

Анализ качества меандра фольгового электронагревателя космического назначения, изготовленного с использованием лазерного излучения

© П.А. Вятлев¹, А.Г. Шеманов¹, С.Г. Горный², К.В. Юдин²,
П.С. Григорьев¹, Ю.Н. Мишин¹

¹Акционерное общество «Научно-производственное объединение
имени С.А. Лавочкина», г. Химки, Московская область, 141400, Россия

²Общество с ограниченной ответственностью «Лазерный центр»,
г. Санкт-Петербург, 195067, Россия

Рассмотрены особенности фотолитографической технологии производства фольговых электронагревателей для космических аппаратов. Представлены потенциальные преимущества лазерной технологии формирования фольгового электронагревателя. С использованием лазерного излучения изготовлен полноценный меандр из константановой фольги на гибкой подложке из арамидной ткани, пропитанной лаком ЭП-730, в качестве заготовки для фольгового электронагревателя системы обеспечения теплового режима космического аппарата. Проведена оценка степени испарения константана между токопроводящими дорожками, целостности и диэлектрических свойств подложки. Приведены результаты исследования полученных образцов методами спектрального анализа, визуально-оптического контроля и измерения сопротивления изоляции. В выводах представлена оценка преимущества применения лазерной обработки при формировании нагревательного элемента, а именно: сокращение количества технологических операций, снижение трудоемкости, повышение точности геометрии конструкции и улучшение условий охраны труда персонала.

Ключевые слова: космический аппарат, система обеспечения теплового режима, фольговый электронагреватель, лазерное излучение, лазер

Введение. В настоящее время для производства фольговых электронагревателей систем обеспечения тепловых режимов космических аппаратов [1] в АО «НПО Лавочкина» используется фотолитографическая технология, включающая в себя ряд операций по созданию фотосаблона и травления металлической фольги, для формирования токопроводящего рисунка. Ранее, в 2020 г., инженерами АО «НПО Лавочкина» было выдвинуто предположение о возможности использования лазерного излучения для создания топологии резистивного элемента [2], выполненного из константановой фольги на подложке из арамидной ткани, пропитанной лаком ЭП-730. Основными сложностями в реализации данного метода представлялись необходимость испарения части поверхностного металлического слоя без повреждения электроизоляционной подложки и недопустимость отслоения материала резистивного элемента от подложки.

По сравнению с фотолитографией предлагаемый способ обработки тонкопленочного металлического слоя лазерным излучением [3, 4] обладает рядом преимуществ: сокращение технологических операций; исключение химически вредных технологических операций; бесконтактная (чистая) технология изготовления; высокое качество и точность изготавливаемых изделий; высокая универсальность (перестраиваемость на изделия нового типа) лазерного оборудования.

В 2021 г. инженерами АО «НПО Лавочкина» совместно со специалистами ООО «Лазерный центр» были проведены эксперименты по изготовлению фольгового электронагревателя, используя лазерное излучение. В рамках настоящей публикации, посвященной итогам проведенной экспериментальной работы по обработке металлических тонкопленочных структур, приведены оборудование, на котором реализован данный проект; практические результаты в виде фотографий изготовленных образцов и методы оценки качества полученных образцов.

Требования к выполнению экспериментальных работ. Инженерами АО «НПО Лавочкина» было разработано техническое задание «Экспериментальные исследования о возможности применения лазерного излучения в производстве тонких металлопленочных устройств для космической техники», в котором отражены цели проводимых экспериментов, основные из них приведены ниже:

– провести исследования на предмет возможности обработки металлических тонкопленочных структур (толщиной металлического слоя 3; 8; 10; 20 мкм) лазерами различных типов (СО₂-лазер, волоконный лазер, УФ-лазер). Определить, позволяет ли лазерное излучение удалять металлы и их сплавы (константан) с поверхности диэлектриков (арамидная ткань, пропитанная лаком ЭП-730), создавая нужную топологию проводников и не нарушая при этом диэлектрические свойства подложек;

– по результатам проведенного исследования, описанного в предыдущем пункте, сформировать на заготовках с металлическим слоем различной толщины топологию проводника в виде элемента меандра (рис. 1) и оценить их на предмет отсутствия отслоения резистивного элемента от подложки;

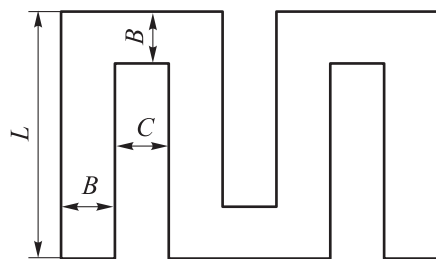


Рис. 1. Элемент четырех меандров фольгового электронагревателя, имеющих различные линейные размеры:

