

УДК 681.2-2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОКОНТРАСТНОГО
РАСТРА ПОСРЕДСТВОМ ЛАЗЕРНОГО МАРКИРОВАНИЯ**

О.С. Юльметова, А.Г. Щербак

Приводятся результаты исследований влияния режимов лазерного маркирования на степень контрастности и микрогеометрии меток, полученных на доведенной поверхности бериллиевых узлов giroприборов. В ходе исследований выявлена возможность получения требуемого уровня контрастности $0,7 \pm 0,1$ на длине волны 860 нм посредством лазерного маркирования.

Ключевые слова: лазерное маркирование, шероховатость.

Введение

Для оптико-электронных систем съема информации с таким узлом, как ротор электростатического гироскопа, важной задачей является создание рисунка заданной контрастности [1]. При этом контрастность рисунка, описываемая соотношением (1), определяется разностью коэффициентов отражения базовой поверхности R_b и растра R_r , полученного локальной модификацией базовой поверхности:

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

где R_b и R_r – коэффициент отражения бериллиевой и растровой поверхности соответственно; λ – рабочая длина волны, определяемая условиями функционирования оптической системы съема информации и составляющая 860 нм.

В качестве эффективного метода локальной модификации поверхности, позволяющей создать растр с требуемым уровнем контрастности, предложено использовать лазерное маркирование. Выбор данного способа растрообразования обусловлен его устойчивостью к механическим и тепловым воздействиям, высокой стабильностью параметров ($\pm 2\%$), пространственной и спектральной яркостью [2].

Целью работы являлось создание рисунка на поверхности доведенного бериллиевого образца с контрастностью в пределах 0,4–0,8, получение в конечном счете требуемого уровня контрастности $K=0,7\pm 0,1$ на длине волны 860 нм при минимальном изменении шероховатости растра относительно шероховатости базовой поверхности образца, составляющей по параметру среднеквадратичного отклонения профиля поверхности $Rq = 0,07$ мкм.

Требование к однородности шероховатости базовой поверхности и растров обусловлено тем, что в оптико-электронных системах гироскопов съем информации осуществляется в процессе вращения сферического ротора, на поверхность которого нанесен контрастный рисунок. При этом локальная неоднородность поверхностной структуры ротора может вызвать нежелательное изменение его дисбаланса.

Для достижения поставленной цели необходимо комплексное решение следующих задач:

- выбор средств оснащения процессов лазерного маркирования и контроля качества растрового рисунка;
- выявление особенностей физической сущности процесса лазерного маркирования, влияющих на степень оптического контраста и шероховатость модифицированного слоя;
- исследование влияния мощности лазерного излучения на уровень контрастности и шероховатости модифицируемого слоя;
- определение корреляции контрастности и шероховатости лазерных меток со скоростью движения сканатора;
- оценка влияния плотности линий на однородность, контрастность и шероховатость лазерного рисунка.

Выбор средств оснащения процессов лазерного маркирования и контроля качества растрового рисунка

Для создания рисунка использовалась лазерная установка МиниМаркер – компактный прецизионный маркер на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера с длиной волны лазерного излучения 1,06 мкм.

Исследование контрастности полученного рисунка осуществлялось с помощью микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К, позволяющего измерять коэффициенты отражения базовой поверхности R_b и поверхности растров R_r в диапазоне длин волн 350–900 нм. Расчет контрастности был произведен по формуле (1). Контроль шероховатости осуществлялся на измерительной станции Hommel Tester T8000.

Физическая сущность процесса лазерного маркирования и ее влияние на уровень контрастности и шероховатости модифицируемого слоя

Лазерное маркирование основано на локальном нагреве маркируемой поверхности, в результате которого происходит сублимация материала. Процесс нагрева поверхности материала лазерным излучением при отсутствии фазовых переходов описывается уравнениями (2) и (3).

Падающее излучение поглощается в тонком приповерхностном слое по закону Бугера:

$$q(x) = A \cdot q_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x), \quad (2)$$

где $q(x)$ – плотность потока лазерного излучения; A – коэффициент поглощения; $A \cdot q_0$ – плотность лазерного потока, поглощенная поверхностью; α – показатель поглощения.

Глубина проникновения излучения в вещество равна

$$\delta = 1/\alpha. \quad (3)$$

Для металлов величина α составляет $10^{-5} - 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ [2].

Распространение теплового потока описывается законом Фурье, определяющим, что плотность теплового потока в твердом теле пропорциональна градиенту температуры [3].

Однако физическая сущность лазерной обработки не ограничивается термическими процессами. Этот процесс сопровождается активным взаимодействием поверхности образца с элементами воздушной среды, в результате которого на поверхности появляется цветная пленка, отражающая структурные и химические изменения поверхностного слоя. Глубина модифицированного слоя при этом не превышает величину δ , определяемую соотношением (3).

