

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.036.662

*В.Н. БОРЩЕВ, д-р техн. наук, А.М. ЛИСТРАТЕНКО, канд. техн. наук,
Г.В. БУЕРОВ, канд. техн. наук, Н.В. ГЕРАСИМЕНКО, канд. техн. наук,
Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук, А.Ю. ПЕТРОВА, канд. физ.-мат. наук,
М.А. ПРОЦЕНКО, А.А. ФОМИН, И.Т. ТЫМЧУК, Г.И. НИКИТСКИЙ, И.Т. ПЕРЕКОПСКИЙ*

НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Введение

Системы обеспечения теплового режима (СОТР) космических аппаратов (КА) предназначены для поддержания оптимальной температуры конструктивных элементов, обеспечивающих систем и бортовой аппаратуры КА. Элементы СОТР делятся на пассивные и активные элементы [1, 2]. В качестве пассивных средств используют терморегулирующие покрытия на внешних поверхностях корпусов КА и экранно-вакуумную теплоизоляцию с целью уменьшения теплотерь в открытый космос и защиты от внешних тепловых источников.

В качестве активных средств на современных КА традиционно применяются СОТР жидкостного типа, когда теплоноситель прокачивается через систему трубопроводов, опоясывающую КА. Такие системы отличаются значительными массогабаритными характеристиками, высоким энергопотреблением и невысокой точностью поддержания заданной температуры.

В качестве активных средств в настоящее время являются наиболее перспективными СОТР на основе электрических нагревателей. Особенностью таких систем по сравнению с традиционными системами с теплоносителем являются меньшие массогабаритные характеристики и высокая точность поддержания заданной температуры. В штатном режиме такая система потребляет небольшую мощность, поддерживая номинальную температуру конструктивных элементов. При помощи электрического тока можно достичь весьма высоких температур нагрева. Электрические нагревательные устройства работают при более высоком коэффициенте полезного действия, чем устройства для нагрева другими теплоносителями. При нагревании электрическим током используется до 95 % электрической энергии, вводимой в нагревательный элемент.

В электронагревателях гибкого типа используются пленочные токонесущие проводники в виде ленты (фольги), изготовленной из материала с большим удельным сопротивлением (константан, нихром, никель и т.д.), укладываемой на изолирующую подложку в виде меандра с организацией необходимых зазоров между лентами. Как правило, в качестве изолирующих подложек в гибких электронагревателях в космической отрасли применяется стеклоткань, а в более новых разработках последнего времени – полиимидная пленка [3]. Тем не менее, при проектировании новых видов систем терморегулирования бортовой аппаратуры космических аппаратов или другой специальной техники необходима разработка конструктивно-технологических решений изготовления высоконадежных гибких малогабаритных электронагревателей в соответствии с требуемой потребляемой электрической мощностью, рабочим напряжением, температурой нагрева и гарантированным ресурсом работы.

В наиболее современных конструкциях гибких плоских электронагревателей космического назначения в качестве конструкционного материала нагревательного элемента с низкой температурой нагрева (до 100 °С) широко применяются фольги малой толщины (5 – 10 мкм) из сплавов никеля. Это такие сплавы никеля как константан, манганин, нихром и др. Однако кроме нихрома, константана и манганина в электронагревателях космического

назначения с небольшой площадью, малым сопротивлением нагревательного элемента и низкой рабочей температурой может применяться и чистый никель.

Быстрый нагрев требует хорошего теплового контакта с нагреваемым объектом, который не всегда легко обеспечить, особенно в случае объектов сложной формы. Малая инерционность и высокая скорость нагрева обеспечиваются не только при наличии хорошего теплового контакта нагревателя, но также при его надежной теплоизоляции и электроизоляции. Перечисленным требованиям наиболее полно удовлетворяют конструктивно-технологические решения гибких электронагревателей на полиимидной основе.

Постановка задачи и цель

Наиболее важным и сложным при проектировании и разработке пленочных электронагревателей является решение следующих основных задач:

- выбор и возможность использования в конструкции гибких электронагревателей, серийно выпускаемых промышленностью диэлектрических пленочных и фольговых резистивных материалов, а также фольгированных пленочных полимерных диэлектриков, применяемых в изделиях ракетно – космической техники (РКТ);

- разработка конструкции электронагревателей с учетом максимального использования наиболее отработанных решений и освоенных промышленностью материалов, а также с учетом удобства монтажа и соединения в электрическую схему с применением стандартных инструментов и методов;

- разработка технологических схем изготовления пленочных гибких электронагревателей.

