

УДК 535.66, 535.392

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ЦВЕТНОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Е.М. Притоцкий^{a,b}, А.П. Притоцкая^{a,b}, А.А. Бурцев^{a,b}, М.А. Панков^{a,b}, О.Я. Бутковский^b, С.М. Аракелян^b

^a Федеральное казенное предприятие «Государственный лазерный полигон «Радуга», Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация

^b Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация
Адрес для переписки: pritotsky@bk.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.03.18, принята к печати 30.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-581-587

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Притоцкий Е.М., Притоцкая А.П., Бурцев А.А., Панков М.А., Бутковский О.Я., Аракелян С.М. Экспериментальные исследования по формированию цветности на поверхности металлов лазерным излучением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 4. С. 581–587. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-581-587

Аннотация

Представлены экспериментальные исследования и способ формирования цветности на поверхности нержавеющей стали при воздействии импульсного лазерного излучения. Описаны методы расчета коэффициента отражения пленок оксида железа на железе. Произведен расчет зависимости коэффициента отражения от длины волны в видимом диапазоне и толщины оксидной пленки на поверхности маркируемой поверхности. Показано влияние толщины оксидной пленки на формируемый цвет поверхности за счет интерференции на системе пленок оксида железа и железа. Показано, как по мере увеличения угла падения функция отражения смещается влево и уменьшается ее амплитуда. По результатам растровой электронной микроскопии зафиксировано значительное увеличение содержания кислорода в местах воздействия, что указывает на образование оксидных пленок. Проведен анализ профиля полученных на поверхности металлов оксидных пленок, показана зависимость цветности модифицируемой поверхности от параметров лазерного излучения.

Ключевые слова

лазерная цветная маркировка, окисление, нержавеющая сталь, покрытие

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-07-00943 А и в рамках базовой части государственного задания ВлГУ № 3.7530.2018/8.9 БЧ.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON CHROMATICITY FORMATION ON METALS SURFACE BY LASER RADIATION

Е.М. Pritotsky^{a,b}, А.П. Pritotskaya^{a,b}, А.А. Burtsev^{a,b}, М.А. Pankov^{a,b}, О.Я. Butkovsky^b, S.M. Arakelyan^b

^a State Laser Proving Ground «Raduga», Raduzhnyi, 600910, Russian Federation

^b Vladimir State University n.a. Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation

Corresponding author: pritotsky@bk.ru

Article info

Received 28.03.18, accepted 30.05.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-581-587

Article in Russian

For citation: Pritotsky E.M., Pritotskaya A.P., Burtsev A.A., Pankov M.A., Butkovsky O.Ya., Arakelyan S.M. Experimental research on chromaticity formation on metals surface by laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 581–587 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-581-587

Abstract

The paper presents experimental studies and the way of chromaticity formation on stainless steel surface at the exposure of pulse laser radiation. Methods of reflection coefficient calculation of oxide iron films on iron are described. We perform calculation of reflection coefficient dependence on wavelength in the visible range and thickness of an oxidic film on the marked surface. The effect is shown that an oxidic film thickness has on the formed surface color owing to interference on the system of films of iron oxide and iron. It is shown how reflection function is displaced to the left and its amplitude

decreases with the hade increase. By results of raster electronic microscopy significant oxygen increase in the places of exposure is recorded that points to formation of oxidic films. The profile analysis of oxidic films obtained on the metals surface is carried out and the dependence of chromaticity of the modified surface on laser radiation parameters is shown.

Keywords

laser color marking, oxidation, stainless steel, coating

Acknowledgements

The study is performed under the grant support of the Russian Foundation for Basic Research No.18-07-00943 A and within the basic unit of VLGU No. 3.7530.2018/8.9 BCh government contract.

Введение

Маркировка выпускаемой продукции является одним из элементов современного технологичного производства. Маркировка детали или конечного изделия позволяет производителю контролировать объем выпускаемой продукции, ее качество, а также продвигать свою торговую марку. Из существующих способов маркировки наиболее технологичным, долговечным и точным является лазерная маркировка [1]. Одним из самых современных видов лазерной маркировки является создание на поверхности изделий цветных пленок – технология цветной лазерной маркировки (ЦЛМ). Помимо декоративного эффекта технология ЦЛМ обладает всеми преимуществами лазерной маркировки, в том числе высокой износостойкостью и разрешением получаемого изображения. Суть технологий нанесения цветных изображений на металлические поверхности заключается в изменении оптических свойств маркируемой области металла в видимом диапазоне длин волн.