меандр № 1 — $L = 20$ мм, $B = 500$ мкм, $C = D^*$ (* D — минимальный диаметр сфокусированного пучка); меандр № 2 — $L = 20$ мм, $B = 1$ мм, $C = D^*$; меандр № 3 — $L = 20$ мм, $B = 1$ мм, $C = 2D^*$; меандр № 4 — $L = 20$ мм, $B = 2$ мм, $C = 500$ мкм

– по результатам проведенных работ, описанных в предыдущем пункте, сформировать полноценный меандр [5] на заготовке с толщиной металлического слоя 8 мкм одним из вышеуказанных типов лазера, показавшим лучшее качество изготовления резистивного элемента.

Экспериментальные результаты. Все работы выполняли на системе прецизионной обработки материалов электронной техники серии МикроСЕТ [6], оснащенной импульсным волоконным лазером МОРА с длиной волны 1,064 мкм мощностью 30 Вт производства ООО «НТО «ИРЭ-Полус» с использованием программного обеспечения MaxiGraf (рис. 2) [7].



Рис. 2. МикроСЕТ — система прецизионной лазерной микрообработки материалов электронной техники

Ультрафиолетовый (УФ) и газовый (СО₂) лазеры для исследований не применялись, так как, по экспертному мнению специалистов технологического отдела ООО «Лазерный Центр», их использование для обработки материалов заказчика нецелесообразно.

Излучение СО₂-лазеров с длиной волны 10,6 мкм хорошо отражается металлическими поверхностями и, кроме того, излучение СО₂-лазеров трудно преобразовать в импульсы малой длительности и большой частоты. Стандартные, доступные для обработки материалов СО₂-лазеры работают в непрерывном или квазинепрерывном

режиме. Это не позволяет производить точно дозированный ввод энергии в материал, в результате чего происходит локальный перегрев материала и управлять таким процессом практически невозможно.

Излучение УФ-лазеров хорошо фокусируется и поглощается большинством металлических материалов, однако достаточно мощные УФ-лазеры с широким диапазоном импульсных характеристик редки, дорого стоят, для их обслуживания требуются специалисты высокой квалификации.

Поэтому в текущей ситуации использование УФ- и CO₂-лазеров нецелесообразно как с технической, так и с экономической стороны.

В ходе выполнения экспериментальных работ была проведена лазерная обработка металлических тонкопленочных структур с металлическим слоем различной толщины (3; 8; 10; 20 мкм). Определено, что применение оборудования МикроСЕТ позволяет удалять нанесенный на арамидную ткань, пропитанную лаком ЭП-730, металлический слой. По результатам проведенного исследования на тестовых образцах с различной толщиной металлического слоя получены элементы меандра, примеры которых приведены на рис. 3.

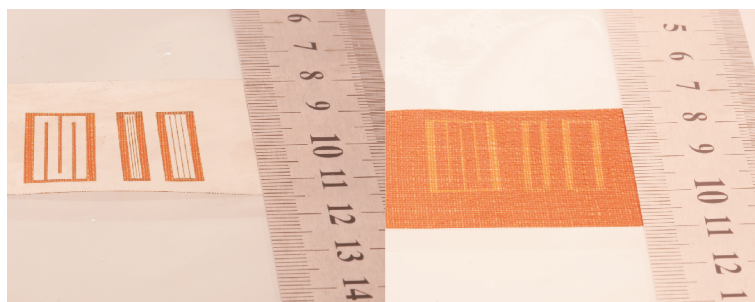


Рис. 3. Элементы меандра фольгового электронагревателя

После изучения полученных элементов меандра и подтверждения отсутствия отслоения резистивного элемента от подложки были изготовлены полноценные меандры, пример которых представлен на рис. 4.

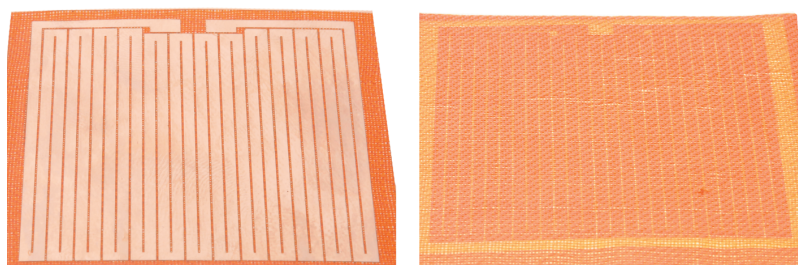


Рис. 4. Полноценный меандр фольгового электронагревателя

Характеристики лазерного излучения и скорость испарения константана. Во время обработки заготовок лазерным лучом были использованы мульти-проходные режимы с динамически изменяющимися параметрами лазерного излучения, которые приведены ниже:

Минимальный диаметр сфокусированного пучка, мкм	10
Диаметр пучка, мкм	10–30
Энергия импульса, мДж	До 1
Длительность импульса, нс	4–200
Частота следования импульсов, кГц	1,6–1000

Управление пространственно-временными характеристиками излучения позволяет сформировать необходимое тепловое поле в материале и обеспечить эффективное разрушение материала в области взаимодействия с излучением. При этом благодаря мульти-проходным режимам обработки удастся избежать перегрева материала подложки и получить чистые не поврежденные излучением поверхности без каких-либо перемычек. Широкий диапазон временных и скоростных характеристик оборудования дает возможность формировать практически любые тепловые поля и получать требуемые скорости выноса (испарения, разрушения) металлического материала.

Скорость испарения в зависимости от толщины константановой фольги составила от $0,952 \cdot 10^{-6}$ до $1,26 \cdot 10^{-6}$ кг/мин. Производительность может быть увеличена путем изменения параметров обработки.

Для получения наиболее качественных образцов изделий без деформации прилегающих областей и отслоения константана от подложки при отработке режимов обработки желательно стремиться использовать минимально возможные длительность импульса (до 50 нс), диаметр пучка и энергию в импульсе с одновременным увеличением частоты следования импульсов, однако производительность при этом снижается.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что для разных типов и толщин обрабатываемых материалов необходимо разрабатывать отдельные режимы с различными характеристиками лазерного излучения, в зависимости от требуемых качества и производительности.

Оценка степени испарения константана между токопроводящими дорожками. Для исключения короткого замыкания при подключении питания и для достижения равномерного теплового поля фольгового электронагревателя используют один из критериев качества фольговых электронагревателей, которым является степень испарения металла между токопроводящими дорожками, контролируемый с помощью спектрального анализа.

Качественный и количественный анализ химического состава фольгового электронагревателя космического аппарата, изготовлен-

ного с использованием лазерного излучения, производился атомно-эмиссионным спектрометром с лазерным возбуждением СПЕКС ЛАЭС МАТРИКС [8, 9]. В указанном спектрометре применена оптическая схема Пашена — Рунге с длиной оптического пути 250 мм, с дифракционной решеткой 2400 штр/мм и шестью ПЗС-детекторами фирмы «Тошиба», диапазон длин волн 180...780 нм.

Образец исследования представлял собой резистивный элемент, выполненный из фольги в форме меандра с высоким удельным сопротивлением и нанесенный на диэлектрический материал. В качестве диэлектрического материала использовалась арамидная ткань, пропитанная лаком ЭП-730. Общий вид образца представлен на рис. 5.

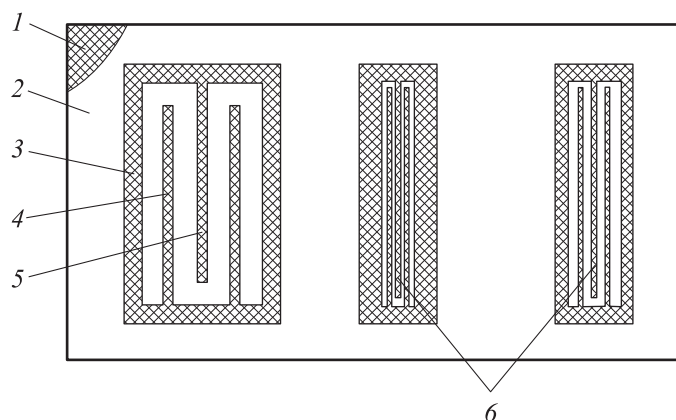


Рис. 5. Общий вид исследуемого образца с указанием исследуемых на нем зон:

1 — эталонная зона, представляющая собой подложку (арамидная ткань, пропитанная лаком ЭП-730); 2 — исследуемая зона, представляющая собой подложку с нанесенным на нее слоем из константановой фольги; 3–6 — зоны, подверженные абляции лазером

Зоны, в которые был направлен пучок лазера спектрометра для возбуждения спектроплазмы, показаны на рис. 5. Получены спектры пробы, на которых выбраны спектральные линии искомым элементов с соответствующей длиной волны (λ). При анализе спектра пробы оценивалась интенсивность спектральной линии (I) от концентрации элементов в пробе. На рис. 6–8 приведены спектры пробы, полученные в результате абляции лазером образца согласно схеме, представленной на рис. 5.