Разработка некоторых видов систем терморегулирования космических аппаратов и необходимость соблюдения теплового режима источников питания специальных изделий при отрицательных рабочих температурах потребовала создания технологии изготовления высоконадежных гибких малогабаритных электронагревателей с потребляемой электрической мощностью в пределах 2 – 15 Вт, рабочим напряжением до 30 В, температурой нагрева до 100 °С и более, с гарантированным ресурсом работы в условиях открытого космического пространства и надежной работы нагревательных элементов, которые включаются только при достижении минимально-допустимых температур в термочувствительных зонах изделий [4].

В настоящее время в новых разработках гибких электронагревателей для поддержания необходимой температуры непосредственно приборов в качестве изолирующей подложки в космической отрасли находят широкое применение полиимидные пленки, на которых формируются токонесущий провод в виде ленты (фольги) изготовленной из материалов с большим удельным сопротивлением.

Будучи тонкими и легкими, а также имея широкий диапазон температур, полиимидные нагреватели обладают существенными преимуществами перед другими видами нагревательных элементов. Полиимидные нагреватели являются надежным решением для условий, где необходимы быстрый отклик, сопротивление химикатам и др. Они являются температуро- и азоностойкими, а также стойкими к воздействию грибов и бактерий. Имеют высокую стойкость к радиации.

Они позволяют реализовать следующие основные характеристики в широком диапазоне в зависимости от назначения, как для наземного применения, так и для космического назначения:

- напряжение питания: от 3 до 240 В;
- температура нагрева относительно окружающей среды: от 30 до 210 °С;
- плотность мощности: от ~ 0,05 до ~ 2,5 Вт/см²;
- потребляемая мощность: от полуватта до сотен ватт;
- потребляемый ток: от микроампер до десятков ампер;

- форма и размеры: круглая, прямоугольная с размерами от 10 до 300 мм диаметром или в длину/ширину;
- способ крепления: адгезив или зажим.

Полиимидные нагреватели практически невесомы – их удельный вес – до 0,05 г/см². Толщина нагревателей не более 0,2 – 0,3 мм с учетом адгезивного слоя, их возможно легко изогнуть и установить на любую ровную и изогнутую поверхность [5].

Эффективность применения пленочных электронагревателей характеризуется тепловой эффективностью и массовой эффективностью. С этой точки зрения в электронагревателях для космического применения, как правило, применяют токоведущие проводники, выполненные из проводниковых материалов с более большим удельным сопротивлением (нихром, константан) по сравнению с алюминием, медью или никелем. Однако, кроме нихрома и константана в электронагревателях космического назначения с небольшой площадью, малым сопротивлением нагревательного элемента и рабочей температурой может применяться и чистый никель. Никель обладает ценными химическими и высокими механическими свойствами. В чистом виде никель пластичен и имеет достаточную прочность. Никель не окисляется в атмосферных условиях при комнатной температуре, он стоек в различных химически активных средах – в щелочах и др. и не окисляется при нагревании до 700 – 800°C. Он подвергается всем видам механической обработки – ковке, прокатке, штамповке, хорошо сваривается и соединяется пайкой. Из чистого никеля изготавливаются прецизионные проволоочные и фольговые резисторы и фольговые нагреватели. Резистивные элементы из никелевой фольги имеют температурный коэффициент сопротивления в диапазоне 0,0058 – 0,0064 °C⁻¹ в зависимости от типа фольги [6, 7].

Цель работы – разработка оптимальных конструктивно-технологических решений создания экономичных, высокоэффективных никель-полиимидных пленочных электронагревателей, а также разработка базового маршрута их изготовления.

Полученные результаты

В процессе выполнения работы был выбран вариант реализации пленочного гибкого нагревателя на основе безадгезивных никель-полиимидных материалов с защитой поверхности нагревающего элемента теплопроводным силиконовым диэлектрическим покрытием.

