Издательство ИТПЭ РАН

ISSN 2949-0553

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

научный рецензируемый журнал

Особенности проектирования тонкоплёночных нагревателей оптических элементов космических аппаратов

А.В. Киселев, А.В. Гусев, А.В. Глущенков, С.А. Косицын, Д.И. Суров, О.П. Баженова, Е.В. Рыков, А.О. Штокал

2026 Т. 5. № 2 (22)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теоретической и прикладной электродинамики
Российской академии наук

Журнал основан в 2022 году

Том 5. Выпуск № 2 (22)

Современная электродинамика

научный рецензируемый журнал

Под редакцией академика РАН А.Н. Лагарькова

Москва, 2026

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

ISSN 2949-0553

Современная электродинамика

Научный рецензируемый журнал. Издаётся с октября 2022 года.

Выходит один раз в два месяца.

Т. 5. № 2 (22)

2026

Главный редактор академик РАН А.Н.Лагарьков

Редакционная коллегия: к.т.н. Н.П. Балабуха, к.т.н. К.М. Басков, д.ф.-м.н. А.П. Виноградов, д.ф.-м.н. А.Б. Грановский, д.ф.-м.н. А.А. Дорофеенко, д.ф.-м.н. В.Н. Кисель, к.ф.-м.н. К.И. Кугель, к.т.н. Н.Л. Меньших, чл.-корр. РАН А.М. Мерзликин, д.ф.-м.н. А.А. Пухов, д.ф.-м.н. А.Л. Рахманов, д.ф.-м.н. А.В. Рожков, д.ф.-м.н. К.Н. Розанов, к.т.н. И.А. Рыжиков, д.ф.-м.н. А.К. Сарычев, д.т.н. Ю.В. Юханов

Адрес редакции:

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 6

тел., факс 8 (495) 484-26-33

эл.почта electrodynamics@mail.ru

Зав. редакцией Е.В. Зеневич

Компьютерная вёрстка: Е.В. Зеневич

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-83666 от 26.07.2022 г.

Дата выхода в свет: 30.04.2026. Тираж 30 экз.

© ИТПЭ РАН, 2026

Содержание номера

1 Взаимодействие электромагнитного поля с веществом **4**
Старостенко В.В., Кофанов А.Н., Падалинский М.М.,
Фитаев И.Ш., Грозовский А.Д.
Дифракция на периодических структурах из проводящих нанобрусьев . 4

2 Вопросы экспериментальной электродинамики **10**
Киселев А.В., Гусев А.В., Глущенков А.В., Косицын С.А.,
Суров Д.И., Баженова О.П., Рыков Е.В., Штокал А.О.
Особенности проектирования тонкоплёночных нагревателей оптических элементов космических аппаратов 10

УДК 537.874.6

Дифракция на периодических структурах из проводящих нанобрусьев

В.В. Старостенко[1], А.Н. Кофанов[1], М.М. Падалинский*[1], И.Ш. Фитаев[1], А.Д. Грозовский[1]

[1] *Физико-технический институт Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, Россия, Республика Крым, г. Симферополь*

Статья поступила в редакцию 13.03.2026
Одобрена после рецензирования 03.04.2026
Принята к публикации 20.04.2026
Опубликована 30.04.2026

Аннотация

В последние годы достижения в области производства и синтеза материалов позволили создавать трехмерные наноразмерные структуры с периодической архитектурой, которые часто называют нанорешетками. Изменяя параметры и размещение элементов решетки (брусьев), можно настраивать такие свойства нанорешеток как поглощение, отражение и т.д. Это позволяет получить ряд практически важных характеристик, труднодостижимых при использовании полноразмерных покрытий, и потому перспективных для применения в качестве СВЧ трактов, электронных модулей, антенной техники, поглощающих покрытий и многих других сферах. Поскольку возможных конфигураций элементов нанорешеток много, то для эффективного сравнительного анализа необходимы численные расчеты. Для моделирования устройств с нанорешетками в работе применялось численное моделирование в пакетах программ COMSOL, CST Studio, HFSS.