В последние годы проявился определенный интерес к управлению оптическими свойствами поверхности путем лазерного окисления и структурирования поверхности металлов [2, 3]. Для нанесения цветных изображений на поверхность металла (рис. 1) применяются и другие технологии – термопечать, порошковая и химическая окраска [4, 5], но проведенный авторами работы [6] маркетинговый анализ показал, что технология ЦЛМ способна конкурировать с существующими технологиями.

За счет воздействия лазерного излучения на поверхности металла происходит локальный нагрев и формирование оксидных пленок, толщина которых зависит от параметров лазерного излучения и химических свойств поверхности металла. При изменении параметров лазерного излучения можно задавать определенную толщину оксидных пленок, которые непосредственно определяют структуру и оптические свойства поверхности металла после воздействия (цветности) [7].

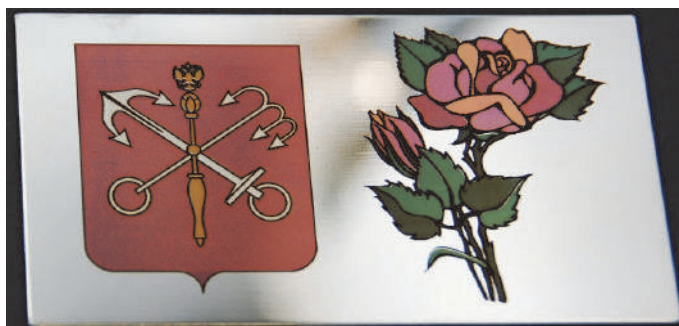


Рис. 1. Примеры цветной маркировки металла, выполненной на маркере МиниМаркер 2 компании ООО «Лазерный центр»¹

Основной целью работы является исследование зависимостей энергетического коэффициента отражения от толщины оксидной пленки железа и длины волны в видимом диапазоне с помощью модельной функции электромагнитной волны, в которой поглощение зависит только от координаты, нормальной к поверхности, и экспериментальное определение параметров лазерного излучения лазерного маркера LDesigner F1 для формирования цветности на поверхности металлов на примере нержавеющей стали.

Компьютерное моделирование оптических свойств оксидных пленок на металлах

Изменение оптических свойств трехслойной системы воздух–оксидная пленка–металл можно рассчитать методами компьютерного моделирования – матричным методом на основе формул Френеля [8] или методом FDTD². Сравнительный обзор метода FDTD и частного метода для расчета энергетических коэффициентов тонкой поглощающей пленки на стекле авторами был представлен в работе [9]. Авторами был выбран первый способ, введена модельная функция волны электромагнитного поля для одной из

¹ Цветная лазерная маркировка металлов [Электронный ресурс]. Режим доступа:

<http://www.newlaser.ru/tech/marking/color.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 20.05.2018).

² Electromagnetic Template Library (EMTL) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fdtd.kintechlab.com/ru/fdtd>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 14.04.2018).

поляризаций, определены уравнения Френеля, с учетом вектора Пойнтинга матричным методом найдены энергетические коэффициенты отражения от многослойной среды при наклонном падении. Особенностью данного способа является использование модельной функции электромагнитной волны, в которой поглощение зависит только от координаты, нормальной к поверхности. Уравнения из авторской работы [10] записаны в среде MATLAB и Microsoft Visual Studio с целью изменения параметров слоев и отслеживания зависимости коэффициента отражения от длины волны в видимом диапазоне.

Такой подход позволил, в том числе, разработать многослойные диэлектрические покрытия, которые обладают большой оптической стойкостью и применяются для формирования зеркал резонатора мощных полупроводниковых лазеров [11].