Черным цветом на рис. 6–8 показаны спектры пробы, полученные при спектральном исследовании резистивного элемента, а цветными кривыми — при исследовании зон, подвергаемых абляции лазером в процессе формирования резистивного элемента.

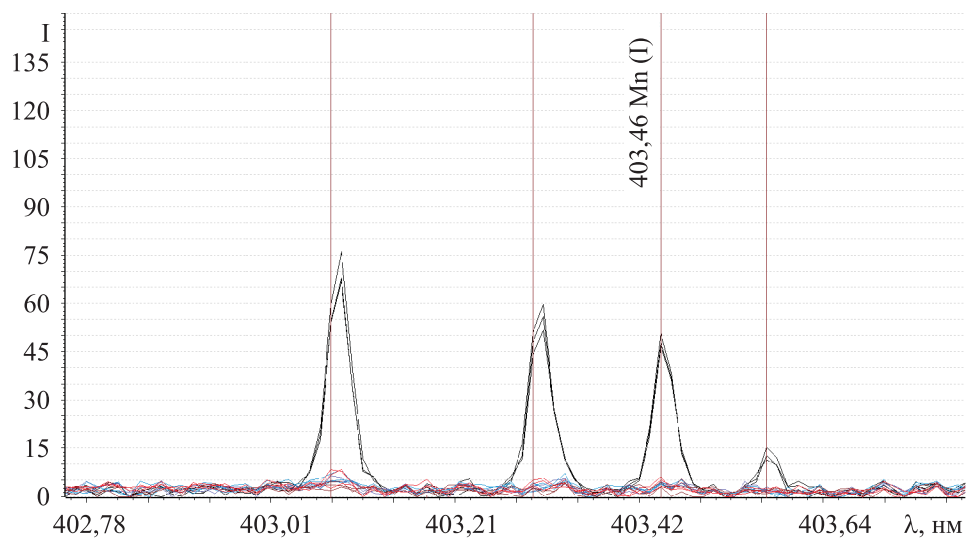


Рис. 6. Полученный путем абляции образца лазером спектр пробы, на котором спектральная линия Mn с длиной волны $\lambda = 403,46$ нм

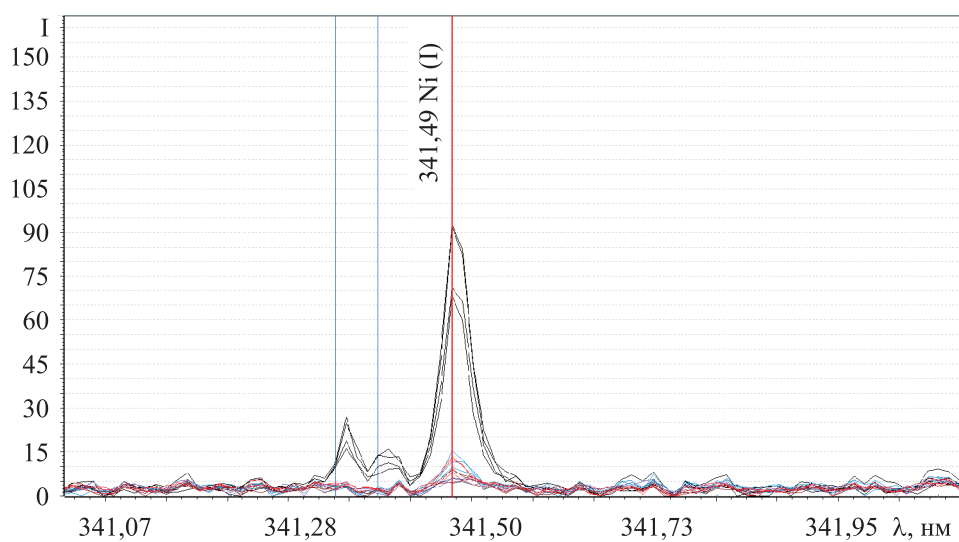


Рис. 7. Спектр пробы, на котором спектральная линия Ni с длиной волны $\lambda = 341,49$ нм