В данной работе рассматривается явление дифракции на проводящих структурах с целью исследования зависимостей коэффициентов отражения, прохождения и поглощения по мощности от параметров нанорешетки при нормальном падении плоской волны для перпендикулярной и параллельной поляризаций относительно брусьев решетки.

Ключевые слова: наноструктуры, нанорешетки, оптические коэффициенты, падающая волна, электромагнитные волны

EDN: PTWKOS

doi:10.24412/2949-0553-2026-222-04-09

Diffraction on periodic structures made of conductive nanobars

V.V. Starostenko, A.N. Kofanov, M.M. Padalinskiy*, I.S. Fitaev, A.D. Grozovskiy

Physical-Technical Institute of V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic of Crimea, Russia

* m.padalinskiy@cfuv.ru

*Автор, ответственный за переписку: Михаил Михайлович Падалинский, m.padalinskiy@cfuv.ru

 ©2026 В.В. Старостенко, А.Н. Кофанов, ...

Abstract

In recent years, advances in the production and synthesis of materials have made it possible to create three-dimensional nanoscale structures with periodic architecture, which are often referred to as nanolattices. By changing the parameters and placement of the lattice elements (bars), it is possible to adjust the properties of nanolattices such as absorption, reflection, etc. This allows us to obtain a number of practically important characteristics that are difficult to achieve when using full-size coatings, and therefore promising for use as microwave paths, electronic modules, antenna technology, absorbing coatings and many other areas. Since there are many possible configurations of nanogrid elements, numerical calculations are necessary for an effective comparative analysis. Numerical modeling in COMSOL, CST Studio, and HFSS was used to model devices with nanolattices.

In this paper, the phenomenon of diffraction on conducting structures is considered in order to study the power dependences of reflection, transmission, and absorption coefficients on nanogrid parameters at normal incidence of a plane wave for perpendicular and parallel polarizations relative to the bars of the lattice.

Key words: nanostructures, nanolattices, optical coefficients, incident wave, electromagnetic waves

Введение

При дифракции на проводящих наноструктурах одним из основных моментов для их расчета является корректное задание удельной (эквивалентной, эффективной, усредненной) проводимости от толщины пленочных структур при толщинах менее 10 нм. В отсутствие металлизации удельная проводимость металлодиэлектрических структур проводящей пленки стремится к нулю, а при толщинах более 10 нм достигает табличных значений. При этом свойства проводящих пленок меняются от практически полной прозрачности до зеркально отражающих при толщинах более 10 нм. При толщинах проводящих пленок порядка 5 нм имеет место максимальное преобразование энергии электромагнитных полей в тепловую энергию (до 50%), в этом случае удельная проводимость $\sigma \approx 10^6$ См/м [1–7]. В случае нанорешеток это обстоятельство необходимо учитывать как по толщине брусьев, так и по направлению периодичности решетки. Зависимость удельной проводимости от толщины металлизации и поглощение энергии электромагнитных полей является отличительной чертой дифракции на проводящих нанорешетках [8–10].

Нанорешетки могут использоваться в СВЧ трактах, электронных модулях, антенной технике, поглощающих покрытиях и т.д.

Для расчета и моделирования устройств с нанорешетками можно использовать различные численные методы; наиболее простой вариант — использование пакетов программ COMSOL, CST Studio, HFSS с учетом зависимости удельной проводимости от толщины проводящих пленок [8–10, 14]. При использовании численных методов могут быть задействованы различные модели пленок, определяемые уровнем погружения пленок в структуру. В данной работе пленка предполагается однородной, описываемой эквивалентными параметрами: удельной проводимостью, коэффициентом преломления и т.д.

Целью работы являются исследования зависимостей коэффициентов отражения, прохождения и поглощения по мощности от параметров нанорешетки при нормальном падении плоской волны для перпендикулярной и параллельной поляризаций относительно брусьев решетки.