Исходными данными для моделирования являлись дисперсные зависимости показателей преломления и поглощения от длины волны железа и оксида железа [12, 13], при этом не учитывалась зависимость показателей от толщины пленок, как, например, в работе [14] по расчету коэффициента отражения для пленок оксида титана до 50 нм на титане. Тем не менее, полученные результаты моделирования пленок оксида железа на железе хорошо коррелируют с экспериментальными данными других авторов [15], поэтому такой метод расчета можно использовать для других металлов, используя измеренные зависимости показателей преломления и поглощения, например, с помощью спектрального эллипсометра.

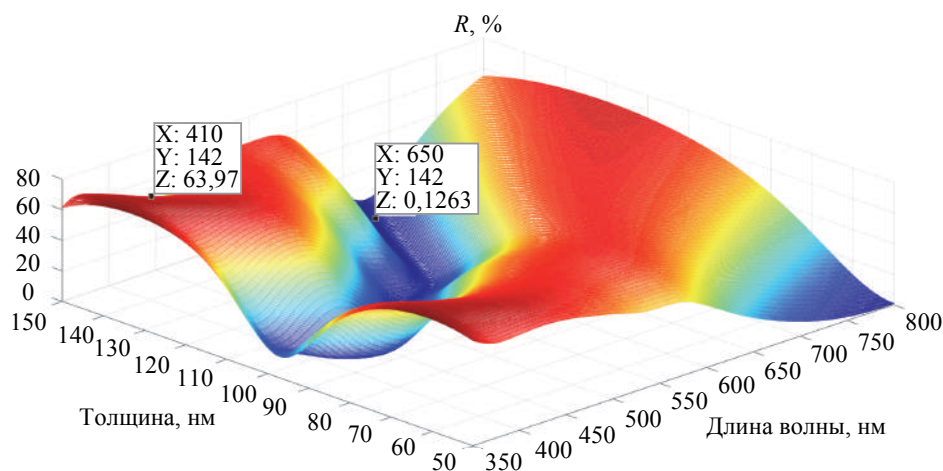


Рис. 2. График зависимости коэффициента отражения (R) от длины волны и толщины оксидной пленки железа, образованной на нержавеющей стали (железо) при нормальном падении

Из графика (рис. 2) видно, что отраженные цвета и оттенки возникают при изменении толщины оксидной пленки. Ярко выраженный синий цвет проявляется при подавлении красного цвета при толщине пленки 142 нм за счет интерференции на тонкой пленке и усиления отраженной волны с длиной волны 410 нм.

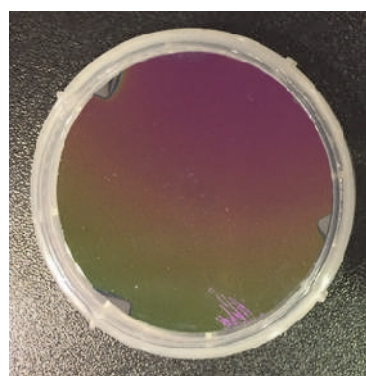
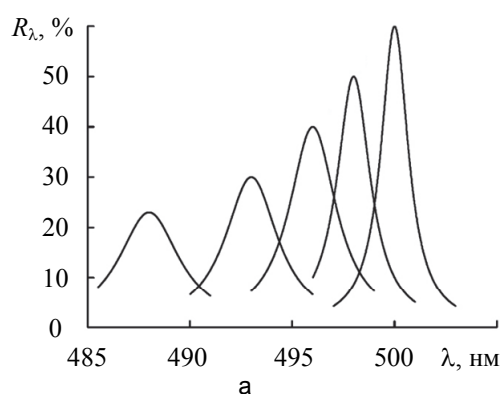


Рис. 3. График зависимости коэффициента отражения (R_i) от длины волны (λ) при разных углах падения (а); пластина кремния Si с нанесенной пленкой оксида кремния SiO_2 толщиной 400–450 нм (б)

Угол падения также влияет на отражательную способность – экстремумы функции отражения смещаются влево, и уменьшается их амплитуда по мере увеличения угла падения (рис. 3, а). Для демонстрации данного явления на полированную пластину кремния была распылена ионно-плазменным методом пленка оксида кремния с градиентной толщиной (от 400 до 450 нм), которая меняет цвет и переливается в зависимости от изменения угла падения света (рис. 3, б).