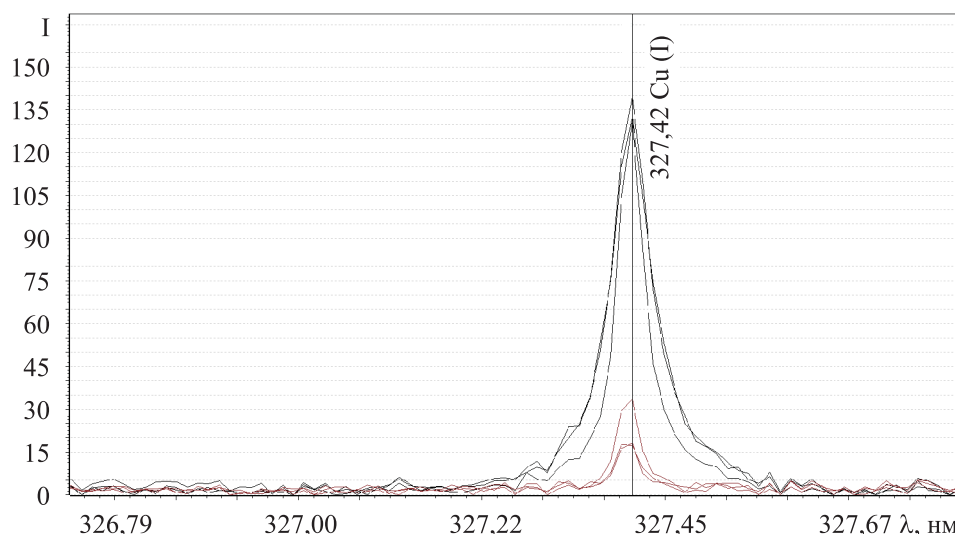


Рис. 8. Спектр пробы, на котором спектральная линия Cu с длиной волны $\lambda = 327,42$ нм

В таблице приведены основные интенсивности спектра на длинах волн соответствующих элементов в исследуемых зонах 1–6. Представленные результаты свидетельствуют о наличии в исследуемых зонах образца таких элементов, как Mn ($\lambda = 403,46$ нм), Ca ($\lambda = 393,36$ нм), Ni ($\lambda = 341,49$ нм), Cu ($\lambda = 327,42$ нм), C ($\lambda = 247,86$ нм).

Интенсивность спектра химических элементов на различной длине волны

Исследуемая зона	Уровень интенсивности спектра элемента (I)				
	Mn	Ca	Ni	Cu	C
1	4	60	3	18	100
2	49	60	93	132	103
3	4	38	3	12	121
4	4	47	3	20	154
5	4	27	7	18	129
6	30	60/14	92/55	96	80/18

При спектральном анализе образцов отмечено, что ширина зоны 6 меньше, чем диаметр лазерного прожига. В связи с этим наблюдается значительный разброс по интенсивностям, обусловленный захватом материала резистивного элемента. По этой причине интенсивности, полученные в зоне 6, не были учтены при анализе, однако они приведены в таблице.

Особое внимание следует уделить таким элементам, как Ni, Mn и Cu. В частности, на рис. 6–8 и по данным в таблице видно, что

в зонах 3–5 (подвергаемых абляции при изготовлении) уровень интенсивности спектров элементов Ni, Mn и Cu, которые являются основными элементами резистивного элемента, сопоставим с уровнями интенсивности самой арамидной ткани, пропитанной лаком ЭП-730 (зона 1). Таким образом, результаты спектрального анализа позволили сделать вывод, что при изготовлении фольгового электронагревателя с использованием лазерного излучения присутствующие в материале резистивного элемента фольгового электронагревателя Ni, Mn и Cu отсутствуют в зонах, подверженных абляции лазером.

Оценка целостности и диэлектрических свойств подложки. Оценка целостности и диэлектрических свойств подложки из арамидной ткани, пропитанной лаком ЭП-730, проводилась методом визуально-оптического контроля и измерением сопротивления изоляции.

Визуально-оптический контроль проводился с использованием стереоскопического микроскопа МБС-2, предназначенного для исследования объектов в проходящем и отраженном свете. При изучении зон, подверженных лазерной абляции, на предмет целостности подложки полученных образцов под микроскопом не были обнаружены: микротрещины, сколы, оплавление, прожиг и прочие поверхностные и объемные дефекты. Увеличенная под микроскопом МБС-2 часть элемента меандра приведена на рис. 9.