Дифракционные свойства нанорешетки, вектор электрической компоненты перпендикулярен брусьям

Падающая плоская волна описывается компонентами $\vec{E}_1 = (E_{1x}, 0, 0)$, $\vec{H}_1 = (0, -H_{1y}, 0)$ и меняется по гармоническому закону $e^{j\omega t}$, частота ω при дифракции во всех областях одинакова (рис. 1). Поле над решеткой представляется в виде суммы падающей и периодической отраженной волны. При дифракции мощность падающей волны делится на мощности отраженной, прошедшей и поглощенной волн [11–13]. Наиболее часто вместо коэффициентов отражения, прохождения и поглощения по полю используют коэффициенты по мощности:

$$R = \frac{P_{\text{refl}}}{P_{\text{inc}}}, \qquad T = \frac{P_{\text{trans}}}{P_{\text{inc}}}, \qquad A = \frac{P_{\text{abs}}}{P_{\text{inc}}},$$

где P_{refl} — мощность отраженной волны, P_{trans} — мощность прошедшей волны, P_{abs} — мощность поглощенной волны, P_{inc} — мощность падающей волны. Также стоит отметить, что в данной работе используются понятия активной и реактивной мощности. Соотношение для баланса мощностей после нормировки принимает вид

$$R + T + A = 1. \tag{1}$$

Коэффициенты R, T и A обычно называют оптическими коэффициентами; в общем случае они являются комплексными и дают полную информацию о дифракции, включая фазовые соотношения между волнами.

На рис. 1 приведена периодическая структура из прямоугольных брусьев, где L — период решетки, l — размер брусьев в направлении периода решетки, $\theta = l/L$ — параметр заполнения металлизацией периода структуры, d — толщина решетки.

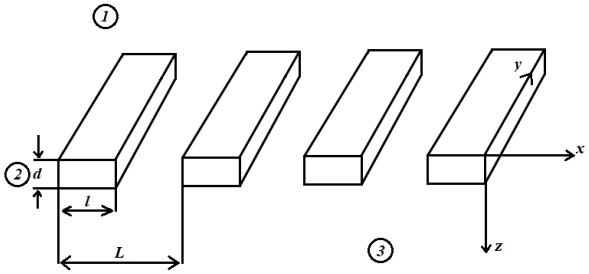


Рисунок 1 – Вид решетки

Для пленок из металлов с высокими значениями удельной проводимости (Au, Ag, Cu, Al, $\sigma > 10^7$ См/м) можно использовать графические зависимости проводимости от толщины пленок [8–10] или воспользоваться следующей аппроксимацией для трех участков толщин пленок:

$$\sigma(d) = \begin{cases} 10^{d_1+1}\left(\dfrac{d_1}{5}\right)^2, & d_1 = d\ [\text{нм}],\ 0.1 \le d_1 \le 5, \\ 10^6\left[1 + 10\left(1 - e^{-(d_2-5)/2}\right)\right], & d_2 = d\ [\text{нм}],\ 5 \le d_2 \le 10, \\ \sigma_0, & d > 10\ \text{нм}, \end{cases} \tag{2}$$

где σ_0 — табличные значения проводимости материалов.

Для пленок с табличными значениями удельной проводимости σ порядка или меньше 10^6 См/м (Ni, Ti, NiCr, Fe и др.) зависимость $\sigma = \sigma(d)$ более простая, близкая к экспоненциальной [8–10].

Для обычно используемых решеток при поляризации электромагнитного поля, когда вектор напряженности перпендикулярен брусьям решетки, падающая волна проходит через решетку практически без ослабления и только при переходе к плоскости ($\theta = l/L = 1$) полностью отражает падающую волну. Аналогичная ситуация имеет место и при дифракции на нанорешетке. Дифракционные отличия наступают при $\theta \to 1$, то есть при переходе к наноплоскости. Поглощение, отражение и прохождение определяются удельной проводимостью, а значит и толщиной пленки [8–10]. На рис. 2 приведены зависимости оптических коэффициентов от параметра заполнения металлизацией периода решетки для толщины решетки d и с удельной проводимостью $\sigma = 10^6$ См/м, то есть при максимальном поглощении энергии электромагнитного поля нанорешеткой.