Эксперименты и результаты

Для проверки компьютерной модели была осуществлена цветная маркировка нержавеющей стали марки AISI304 на маркере с подбором параметров лазерного излучения и исследованы физические и химические свойства поверхности металла методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и растрово-электронной микроскопии (РЭМ).

В настоящей работе для цветной маркировки использовался лазерный маркер LDesigner F1. Данный комплекс построен на базе волоконного импульсного иттербиевого лазера с длительностью импульса 80 нс, мощностью до 10 Вт и частотой, изменяемой в диапазоне 20–100 кГц, и предназначен для лазерной маркировки изделий из металлов, металлов с покрытиями, твердых сплавов, пластиков и некоторых других материалов. Предварительно поверхность металла была отполирована и очищена от органических загрязнений, очищена обезжиривающим раствором, ацетоном, изопропиловым спиртом, деионизированной водой и просушена.

Маркировка осуществляется методом микрогравировки. Метод заключается в том, что сфокусированный лазерный луч с высокой плотностью излучения реализует локальный нагрев поверхности нержавеющей стали, что испаряет материал в месте маркировки. Следовательно, на нержавеющей поверхности возникает конкретный рельеф, глубина которого непосредственно зависит от мощности лазера и времени обработки. Высокая устойчивость функционирования лазерной установки и очень точное локальное распределение энергии лазерного излучения дают возможность на нержавеющей стали создавать эффект цветной маркировки, что напрямую зависит от температуры. Для регулировки температуры нагрева необходимо изменять параметры лазерного излучения – мощность, частоту следования импульсов и скорость перемещения луча.

В первом случае использовалось излучение мощностью 5 Вт, с частотой импульса 100 кГц и скоростью перемещения луча от 10 до 90 мм/с с шагом в 10 мм/с. В первую очередь был проанализирован образец № 2 со скоростью 20 мм/с, так как он дал ярко выраженный зеленый цвет.

В проведенном эксперименте ширина дорожек равна 45,7 мкм (рис. 4, а), максимальная высота неровностей достигает 2,1 мкм (рис. 4, б). Ширина микроканала – более 10 мкм (рис. 4, в), а значит, дифракции света в видимом диапазоне на такой яме быть не может. Такие предположения были сделаны авторами в работе [16]. За формирование зеленого цвета отвечает эффект интерференции на прозрачной тонкой пленке, образованной на поверхности металла.

