель изучаемой зависимости считается известной, и осуществляется количественное определение параметров модели.

На рис. 1 приведены результаты аппроксимации экспериментальных данных [11] зависимостью (3) для реального варианта выполнения растрового рисунка на покрытии нитрида

титана (скорость обработки 10 мм/с, частота 20 кГц, плотность линий 500 лин/мм), здесь сплошная кривая — эксперимент, пунктир — расчет.

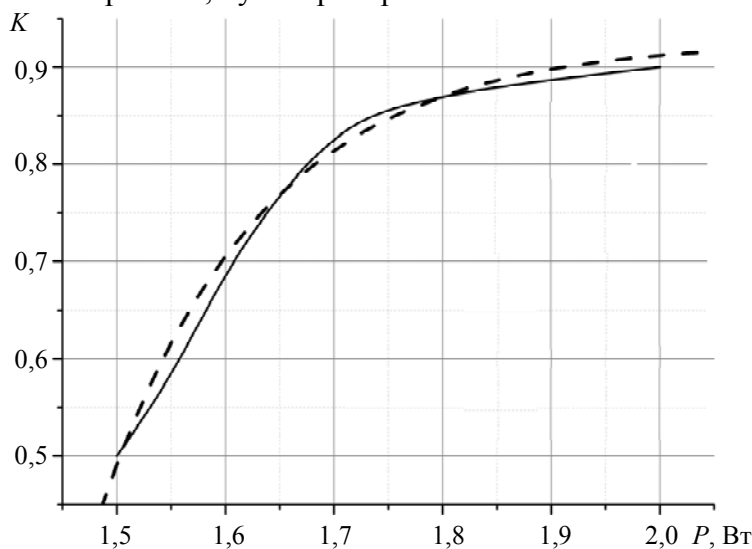


Рис. 1

Для одного из вариантов маркировки нитрида титана подобная аппроксимация позволяет определить следующие значения: $K_{\max} = 0,93$, $P_0 = 0,148$ Вт и $A = 1,1 \cdot 10^4$, т.е. имеем:

$$K \approx 0,93 - 1,1 \cdot 10^4 e^{-P/0,148}.$$

При этом предполагается, что при лазерной маркировке нитрида титана контрастность изменяется с образованием модифицированного слоя определенной толщины вследствие химического взаимодействия в приповерхностном слое (образование оксида титана). Кроме того, принято допущение, что условия протекания указанной выше топочимической реакции с образованием оксида титана постоянны и не влияют на изменение контрастности.

Как видно из рис. 1, параметрическая аппроксимация дает достаточно хорошее приближение, это позволяет считать, что модель является адекватной.

Очевидно, что выражение (3) с учетом принятых допущений можно считать справедливым для термоактивируемых процессов лазерной маркировки в общем виде.

Расширение технологических возможностей процесса лазерной маркировки растровых рисунков посредством регулирования значения K_6 может быть обеспечено варьированием стехиометрического состава нитрида титана [12]. Рассмотрев механизмы формирования покрытия TiN при напылении и лазерной маркировке, можно отметить, что структурно-фазовые характеристики влияют на свойства растрового рисунка. Для TiN, представляющего собой фазу внедрения с широкой областью гомогенности, при стандартных условиях и режимах вакуумного напыления цвет покрытия образцов изменяется от светлого золотисто-желтого до темного золотисто-желтого [12]. В зависимости от парциального давления азота при напылении магнетронным методом образуется TiN_x ($x = 0,58—1,00$).

Экспериментально установлено, что для пленок нитрида титана с недостатком азота можно получить одинаковые значения контрастности при меньшей мощности лазера, что связано с более высокими значениями коэффициента отражения базовой поверхности.

Используя экспериментальные данные, можно предположить, что в зависимости от величины x в выражении (3) будет изменяться значение A . На рис. 2 представлено семейство кривых, определяющих зависимость $K=f(P)$ для различных вариантов стехиометрического состава нитрида титана (1 — $A=0,8 \cdot 10^4$, 2 — $0,9 \cdot 10^4$, 3 — $1,0 \cdot 10^4$, 4 — $1,1 \cdot 10^4$). Кривые 1—3 — теоретические зависимости. Выдвинуто предположение, что изменение стехиометрии соеди-

нения TiN_x в пределах $x=0,7—0,9$ не влияет на характер взаимодействия материала с лазерным излучением, т.е. значения K_{max} и P_0 неизменны.