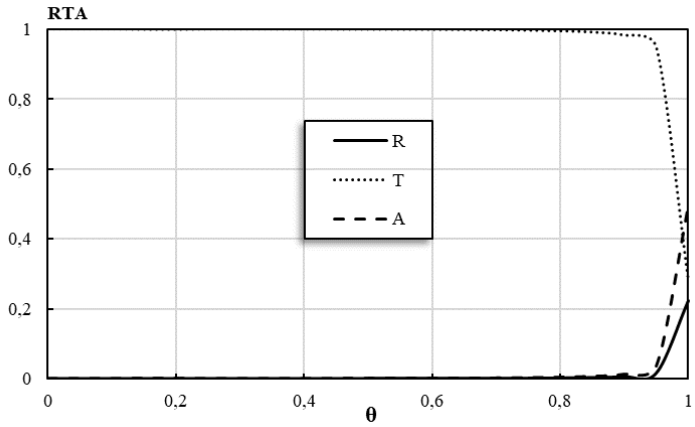


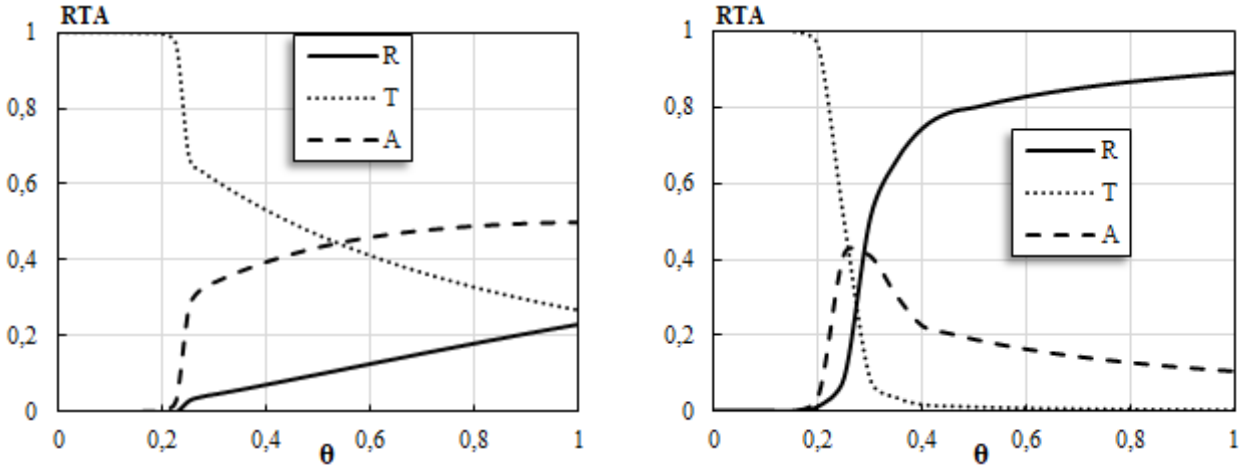
Рисунок 2 – Зависимости оптических коэффициентов от заполнения периода решетки металлизацией $\theta = l/L$

На рис. 2 приведены зависимости оптических коэффициентов от $\theta = l/L$ для периода решетки

$L = 20$ нм при воздействии электромагнитного поля частотой 10 ГГц ($\lambda = 3$ см), то есть $\lambda \gg L$. Толщина брусьев разумных размеров не влияет на оптические коэффициенты для данной ориентации электромагнитного поля и решетки.