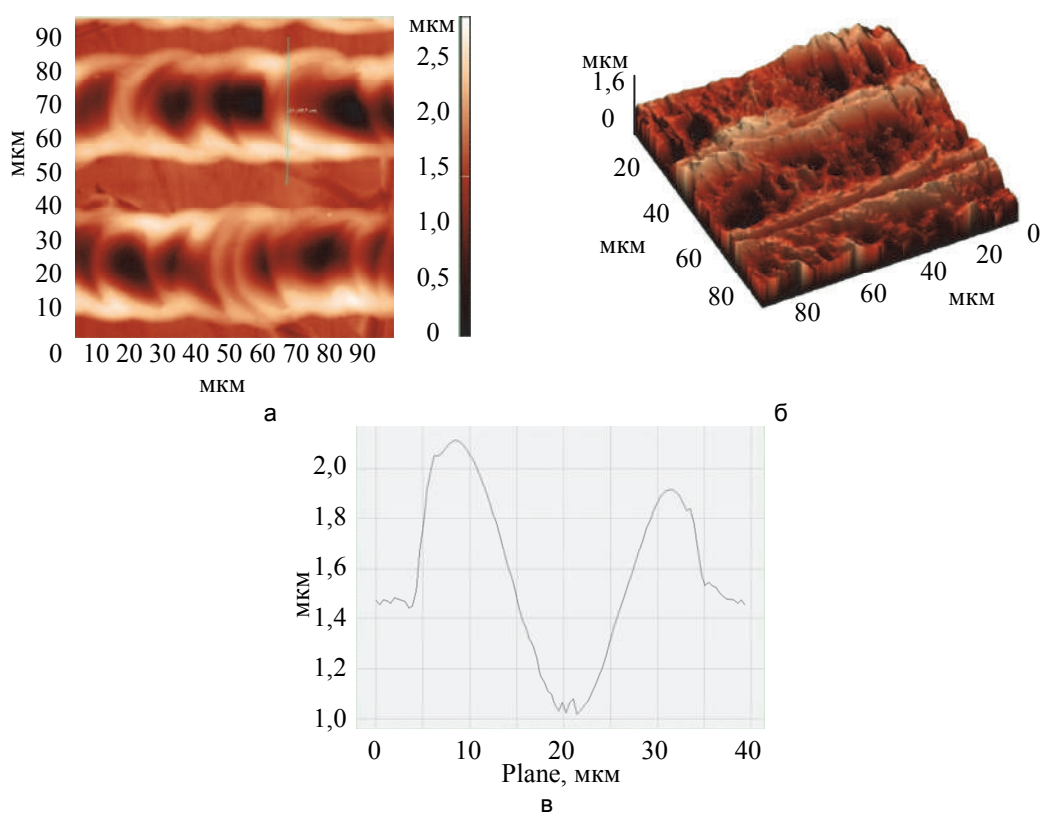


Рис. 4. Образец №2: АСМ-изображение поверхности образца (а); 3D АСМ-изображение микроканала (б); профиль (Plane) микроканала (в)

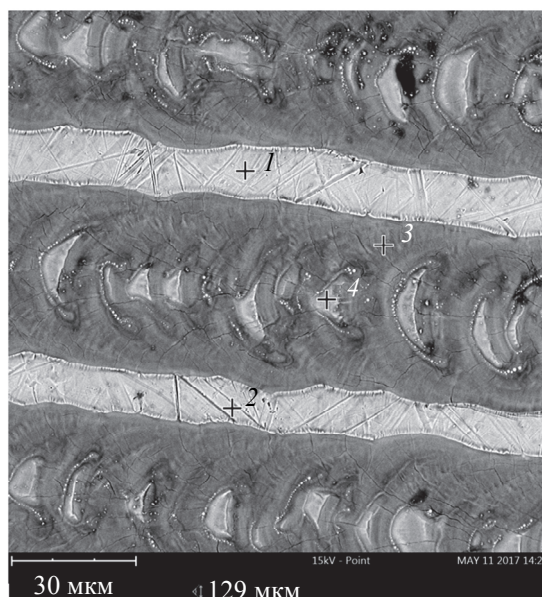


Рис. 5. РЭМ-изображение рельефа поверхности образца №2, где точки № 1, 2, 3 и 4 – обследуемые области

Авторами предполагалось, что оксидные пленки образуются в большей степени на границах канавок, но данные РЭМ показали, что наибольшая высота пленки образовывается по всей площади канавки, за исключением средней линии, где плотность мощности была максимальной.

По результатам энергодисперсионного рентгеновского анализа образца №2 из стали в точках № 1, 2, 3 и 4 (рис. 5) была составлена таблица содержания химических элементов в составе пленки (табл. 1). По данным таблицы можно судить о том, что в состав входит только ряд определенных элементов, а именно, Fe, Cr, Ni, O₂. Повышенное содержание кислорода в точке № 3 свидетельствует об образовании окислов железа в образовавшемся микроканале. В точках № 1 и № 2 также присутствуют оксиды железа, которые образовались в ходе расплава на границах микроканалов. В точке № 4 плотность мощности лазерного излучения превышает значения порога пробоя оксидной пленки, и наблюдается ее разрушение до нижележащего окисленного слоя металла.

Номер точки	Химический элемент				
	Fe	Cr	Ni	O ₂	Σ
1	49,6%	14,7%	5,4%	30,3%	100%
2	44,7%	13,5%	5,0%	36,8%	100%
3	23,8%	13,9%	2,1%	60,2%	100%
4	35,3%	11,7%	4,2%	48,8%	100%

Таблица 1. Результаты химического состава пленки по четырем точкам

Анализ физических и химических свойств поверхности образцов с различными оттенками (рис. 6) показал зависимость цветности металлов оксидных пленок и ее состава от параметров лазерного излучения (табл. 2).