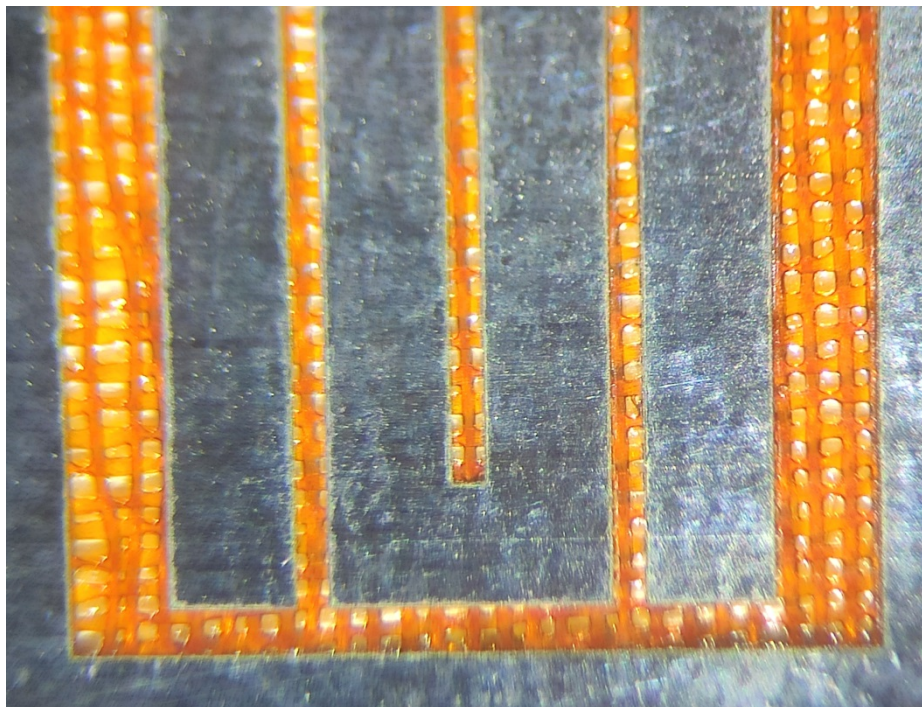


Рис. 9. Увеличенная часть элемента меандра

Диэлектрические свойства подложки определялись путем измерения сопротивления изоляции между резистивным элементом нагревателя и корпусом обогреваемого объекта. Измерения производились мегаомметром Е6-32 при значении испытательного напряжения 500 В в зонах, неподверженных абляции лазером (принятыми за эталонные показания), и в зонах, подверженных абляции. Все зоны схематично приведены на рис. 10. Диапазон значений сопротивления изоляции, полученных при измерениях в зонах 1, составил от $481 \cdot 10^9$ до $1 \cdot 10^{12}$ Ом. Результаты измерений, проведенных в зонах 2, не вышли за пределы такого же диапазона.

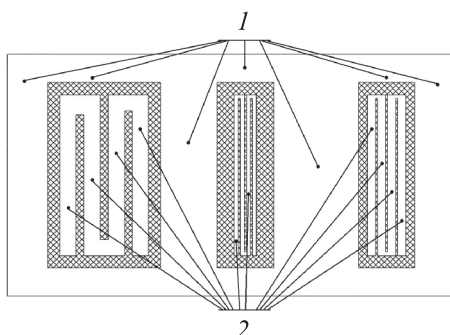


Рис. 10. Схема проведения измерений сопротивления изоляции в зонах, неподверженных 1 и подверженных 2 абляции лазером

Таким образом, по результатам визуально-оптического контроля и измерения сопротивления изоляции сделан вывод, что целостность и диэлектрические свойства подложки в зонах, подверженных абляции лазером, не нарушены.

Заключение. Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что согласно экспертной оценке [3, 6] лазерная технология изготовления электронагревателей для космических аппаратов позволяет:

- сократить сроки и трудоемкость технологического процесса изготовления электронагревателя;
- повысить точность конструктивных параметров;
- уменьшить влияние предельно допустимых концентраций вредных веществ в воздухе рабочей зоны на персонал в случае перевода некоторых технологических операций от фотолитографических к лазерным методам.

На основе предварительного анализа результатов проведенных экспериментальных работ можно сделать вывод о возможности применения лазерного излучения в отдельных технологических операциях [10] при производстве тонких металлопленочных устройств для обеспечения теплового режима космического аппарата.