Исходя из рассмотренных физических особенностей процесса, контрастность рисунка при маркировании определяется толщиной цветовой пленки и шероховатостью модифицированной поверхности. Очевидно, что чем больше шероховатость растрового рисунка, тем выше степень оптического контраста, определяемого соотношением (1). При этом необходимо учитывать, как указывалось выше, и требование к однородности шероховатости рисунка и базовой поверхности.

Толщина цветовой пленки определяется условиями обработки: она зависит от газовой среды, в которой велась обработка; от температуры обработки как катализатора реакции взаимодействия поверхности образца с элементами газовой среды; от плотности линий – числа линий, пройденных лазером на 1 мм поверхности, характеризующей однородность рисунка. В частности, на рис. 1 приведены фотографии поверхности, подвергнутой лазерной обработке с одним из параметров обработки N – число линий на 1 мм, 20 и 1000 мм^{-1} соответственно при диаметре лазерного пятна $5 \cdot 10^{-5}$ м.

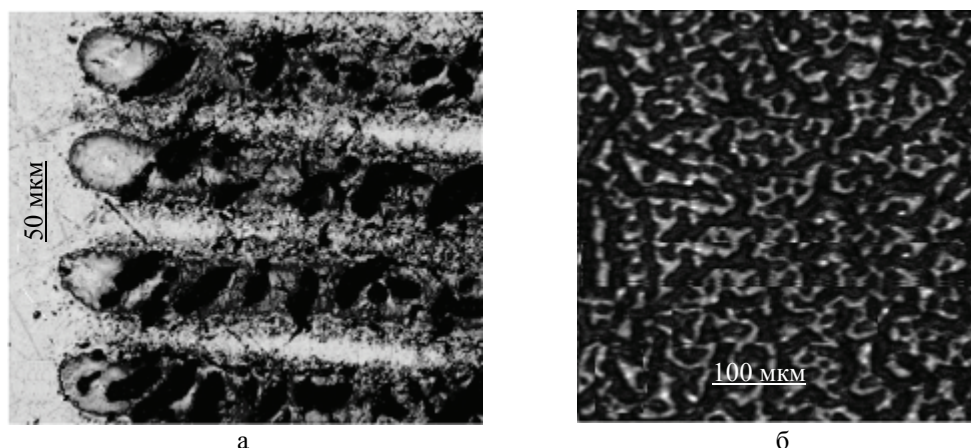


Рис. 1. Поверхности после лазерной обработки при 20-кратном увеличении и плотности линий: а – $N=20 \text{ мм}^{-1}$; б – $N=1000 \text{ мм}^{-1}$

Из рис. 1 видно, что плотность линий существенно влияет на однородность рисунка, что подтверждает важность исследований влияния плотности линий на степень контрастности.

В свою очередь, шероховатость напрямую зависит от режимов обработки: мощности лазерной обработки P , скорости движения лазера V и плотности линий N .

Исследование влияния мощности лазерной обработки на уровень контрастности и шероховатости модифицируемого слоя

На рис. 2 приведены зависимости шероховатости от мощности лазерного излучения для разных диапазонов мощности.

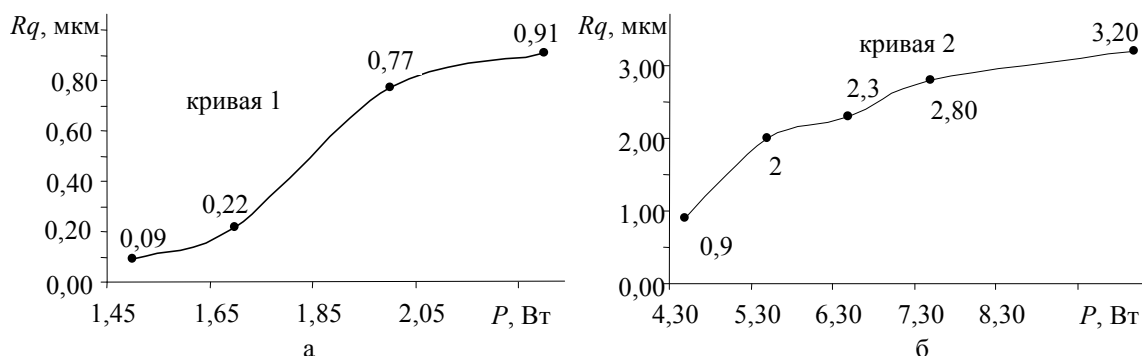


Рис. 2. Зависимость шероховатости от мощности лазера: а – скорость сканирования 10 мм/с и плотность линий 500 мм^{-1} ; б – скорость сканирования 12 мм/с и плотность линий 20 мм^{-1}