Дифракционные свойства нанорешетки, вектор электрической компоненты параллелен брусьям

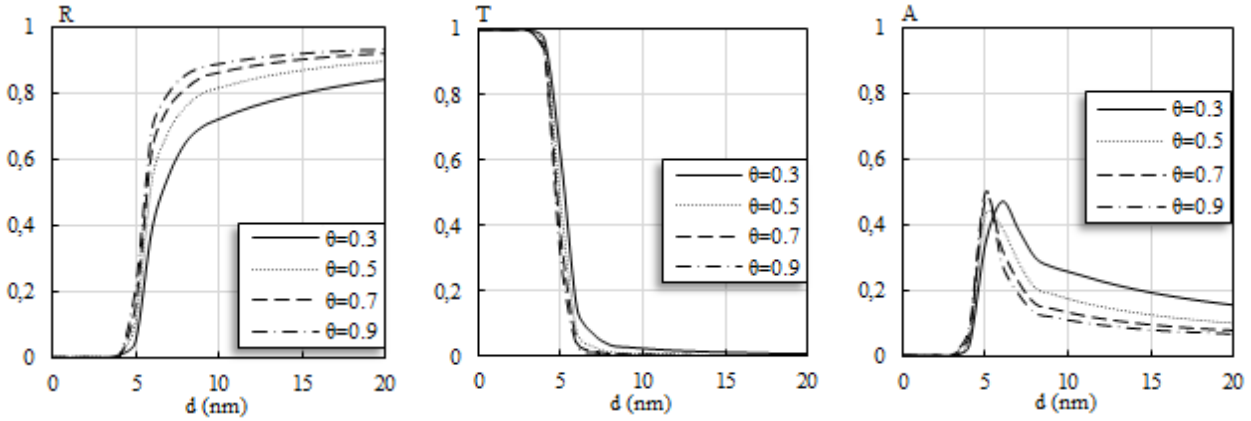
Падающая волна для рассматриваемой поляризации имеет следующие компоненты: $\vec{E}_1 = (0, E_{1y}, 0)$, $\vec{H}_1 = (-H_{1x}, 0, 0)$. При дифракции на обычных металлических решетках при условии $\lambda > L$ и параллельной поляризации решетка аналогична зеркалу. В случае дифракции на нанорешетке имеется много отличий, обусловленных поглощением нанопленок. Так, при $\theta < 0.4$ ($L = 20$ нм) проводимость определяется размером брусьев l, что сильно влияет на оптические коэффициенты. На рис. 3а приведены зависимости оптических коэффициентов от θ при $d = 5$ нм, то есть при толщине с максимальным преобразованием энергии электромагнитного поля в тепловую энергию [3,4]. На рис. 3б также приведены зависимости оптических коэффициентов от θ, но при $d = 9$ нм.



а б

Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов отражения, прохождения и поглощения от параметра θ: а) $d = 5$ нм; б) $d = 9$ нм

На рис. 4 приведены зависимости коэффициентов отражения, прохождения и поглощения от толщины брусьев при различных значениях θ.



а б в

Рисунок 4 – Зависимости коэффициентов отражения, прохождения и поглощения от толщины брусьев при различных значениях θ

Заключение

В работе приведены зависимости дифракционных характеристик при воздействии электромагнитных волн на периодическую структуру из проводящих нанобрусьев. В расчетах использовались

общепринятые пакеты программ [14] с учетом зависимости удельной проводимости от толщины пленок [8–10]. Адекватность модели дифракции следует из предельных переходов к наноплоскости и совпадения результатов с физическими представлениями.

Дифракционные характеристики при поляризации, когда вектор электрической компоненты перпендикулярен брусьям решетки, практически совпадают с подобными для классического соотношения параметров обычных решеток и длины волны воздействующего электромагнитного поля.

При параллельных направлениях электрического поля и брусьев поглощающие свойства решетки и размеры значительно сказываются на всех дифракционных характеристиках, что необходимо учитывать при использовании нанорешеток.