Конструктивно электронагреватель на основе никель-полиимидных безадгезивных фольгированных диэлектриков представляет собой нагревательный элемент, выполненный в виде меандра получаемого жидкостным травлением никелевого слоя на гибком полиимидном основании. Поверхность нагревательного элемента электронагревателя защищается диэлектрическим пластичным теплопроводным покрытием. Применение в качестве нагревательного элемента никелевого проводника обеспечивает возможность надежного соединения токоподводящих проводов к контактным площадкам нагревателя методом пайки. Технология изготовления такого гибкого нагревателя не трудоемка, проста и надежна.

Оптимизация параметров пленочных гибких электронагревателей заключается в оптимизации площади нагревательного элемента, которая достигается выбором соотношения между геометрическими размерами плоского провода нагревателя с учетом технологических и тепловых ограничений.

Технологические ограничения на ширину и зазор между лентами зависят от способа изготовления нагревательного элемента. При изготовлении пленочных нагревателей методом жидкостного травления токопроводящих дорожек из фольги никеля, сформированной на полиимидной пленке, расстояние между дорожками должно быть не менее 0,1 мм.

Тепловое ограничение на характеристики пленочного электронагревателя обусловлено исключением плавления материала изолирующей подложки и токонесущего проводника, которые соответствуют рабочим температурам выше 200°C.

В условиях неопределенности факторов эксплуатации (наличие диапазона по напряжению питания) целесообразно реализовывать четное число дорожек нагревательного элемента с некоторым завышением мощности.

Исходя из положения, что более оптимальным будет тот нагреватель, у которого меньше удельная мощность тепловыделения и меньше удельная плотность тока «греющейся» поверхности то, чем больше будет площадь поверхности никеля у нагревателя (меньше зазоры и больше ширина никелевых дорожек), тем лучше. При этом существенно уменьшается тепловая нагрузка на никель, полиимид и клеевые соединения. Также повышается надежность и стойкость к внешним воздействиям, так как протекание в токонесущем резистивном проводе нагревателя больших токов может создавать элементы ненадежности при токоотводе, а также создавать условия для локального повреждения фольги нагревателя вплоть до выгорания.

Для отработки базового технологического маршрута изготовления пленочного электронагревателя на основе никелевой фольги был разработан тестовый образец нагревателя (рис. 1, 2), характеризующийся следующими параметрами:

- длина провода нагревателя, мм ~ 970;
- количество токонесущих дорожек, п, шт. – 20;
- ширина дорожки, мкм ~ 1250;
- зазор между дорожками, мкм ~ 900;
- толщина токонесущей дорожки, мкм ~ 8;
- длина токонесущей дорожки, мм ~ 47;
- сопротивление нагревателя, Ом – 8,1;
- максимальная удельная мощности нагревателя ~ до 3500 Вт/м²;
- максимальная плотность тока нагревателя ~ до 80 А/мм².

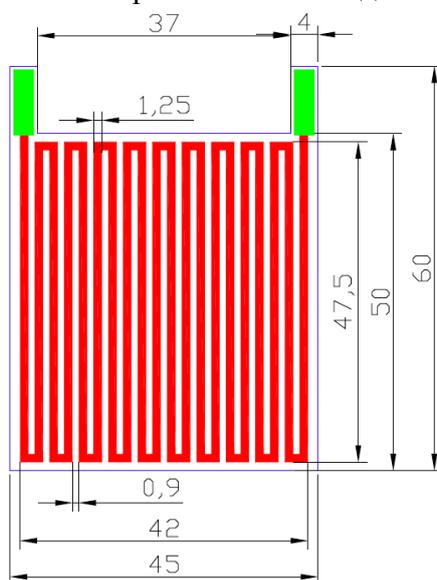


Рис. 1. Топологическая схема резистивного слоя электронагревателя

Сопротивление тестового образца нагревателя было оптимизировано с учетом требуемого тепловыделения до 5 Вт. Подключение электровыводов нагревателя осуществляется без использования разъемных соединений методом пайки. Толщина нагревателя не более 0,25 мм (с учетом защитного покрытия и лужения контактных площадок), общие габаритные размеры тестового образца пленочного нагревателя составляют 60x45 мм. Максимальная температура поверхности нагревателя в процессе нагрева не превышает 70⁰С.