Цвет	Параметры излучения		
	Мощность P, Вт	Частота F, кГц	Скорость перемещения V, мм/с
Розовый	5	100	40
Зеленый	5	100	20
	3,5	44	8
Желтый	5	100	50
Синий	5	44	12

Таблица 2. Полученные оттенки и параметры лазерного излучения

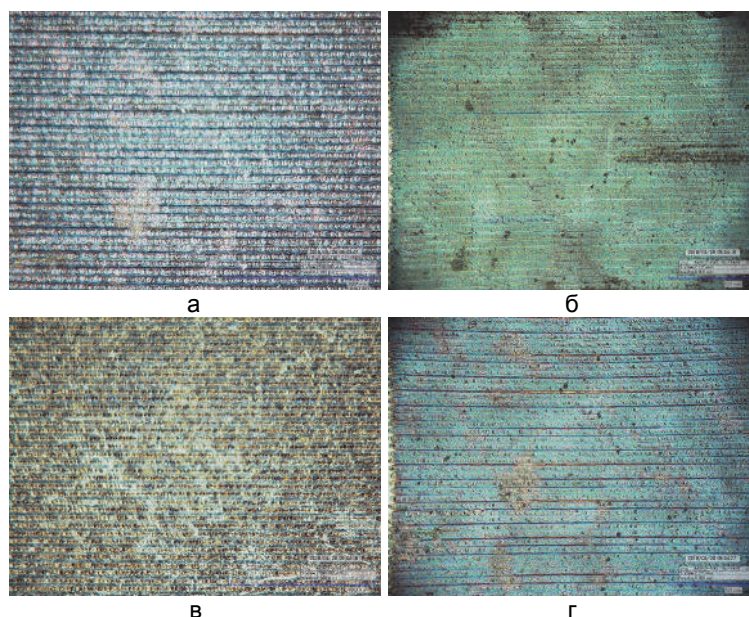


Рис. 6. Фотографии 3×2,25 мм полученных цветов на поверхности образцов: розовый (а); зеленый (б); желтый (в), синий (г)

Заключение

На примере нержавеющей стали рассмотрена технология цветной лазерной маркировки поверхности металлов, которая позволяет изменять их оптические свойства в видимом диапазоне. Авторами проведен расчет энергетического коэффициента отражения от длины волны, толщины оксидной пленки железа на железе и от угла падения света. Выводы, полученные по моделям, подтвердились проведенными авторами экспериментами по лазерной цветной маркировке нержавеющей стали, в ходе которых получились ярко выраженные цвета – от синего до розового. По результатам растровой электронной микроскопии зафиксировано значительное увеличение содержания кислорода в местах воздействия, что указывает на образование оксидных пленок. Проведен анализ профиля полученных на поверхности металлов оксидных пленок, показана зависимость цветности модифицируемой поверхности от параметров лазерного излучения.

Литература

1. Валиулин А., Горный С., Гречко Ю. Патров М., Юдин К., Юревич В. Лазерная маркировка материалов // Фотоника. 2007. № 3. С. 16–22.
2. Баландина Л.Н., Попов К.Л. Изучение особенностей формирования изображений при цветной лазерной маркировке низкоуглеродистых сталей // Студенческая научная весна. Машиностроительные технологии. 2011. С. 1–5.
3. Lochbihler H. Colored images generated by metallic sub-wavelength gratings // Optics Express. 2009. V. 17. N 14. P. 12189–12196. doi: 10.1364/OE.17.012189
4. Алехин В.А. Термопринтеры для автоматизированных информационных систем // Актуальные вопросы современной техники и технологии. Липецк, 2012. С. 10–17.
5. Misev T.A. Powder Coatings: Chemistry and Technology. New York: Wiley, 1991. 390 p.
6. Горный С., Вейко В., Одинцова Г., Горбунова Е., Логинов А., Карлагина Ю., Скуратова А., Агеев Э. Цветная лазерная маркировка поверхности металлов // Фотоника. 2013. № 6. С. 34–44.
7. Рубцов Н.А., Аверков Е.И., Емельянов А.А. Свойства теплового излучения материалов в конденсированном состоянии. Новосибирск: Институт теплофизики, 1988. 348 с.
8. Русин С.П. Изменение оптических свойств системы “оксидная пленка–металл” в процессе роста пленки: компьютерное моделирование // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. № 5. С. 643–654.
9. Притоцкий Е.М., Притоцкая А.П. Компьютерное