Кривая 1, представленная на рис. 2, а, была получена при скорости сканирования 10 мм/с, частоте импульсов 20 кГц и плотности линий 500 мм^{-1} , а кривая 2 рис. 2, б, определяется скоростью сканирования 12 мм/с, частотой импульсов 20 кГц и плотностью 20 мм^{-1} . Характер изменения кривых 1 и 2 свидетельствует о том, что с увеличением мощности лазерного излучения, шероховатость пропорционально увеличивается. Эта закономерность согласуется с физической сущностью процесса лазерной обработки: возрастание мощности приводит к росту объема испаряемого материала.

При этом для кривой 1 имеет место явно выраженное увеличение параметра Rq в диапазоне мощностей P от 1,7 до 2,08 Вт (Rq меняется от 0,22 до 0,77), а при P менее 1,7 Вт и P в пределах от 2,0–2,4 Вт Rq меняется не так интенсивно.

С целью уменьшения испарений обработка намеренно велась в диапазоне малых мощностей от 1 до 2,5 Вт (кривая 1). В результате эксперимента было выявлено, что при мощности 1 Вт поверхность остается без изменения – нет ни цветообразования, ни испарения. А при мощности маркирования 1,5 Вт параметр шероховатости Rq составил 0,09 мкм, т.е. параметр шероховатости увеличился на 12,5%, так как Rq исходной поверхности составляет 0,08 мкм. Для выявленного на первом этапе приемлемого диапазона мощностей, на втором этапе необходимо оценить контрастность.

На рис. 3 приведен график зависимости контрастности от мощности, варьируемой в диапазоне от 1,5 до 2 Вт. График, представленный на рис. 3 свидетельствует о том, что контрастность, соответствующую требованию $K=0,7\pm 0,1$, можно получить в диапазоне мощности от 1,6 до 1,7 Вт.

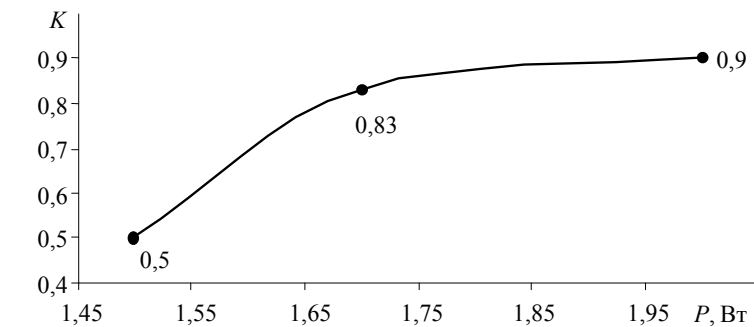


Рис. 3. Зависимость контрастности от мощности лазера при скорости 10 мм/с, частоте импульсов 20 кГц и плотности линий 500 мм⁻¹

Корреляция контрастности и шероховатости со скоростью движения лазера

На рис. 4 приведен график зависимости шероховатости от скорости движения лазерного луча. С увеличением скорости сканирования шероховатость поверхности имеет общую тенденцию снижения. Эксперимент с варьированием скоростей был проведен при мощности излучения 2 Вт и, поэтому, уровень шероховатости модифицированного слоя отличается от шероховатости базовой поверхности ($Rq=0,08$ мкм) значительно, минимальное значение составило 0,38 мкм. На рис. 5 приведен график зависимости контрастности от скорости перемещения лазера. С увеличением скорости сканирования контрастность уменьшается. При этом все значения контрастности при данных условиях обработки удовлетворяют требованию: не менее 0,8.

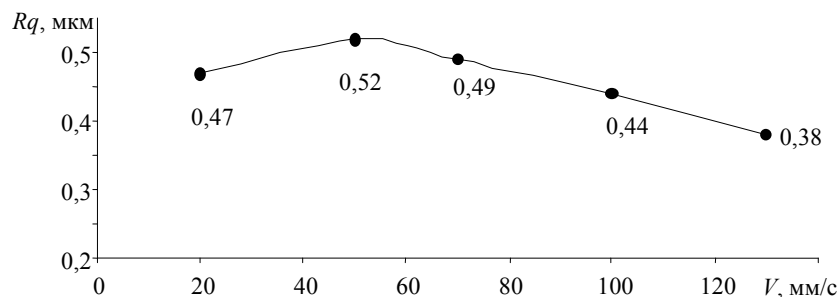


Рис. 4. Зависимость шероховатости от скорости сканирования при мощности 2 Вт, частоте импульсов 20 кГц и плотности линий 700 мм⁻¹