Надежный тепловой контакт гибких пленочных никель-полиимидных электронагревателей обеспечивается за счет низкого теплового сопротивления тонкого защитного покрытия

(толщина защитного покрытия не более 100мкм) из силиконового теплопроводного клея марки RTV-S691 компании WackerChemieAG (Германия), имеющей достаточно высокую теплопроводность (до 0,37 Вт/м•град) и располагающейся между обогреваемым объектом и нагревательным элементом.

Низкая теплоемкость базовой конструкции электронагревателя на основе полиимидной пленки обеспечивается его исключительно малой массой (вес нагревателя не более 0,55г.).

На основе разработанных и описанных выше конструктивно-технологических решений тестового образца пленочного нагревателя была разработана технологическая схема изготовления электронагревателей, которая представлена на рис. 2 и включает в себя следующие основные этапы:

- изготовление нагревательного элемента методами прецизионной фотолитографии и жидкостного травления;
- облуживание контактных площадок;
- нанесение защитного покрытия;
- выходной контроль параметров нагревателя.

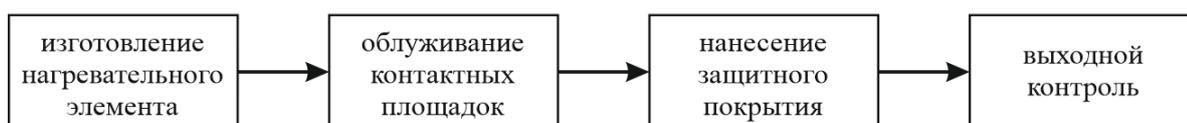


Рис.2. Общая технологическая схема изготовления пленочного нагревателя

Основным этапом изготовления пленочных нагревателей является непосредственно изготовление нагревательного элемента методами прецизионной фотолитографии и жидкостного химического травления проводящих и диэлектрических слоев.

Схематическая последовательность формирования проводящих и диэлектрических слоев пленочных нагревателей и основные технологические операции их изготовления приведены на рис. 3. Тестовый образец электронагревателя со сформированным нагревательным элементом приведен на рис. 4.