Благодарности. Авторы благодарны ведущему инженеру АО «НПО Лавочкина» Тамаре Степановне Аптуковой за помощь в обработке полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тулин Д.В., Ефремова Т.Н., Плугарь С.М., Шабарчин А.Ф. Система обеспечения теплового режима телескопа Т-170 и научной аппаратуры. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2014, № 5, с. 97–103.
- [2] Вятлев П.А., Шеманов А.Г., Харитонов С.Г., Мишин Ю.Н. К вопросу изготовления фольговых электронагревателей космического аппарата лазерными технологиями. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2020, № 1 (47), с. 68–74.
- [3] Медведев А.М. Лазерная литография в производстве печатных плат. *Технологии в электронной промышленности*, 2006, № 5 (11), с. 22–26.
- [4] Вятлев П.А., Сергеев Д.В., Сысоев В.К. Механизм образования отверстий при лазерной перфорации металлизированных пленок экранно-вакуумной тепловой изоляции. *Вестник Московского авиационного института*, 2018, т. 25, № 2, с. 37–42.
- [5] Володин Н.М., Павлинова Е.Е. Гибкий фольговый электронагреватель. *Патент на полезную модель РФ №136944 У1*. Оpubл. 20.01.2014. Бюл. № 2.
- [6] Васильев О.С., Вейко В.П., Горный С.Г., Рузанкина Ю.С. Лазерная установка для микроструктурирования поверхности металла с использованием волоконного лазера. *Оптический журнал*, 2015, т. 82, № 12, с. 70–77.
- [7] МикроСЕТ — система прецизионной лазерной микрообработки материалов электронной техники. *Лазерный центр*. URL: <https://www.newlaser.ru/laser/lc/microset.php> (дата обращения 31.01.22).
- [8] Баранов А.В., Вишнеvский М.Е., Савилов С.В. Лазерная эмиссионная спектроскопия — эффективный метод анализа материалов, модифицированных наноразмерными объектами. *Нанотехнологии: наука и производство*, 2011, № 1 (10), с. 44–50.
- [9] Баранов А.В., Вишнеvский М.Е., Савилов С.В., Черторыльская Е.Г. Быстрый и надежный качественный анализ микропримесей в производстве, экологии и криминалистики. *Нанотехнологии: наука и производство*, 2012, № 3 (18), с. 11–15.
- [10] Гапоненко О.В. Основные направления развития прорывных технологий в космической деятельности России и проблемы их разработки и внедрения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-6-1893>

Статья поступила в редакцию 25.05.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Вятлев П.А., Шеманов А.Г., Горный С.Г., Юдин К.В., Григорьев П.С., Мишин Ю.Н. Анализ качества меандра фольгового электронагревателя космического назначения, изготовленного с использованием лазерного излучения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-9-2208>

Вятлев Павел Александрович — канд. техн. наук, главный специалист АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: проектирование систем КА, лазерные системы. e-mail: vyatlev@laspace.ru

Шеманов Александр Геннадьевич — аспирант, инженер по испытаниям АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: проектирование систем КА, лазерные системы. e-mail: shemanovag@laspace.ru

Горный Сергей Георгиевич — канд. техн. наук, директор ООО «Лазерный центр». Область научных интересов: интеграция лазерных систем в промышленные линии, изготовление автоматизированных и роботизированных комплексов для лазерной обработки. e-mail: sgotny@newlaser.ru

Юдин Константин Владимирович — главный технолог ООО «Лазерный центр». Область научных интересов: лазерные технологии обработки материалов. e-mail: labas@newlaser.ru

Григорьев Павел Сергеевич — канд. техн. наук, начальник лаборатории АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: методы неразрушающего контроля, прогнозирование остаточного ресурса. e-mail: grigorevps@laspace.ru

Мишин Юрий Николаевич — начальник сектора АО «НПО Лавочкина». Область научных интересов: проектирование систем КА, лазерные системы. e-mail: mishiniun@laspace.ru

Quality analysis of the spacecraft foil electric heater meander manufactured using laser radiation

© P.A. Vyatlev¹, A.G. Shemanov¹, S.G. Gorny², K.V. Yudin²,
P.S. Grigoriev¹, Yu.N. Mishin¹

¹ Lavochkin Science and Production Association JSC,
Khimki, Moscow Region, 141400, Russia

² Laser Center LLC, St. Petersburg, 195067, Russia

The article presents a brief review of the photolithographic technology features used in manufacture of foil electric heaters for spacecraft. Potential advantages of laser technology for the foil electric heater formation are demonstrated. Using laser radiation, a full-fledged meander was manufactured from constantan foil on flexible substrate of aramid fabric impregnated with the EP-730 varnish as a blank for a foil electric heater of the spacecraft thermal control system. The degree of constantan evaporation between the current conductive tracks, as well as integrity and dielectric properties of the substrate, were evaluated. Results of the obtained samples study by the methods of spectral analysis, visual and optical control and measurement of the insulation resistance are provided. Conclusions present an assessment of advantages in using laser processing in the heating element formation, namely, reduction in the number of technological operations, decrease in labor intensity, increase in accuracy of the design geometry and improvement in the personnel labor protection conditions.