References

1. Valiulin A., Gorniy S., Grechko Yu., Patrov M., Yudin K., Yurevich V. Laser material marking. *Photonics*, 2007, no. 3, pp. 16–22. (in Russian)
2. Balandina L.N., Popov K.L. Study of the features of the images formation in the color laser marking of low-carbon steels. *Studencheskaya Nauchnaya Vesna. Mashinostroitel'nye Tekhnologii*, 2011, pp. 1–5. (in Russian)
3. Lochbihler H. Colored images generated by metallic sub-wavelength gratings. *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 14, pp. 12189–12196. doi: 10.1364/OE.17.012189
4. Alekhin V.A. Thermal printers for automated information systems. *Aktual'nye Voprosy Sovremennoi Tekhniki i Tekhnologii*. Lipetsk, Russia, 2012, pp. 10–17. (in Russian)
5. Misev T.A. *Powder Coatings: Chemistry and Technology*. New York, Wiley, 1991, 390 p.
6. Gorniy S., Veiko V., Odintsova G., Gorbunova E., Loginov A., Karlagina Y., Skuratova A., Ageev E. Laser color marking of metal surfaces. *Photonics*, 2013, no. 6, pp. 34–44. (in Russian)
7. Rubtsov N.A., Averkov E.I., Emel'yanov A.A. *Properties of the Thermal Radiation of Materials in a Condensed State*. Novosibirsk, Russia, Institute of Thermophysics Publ., 1988, 348 p. (in Russian)
8. Rusin S.P. Optical properties change of oxide film - metal system during the film growth: computer simulation. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 469–479. doi: 10.1134/S0869864312030122
9. Pritotskiy E.M., Pritotskaya A.P. Computer modeling of interplay of light with nanoscale structures. *Computational*

- моделирование взаимодействия света с наноразмерными структурами // *Computational Nanotechnology*. 2016. № 3. С. 250–252.
10. Аракелян С.М., Бутковский О.Я., Бурцев А.А., Лысенко С.Л., Панков М.А., Притоцкий Е.М., Притоцкая А.П. Моделирование величин коэффициентов отражения и пропускания для многослойных покрытий // *Computational Nanotechnology*. 2017. № 4. С. 14–20.
 11. Притоцкий Е.М., Притоцкая А.П., Панков М.А. Многослойные диэлектрические зеркала для мощных полупроводниковых лазеров // *Computational Nanotechnology*. 2017. № 2. С. 94–96.
 12. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd // *Physical Review B*. 1974. V. 9. N 12. P. 5056–5070. doi: 10.1103/PhysRevB.9.5056
 13. Query M.R. Optical Constants. Contractor Report CRDC-CR-85034, 1985.
 14. Lecka K.M., Wojcik M.R., Antonczak A.J. Laser-induced color marking of titanium: a modeling study of the interference effect and the impact of protective coating // *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. V. 2017. doi: 10.1155/2017/3425108
 15. Veiko V., Odintsova G., Ageev E., Karlagina Y., Loginov A., Skuratova A., Gorbunova E. Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking // *Optics Express*. 2014. V. 22. N 20. P. 24342–24347. doi: 10.1364/OE.22.024342
 16. Антонов Д.Н., Бурцев А.А., Бутковский О.Я. Окрашивание поверхности металлов под действием импульсного лазерного излучения // *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84. № 10. С. 83–86.
 10. Arakelyan S.M., Butkovskii O.Ya., Burtsev A.A., Lysenko S.L., Pankov M.A., Pritotskiy E.M., Pritotskaya A.P. Modeling of sizes of coefficients of reflection and transmission for multilayered coatings. *Computational Nanotechnology*, 2017, no. 4, pp. 14–20. (in Russian)
 11. Pritotskiy E.M., Pritotskaya A.M., Pankov M.A. Multilayer dielectric mirrors for high-power semiconductor lasers. *Computational Nanotechnology*, 2017, no. 2, pp. 94–96. (in Russian)
 12. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd. *Physical Review B*, 1974, vol. 9, no. 12, pp. 5056–5070. doi: 10.1103/PhysRevB.9.5056
 13. Query M.R. Optical Constants. *Contractor Report CRDC-CR-85034*, 1985.
 14. Lecka K.M., Wojcik M.R., Antonczak A.J. Laser-induced color marking of titanium: a modeling study of the interference effect and the impact of protective coating. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, vol. 2017. doi: 10.1155/2017/3425108
 15. Veiko V., Odintsova G., Ageev E., Karlagina Y., Loginov A., Skuratova A., Gorbunova E. Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 20, pp. 24342–24347. doi: 10.1364/OE.22.024342
 16. Antonov D.N., Burtsev A.A., Butkovskii O.Y. Coloration of a metal surface under pulsed laser irradiation. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 59, no. 10, pp. 1503–1505. doi: 10.1134/S1063784214100077