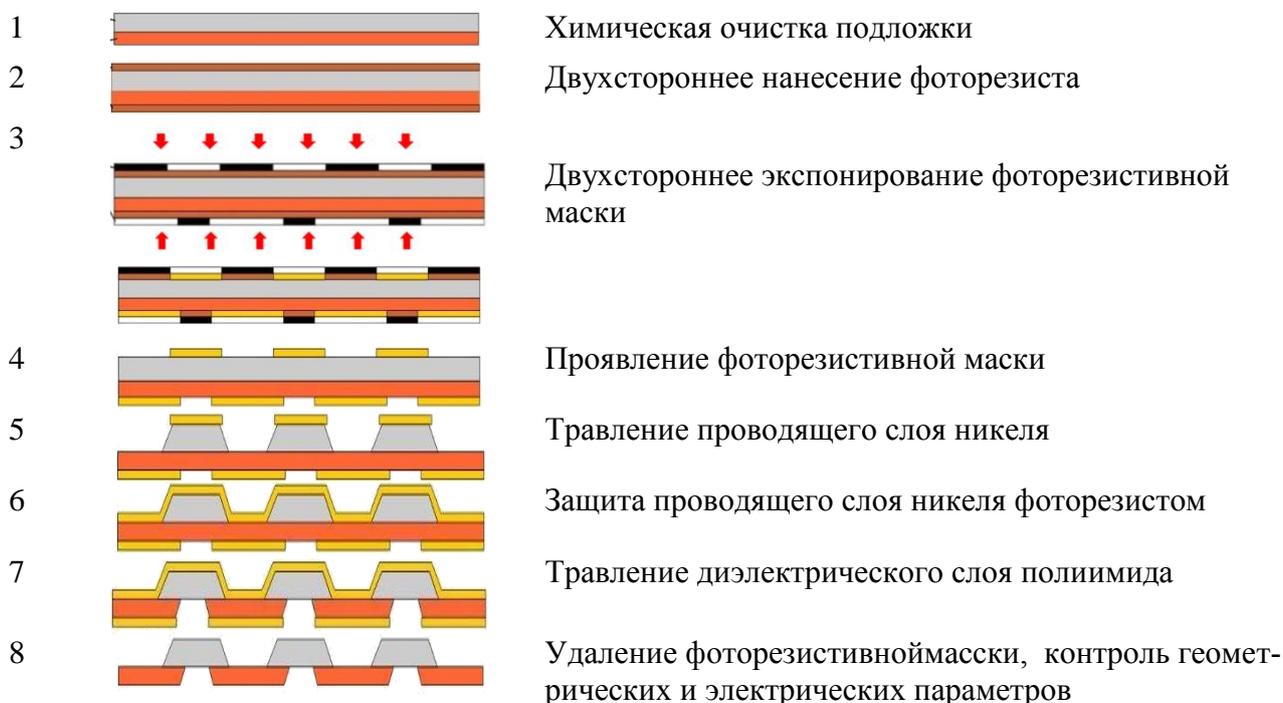


Рис. 3. Схематическая последовательность формирования проводящих и диэлектрических слоев пленочных нагревателей



Рис. 4. Электронагреватель с сформированным нагревательным элементом

Следующим этапом создания макетных образцов нагревателей является облуживание контактных площадок. Данная операция выполняется стандартными методами с использованием паяльной пасты или припоя и может выполняться как в ручном режиме с использованием паяльной станции, так и с использованием специализированной паяльной печи.

Третьим этапом, согласно выбранной общей технологической схеме изготовления пленочных нагревателей, является этап нанесения защитного покрытия. Технологическая схема формирования защитного покрытия макетных образцов нагревателей приведена на рис. 5. Тестовый образец электронагревателя с сформированным защитным покрытием приведен на рис. 6.



Рис. 5. Технологическая схема формирования защитного покрытия электронагревателя



Рис. 6. Тестовый технологический образец электронагревателя с защитным покрытием

Таким образом в результате проведенной работы в компании ООО «Светодиодные технологии Украина» (г. Харьков) были разработаны конструктивно-технологические решения создания экономичных, высокоэффективных никель-полиимидных пленочных электронагревателей, а также разработана базовая технология их изготовления, а производственные мощности предприятия позволяют обеспечить производство электронагревателей до пяти тысяч в месяц.

Заключение

Новые конструктивно-технологические решения пленочных электронагревателей космического назначения и освоенная технология их изготовления базируются на основе серийно выпускаемых промышленностью пленочных и фольговых материалов, применяемых в изделиях РКТ.

Конструкция пленочных нагревателей разработана с учетом максимального использования наиболее отработанных решений и освоенных промышленностью материалов, отвечает современным требованиям к технологичности процессов в условиях производства и обеспечивает получение требуемых геометрических размеров и технических характеристик изделий.

Конструктивно-технологические решения пленочных электронагревателей имеют возможность дальнейшего совершенствования и позволяют применение прогрессивных технологий и материалов.

Результаты исследования тестовых технологических образцов полиимидных пленочных электронагревателей могут быть применены для разработки компактных маломощных электронагревателей для нагрева и регулировки температуры первичных химических источников тока бортовых источников электропитания в штатных режимах предстартовой подготовки и полета изделий космической техники.

Список литературы: 1. *Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике:* учебник для авиационных специальностей вузов ; под общ. ред. академика Авдуевского В.С. и проф. Кошкина В.К. – М. : Машиностроение, 1992. – 528с. 2. *Малоземов, В.В.* Тепловой режим космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 1980. – 232с. 3. *Чеботарев, В.Е., Звонарь, В.Д., Фаткулин, Р.Ф., Дмитриев, Г.В.* Методика расчета и выбора параметров электронагревателей космического аппарата при наличии ограничений // Вестник Сибир. гос. аэрокосм. ун-та им. Академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2012. – Вып. №4. – С.142-147. 4. *Богданович, В.И., Барвинок, В.А., Кирилин, А.Н., Небога, В.Г., Китаев, А.И., Молчанов, В.С.* Тонкопленочные электронагреватели с наноструктурным резистивным слоем // Проблемы машиностроения и автоматизации – 2010. – № 3.– С. 111-117. 5. *MincoProductsIncorporated* (США) [Электронный ресурс] – Режим доступа : www.minco.com. 6. *Смирнов, В.И.* Металлургия никеля. – М. : Metallurgizdat, 1947. 7. *Динев, Д.А., Жора, В.Д., Григорьева, Н.Н., Грунянская, В.П.* Технология изготовления гибких терморезисторов на полиимидной основе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. – №1. – С.38-41.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 14.07.2015