Keywords: spacecraft, thermal control system, foil electric heater, laser radiation, laser

REFERENCES

- [1] Tulin D.V., Efremova T.N., Plugar S.M., Shabarchin A.F. Sistema obespecheniya teplovogo rezhima teleskopa T-170 i nauchnoy apparatury [System ensuring the T-170 telescope and scientific equipment thermal regime]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina (Bulletin of the Lavochkin Association)*, 2014, no. 5, pp. 97–103.
- [2] Vyatlev P.A., Shemanov A.G., Kharitonov S.G., Mishin Yu.N. K voprosu izgotovleniya folgovykh elektronagrevatelei kosmicheskogo apparata lazernymi tekhnologiyami [On the issue of manufacturing the spacecraft foil electric heaters by laser technologies]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina (Bulletin of the Lavochkin Association)*, 2020, no. 1 (47), pp. 68–74.
- [3] Medvedev A.M. Lazernaya litografiya v proizvodstve pechatnykh plat [Laser lithography in the printed circuit boards production]. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti — Technologies in the Electronic Industry*, 2006, no. 5 (11), pp. 22–26.
- [4] Vyatlev P.A., Sergeev D.V., Sysoev V.K. Mekhanizm obrazovaniya otverstiy pri lazernoy perforatsii metalizirovannykh plenok ekranno-vakuumnoy teplovoy izolyatsii [Mechanism of the hole formation during laser perforation of metalized films of the screen-vacuum thermal insulation]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 37–42.
- [5] Volodin N.M., Pavlinova E.E. Gibkiy folgovyi elektronagrvatel [Flexible foil electric heater]. *Patent na poleznyuyu model RF No. 136944U1. Patentobladatel: AO "NPO Lavochkina" — RF Utility Model Patent No. 136944 U1. Patent holder: Lavochkin Association, JSC. Publ. 20.01.2014. Bull. No. 2.*

- [6] Vasiliev O.S., Veiko V.P., Gorny S.G., Ruzankina Yu.S. Lazernaya ustanovka dlya mikrostrukturirovaniya poverkhnosti metalla s ispolzovaniem volokonnoogo lazera [Laser installation for the metal surface micro structuring using a fiber laser]. *Opticheskiy zhurnal — Journal of Optical Technology*, 2015, vol. 82, no. 12, pp. 70–77.
- [7] MikroSET — sistema pretsizionnoy lazernoy mikroobrabotki materialov elektronnoy tekhniki [MicroSET is a system of precision laser micro processing of electronic equipment materials]. Available at: <https://www.newlaser.ru/laser/lc/microset.php> (accessed January 31, 2022).
- [8] Baranov A.V., Vishnevsky M.E., Savilov S.V. Lazernaya emissionnaya spektroskopiya — effektivnyi metod analiza materialov, modifitsirovannykh nanorazmernymi obyektami [Laser emission spectroscopy - an effective method in analyzing materials modified by nanoscale objects]. *Nanotekhnologii; nauka i proizvodstvo — Nanotechnologies: Science and Production*, 2011, no. 1 (10), pp. 44–50.
- [9] Baranov A.V., Vishnevsky M.E., Savilov S.V., Chertorylskaya E.G. Bystryi i nadezhnyi kachestvennyi analiz mikroprimesei v proizvodstve, ekologii i kriminalistike [Fast and reliable qualitative analysis of micro impurities in production, ecology and criminalistics]. *Nanotekhnologii; nauka i proizvodstvo — Nanotechnologies: Science: and Production*, 2012, no. 3 (18), pp. 11–15.
- [10] Gaponenko O.V. Osnovnye napravleniya razvitiya proryvnykh tekhnologiy v kosmicheskoy deyatelnosti Rossii i problemy ikh razrabotki i vnedreniya [Primary areas of breakthrough technologies development in space activities in Russia and problems of their development and implementation]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-6-1893>

Vyatlev P.A., Cand. Sc. (Eng.), Chief Specialist, Lavochkin Association, JSC. Research interests: spacecraft systems design, laser systems. e-mail: vyatlev@laspace.ru

Shemanov A.G., PG, Testing Engineer, Lavochkin Association, JSC. Research interests: spacecraft systems design, laser systems. e-mail: shemanovag@laspace.ru

Gorny S.G., Cand. Sc. (Eng.), Director, Laser Center LLC. Research interests: laser systems integration in industrial lines, production of automated and robotic complexes for laser processing. e-mail: sgorny@newlaser.ru

Yudin K.V., Chief Technologist, Laser Center LLC. Research interests: laser technologies of materials processing. e-mail: labas@newlaser.ru

Grigoriev P.S., Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, Lavochkin Association, JSC. Research interests: methods of non-destructive testing, prediction of the residual resource. e-mail: grigorevps@laspace.ru

Mishin Yu.N., Head of Sector, Lavochkin Association, JSC. Research interests: spacecraft systems design, laser systems. e-mail: mishiniun@laspace.ru