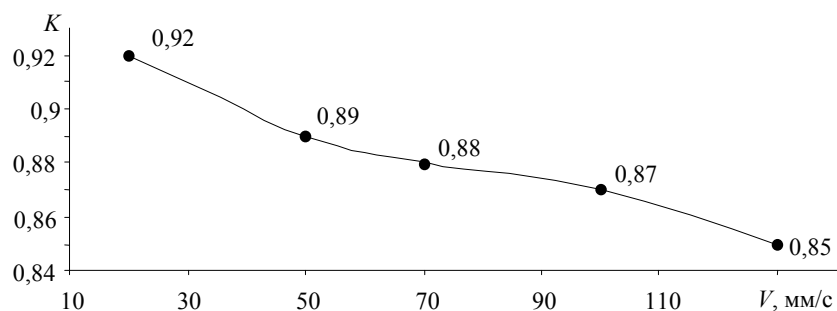


Рис. 5. Зависимость контрастности от скорости сканирования при мощности 2 Вт, частоте импульсов 20 кГц и плотности линий 700 мм⁻¹

Полученные в данном разделе экспериментальные результаты обозначили перспективы дальнейших исследований, а именно: варьирование скоростей сканирования при базовой мощности в пределах от 1,6 до 1,7 Вт с целью уменьшения шероховатости растра, полученного в ходе лазерной обработки.

Оценка влияния плотности линий на однородность, контрастность и шероховатость лазерного рисунка

В табл. 1 приведены результаты исследований влияния плотности линий при сканировании на степень оптического контраста и шероховатость обработанного лазером слоя.

Мощность лазера P , Вт	Скорость сканатора V , мм/с	Частота импульсов f , кГц	Плотность линий N , мм ⁻¹	Контрастность, K	Rq , мкм
2	30	20	150	0,63	0,3
			250	0,88	0,33
			350	0,90	0,41
			750	0,92	0,46
1,5	20	20	1000	0,47	0,09
			2000	0,79	0,10
			2500	0,87	0,15

Таблица 1. Влияние числа линий при сканировании на контрастность и шероховатость модифицированного слоя

Проведенные измерения свидетельствуют о том, что с увеличением плотности линий шероховатость и контрастность увеличиваются. Наиболее приемлемый результат при мощности 2 Вт и минимальной плотности линий $N=150$ мм⁻¹ составил $K=0,63$ при $Rq=0,3$ мкм. При мощности $P=1,5$ Вт и $N=2000$ мм⁻¹ результат, удовлетворяющий заявленным требованиям – $K=0,79$ при $Rq=0,1$ мкм.

Результаты, удовлетворяющие поставленной цели, представлены в табл. 2.

Мощность лазера P , Вт	Скорость сканатора V , мм/с	Плотность линий N , мм ⁻¹	Контрастность, K	Rq , мкм
1,5–1,7	10	500	0,5–0,83	0,09–0,22
2	130	700	0,85	0,38
2	30	150	0,63	0,3
		250	0,88	0,33
1,5	20	1000	0,47	0,09
		2000	0,79	0,10

Таблица 2. Рекомендуемые режимы

Табл. 2 содержит рекомендуемые режимы лазерной обработки, полученные в ходе исследования влияния мощности лазерного излучения, скорости движения луча и плотности линий на степень оптического контраста и микрогеометрию модифицированного слоя.

Заключение

Выявлена принципиальная возможность получения требуемого уровня контрастности рисунка $0,7\pm 0,1$ на длине волны 860 нм посредством лазерного маркирования. Определен диапазон оптимальных параметров лазерной обработки, обеспечивающих требуемые характеристики растрового рисунка.

Перспективы дальнейших исследований связаны с исследованием влияния режимов лазерной обработки на толщину цветовой пленки, влиянием газовых сред и исходной шероховатости на степень контрастности модифицированного слоя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-08-00158а.

Литература

1. Агроскин Б.Н., Галай В.И., Гинзбург В.А., Гуттовская А.К., Перминова Н.В. Сравнительная оценка электрохимического и фотохимического методов формообразования светоконтрастного рисунка на роторе бескарданного электростатического гироскопа // Гироскопия и навигация. – 1996. – №3 (14). – С. 41–47.

2. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел «Технологические лазеры и лазерное излучение». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 50 с.
3. Неумоина Н.Г., Белов А.В. Тепловые процессы в технологической системе резания: учеб. пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2006. – 84 с.

Юльметова Ольга Сергеевна

– ОАО «ЦНИИ «Электроприбор», аспирант, www.ralli@rambler.ru

Щербак Александр Григорьевич

– ОАО «ЦНИИ «Электроприбор», доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, a_sch@gtm.ru