Авторы

Притоцкий Егор Михайлович – инженер, Федеральное казенное предприятие «Государственный лазерный полигон «Радуга», Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация; аспирант, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-7769-5205, pritotsky@bk.ru

Притоцкая Анастасия Павловна – инженер, Федеральное казенное предприятие «Государственный лазерный полигон «Радуга», Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация; аспирант, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, ORCID0000-0002-1706-5586, pritotskaya@bk.ru

Бурцев Антон Андреевич – инженер, Федеральное казенное предприятие «Государственный лазерный полигон «Радуга», Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация; аспирант, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, Scopus ID: 56412548600, ORCID ID: 0000-0001-9009-9005, murrkiss2009@yandex.ru

Панков Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, заместитель начальника НИИКО-1, Федеральное казенное предприятие «Государственный лазерный полигон «Радуга», Владимирская область, г. Радужный, 600910, Российская Федерация; доцент, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, Scopus ID: 24077100900, ORCID ID: 0000-0002-3735-7578, mpa.off@gmail.com

Бутковский Олег Ярославович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, Scopus ID: 6602964757, ORCID ID: 0000-0001-6052-666X, OYButkovskiy@fa.ru

Аракелян Сергей Мартиросович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 600000, Российская Федерация, Scopus ID: 7003827084, ORCID ID: 0000-0003-1692-7356, arak@vlsu.ru

Authors

Egor M. Pritotsky – engineer, State Laser Proving Ground "Raduga", Raduzhniy, 600910, Russian Federation; postgraduate, Vladimir State University n.a. Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-7769-5205, pritotsky@bk.ru

Anastasiya P. Pritotskaya – engineer, State Laser Proving Ground "Raduga", Raduzhniy, 600910, Russian Federation; postgraduate, Vladimir State University n.a. Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, ORCID0000-0002-1706-5586, pritotskaya@bk.ru

Anton A. Burtsev – engineer, State Laser Proving Ground "Raduga", Raduzhniy, 600910, Russian Federation; postgraduate, Vladimir State University n.a. Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, Scopus ID: 56412548600, ORCID ID: 0000-0001-9009-9005, murrkiss2009@yandex.ru

Mikhail A. Pankov – PhD, Deputy department chief, State Laser Proving Ground "Raduga", Raduzhniy, 600910, Russian Federation; Associate Professor, Vladimir State University n.a. Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, Scopus ID: 24077100900, ORCID ID: 0000-0002-3735-7578, mpa.off@gmail.com

Oleg Ya. Butkovsky – D.Sc., Full Professor, Vladimir State University n.a. Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, Scopus ID: 6602964757, ORCID ID: 0000-0001-6052-666X, OYButkovskiy@fa.ru

Sergey M. Arakelyan – D.Sc., Professor, Head of Chair, Vladimir State University n.a. Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, 600000, Russian Federation, Scopus ID: 7003827084, ORCID ID: 0000-0003-1692-7356, arak@vlsu.ru