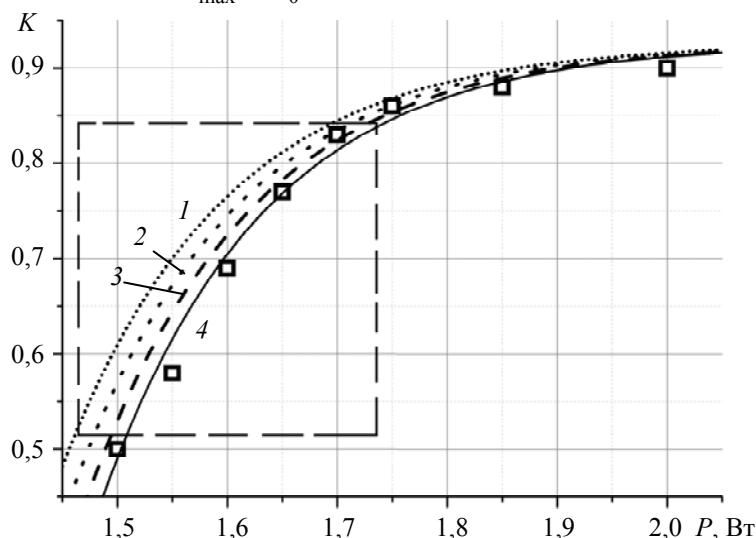


Рис. 2

Изменение параметра A от $0,8 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^4$ соответствует изменению коэффициента x от 0,8 до 0,9. Прямоугольником выделена область наименьшей погрешности расчета контраста при лазерном маркировании, поскольку при больших значениях P может иметь место погрешность, обусловленная высоким значением K_{max} , так как в этой области на конечную контрастность в большей степени влияет увеличение K_0 . Практическое использование технологии лазерного маркирования растрового рисунка с контрастом 0,5—0,8 на реальных роторах показало возможность получения ротора с некруглостью не более 0,05 мм и величиной дисбаланса не более 0,06 мм.

Заключение. Разработанные средства математического обеспечения, определяющие области варьирования параметров лазерной обработки при формировании растровых рисунков, расширяют технологические возможности лазерной маркировки за счет использования моделей для переменного стехиометрического состава базовой маркируемой поверхности, это представляет несомненный практический интерес.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ, соглашение № 14-12-00351, и при поддержке РФФИ, проект № 14-08-31097.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wehner M.* Marking // *Excimer Laser Technology*. 2005. P. 321—330.
2. *Antonczak A. J., Kocou D., Nowak M., Koziol P., Abramski K. A.* Laser-induced colour marking—Sensitivity scaling for a stainless steel // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 264. P. 229—236.
3. *Gorny S. G., Odintsova G. V., Otkeeva A. V., Veiko V. P.* Laser induced multicolor image formation on metal surfaces // *Proc. of SPIE*. 2011. Vol. 7996. P. 799605-1—7.
4. *Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., Golosov E. V., Golosova O. A., Kolobov Yu. R., Ligachev A. E.* Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces // *Appl. Phys. A*. 2012. Vol. 107, N 2. P. 301—305.
5. *Юльметова О. С., Щербак А. Г.* Исследование процесса формирования светоконтрастного растра посредством лазерного маркирования // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2010. № 05(69). С. 28—34.
6. *Peshekhonov V. G.* Gyroscopic navigation systems: Current status and prospects // *Gyroscopy and Navigation*. 2011. Vol. 2, N 3. P. 111—118.

7. Egorov V., Landau B. E., Levin S. L., Romanenko S. G. Rotor motion in a strapdown electrostatic gyro onboard an orbiting spacecraft // Gyroscopy and Navigation. 2012. Vol. 3, N 2. P. 144—151.
8. Пат. 2498224 РФ. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, В. П. Вейко и др. Опубл. 10.11.2013.
9. Veiko V. P., Slobodov A. A., Odintsova G. V. Availability of methods of chemical thermodynamics and kinetics for the analysis of chemical transformations on metal surfaces under pulsed laser action // Laser Physics. 2013. Vol. 23. P. 066001-1—6.
10. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Юльметова Р. Ф. Анализ химических взаимодействий при лазерной маркировке растрового рисунка на узлах гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 05(75). С. 91—96.
11. Лоран П. Ж. Аппроксимация и оптимизация. М.: Мир, 1975.
12. Матлахов В. П. Зависимость физико-механических свойств нитрид-титановых покрытий от давления азота // Вестник БГТУ. 2006. № 2. С. 93—96.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|---|
| Ольга Сергеевна Юльметова | — канд. техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: olga@yulmetova.ru |
| Александр Григорьевич Щербак | — д-р техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: a_sch@gtn.ru |
| Вадим Павлович Вейко | — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра; заведующий кафедрой; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru |
| Сергей Александрович Щербак | — студент; Академический университет НОЦНТ РАН, кафедра физики и технологии наногетероструктур; E-mail: Sergeygtn@yandex.ru |
| Рафия Фагимовна Юльметова | — канд. хим. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра промышленной экологии; E-mail: liya974@mail.ru |

Рекомендована кафедрой
лазерных технологий
и экологического приборостроения

Поступила в редакцию
25.02.15 г.

Ссылка для цитирования: Юльметова О. С., Щербак А. Г., Вейко В. П., Щербак С. А., Юльметова Р. Ф. Управление контрастностью растрового рисунка при лазерной маркировке: моделирование технологического процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 6. С. 485—491.

CONTROL OVER RASTER IMAGE CONTRAST IN LASER MARKING: TECHNOLOGICAL PROCESS MODELLING

O. S. Yulmetova¹, A. G. Shcherbak¹, V. P. Veiko², S. A. Shcherbak³, R. F. Yulmetova²

¹Concern CSRI Elektropribor, JSC, 197046, Saint Petersburg, Russia
E-mail: olga@yulmetova.ru

²ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

³St. Petersburg Academic University — Nanotechnology Research and Education Centre of the RAS,
194021, Saint Petersburg, Russia

A method is proposed for evaluation of conditions and variation interval for laser surface treatment parameters in laser marking of raster images on spherical electrostatic gyroscope rotors. The method makes it possible to manage the raster image contrast at retained accuracy of hundredths of a micrometer. The contrast simulation code is developed on the base of a model of contrast management process in the form of successive stages associated with the procedure of choosing the optimal approximating function. Nonparametric approximation is used at the first stage, when only the most general information on the dependence under investigation is available. At the second stage the model of the dependence is supposed to be known, a parametric approximation is performed and a quantitative indication of the model parameters is carried out. Application of the proposed model for laser marking for the general case and for a particular labeling of thin-film coating of titanium nitride is justified. A family of curves defining the contrast dependence on the laser power for various stoichiometric composition of titanium nitride TiN_x ($x = 0,80—1,00$) is presented. Results of the practical use of the technology are presented.

Keywords: laser marking, raster image, contrast, modeling, approximation, titanium nitride, stoichiometry.

Data on authors

- Olga S. Yulmetova** — PhD; Concern CSRI Elektropribor, JSC;
E-mail: olga@yulmetova.ru
- Alexander G. Shcherbak** — Dr. Sci.; Concern CSRI Elektropribor, JSC;
E-mail: a_sch@gtn.ru
- Vadim P. Veiko** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Laser Technologies and Instrumentation; Head of the Department;
E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Sergey A. Shcherbak** — Student; St Petersburg Academic University — Nanotechnology Research and Education Centre of the RAS, Department of Physics and Technology of Nanoheterostructures; E-mail: Sergeygtn@yandex.ru
- Raliya F. Yulmetova** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Industrial Ecology; E-mail: liya974@mail.ru

Reference for citation: Yulmetova O. S., Shcherbak A. G., Veiko V. P., Shcherbak S. A., Yulmetova R. F. Control over raster image contrast in laser marking: technological process modelling // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 6. P. 485—491 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-6-485-491