Условие независимости оптических коэффициентов от частоты $\lambda \gg L$ сохраняется вплоть до длинноволновой части рентгеновского диапазона.

Фазовые характеристики в данной работе не приводятся; в большей мере они подлежат анализу при рассмотрении нанорешетки на подложке.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-00261).

Список литературы

[1] Wood R.W. Philosophical Magazine Series 6. 1902. Vol. 4. P. 396–402. DOI: 10.1080/14786440209462857.

[2] Woltersdorff W. Z. Physik. 1934. Vol. 91. P. 230.

[3] Pham P.H.Q., Zhang W., Quach N.V., Li J., Zhou W., Scarmardo D., Brown E.R., Burke P.J. Broadband impedance match to two-dimensional materials in the terahertz domain // Nature Communications. 2017. Vol. 8. Article 2233. doi:10.1038/s41467-017-02336-z.

[4] Sucheng L., Shahzad A., Weixin L., Zhi Hong Hang, Bo Hou, Mingrong Shen, Chin-Hua Wang. Microwave absorptions of ultrathin conductive films and designs of frequency-independent ultrathin absorbers // AIP Advances. 2014. Vol. 4. P. 017130. DOI: 10.1063/1.4863921.

[5] Арсеничев С.П., Григорьев Е.В., Зуев С.А. и др. Дифракция электромагнитного излучения на тонких проводящих пленках металлодиэлектрических структур в прямоугольном волноводе // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22, № 2. С. 48–53. EDN: YHTXOH.

[6] Андреев В.Г., Вдовин В.А., Пронин С.М., Хорин И.А. Измерение оптических коэффициентов нанометровых металлических пленок на частоте 10 ГГц // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 11. С. 4. EDN: YMEPLC.

[7] Кульчин Ю.Н. Современная оптика и фотоника нано- и микросистем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 414 с.

[8] Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учебное пособие для вузов. В 5 т. Т. IV. Оптика. 3-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 792 с.

[9] Старостенко В.В., Зуев С.А., Мазинов А.С., Фитаев И.Ш. Удельная проводимость нанометровых проводящих пленок // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2022. Вып. 4. ISSN 2619-1628.

[10] Starostenko V., Maksyuta S., Zuev S., Zuev A., Taran E. Self-consistent problem of microwave radiation effects on layered structures with nanoconducting films using parallelization techniques // TELFOR 2024, section AEM-2. Belgrade, Serbia, 27 November 2024.

[11] Старостенко В.В., Григорьев Е.В., Васильченко В.М., Таран Е.П., Зуев С.А., Кофанов А.Н., Максюта С.А. Проводимость нанометровых проводящих структур // Российские нанотехнологии. 2025. Т. 20, № 3. С. 1–6.

[12] Шестопалов В.П. Метод задачи Римана-Гильберта в теории дифракции и распространения электромагнитных волн. Харьков: ХГУ, 1971. 273 с.

[13] Нефедов Е.И., Сивов А.Н. Электродинамика периодических структур. М.: Наука, 1977.

[14] Алексейчик Л.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств в CST Studio Suite. М.: Солон-Пресс, 2022. 276 с.

Ссылка для цитирования:

Старостенко В.В., Кофанов А.Н., Падалинский М.М., Фитаев И.Ш., Грозовский А.Д. Дифракция на периодических структурах из проводящих нанобрусьев // Современная электродинамика. 2026. Т. 5, № 2(22). С. 04-09. EDN PTWKOS, doi:10.24412/2949-0553-2026-222-04-09

Citation link:

Starostenko V.V., Kofanov A.N., Padalinskiy M.M., Fitaev I.S., Grozovskiy A.D. Diffraction on periodic structures made of conductive nanobars // Modern Electrodynamics. 2026. Vol. 5, No. 2(22). P. 04-09. EDN PTWKOS, doi:10.24412/2949-0553-2026-222-04-09

УДК 629.78.054-533.6:004.942

Особенности проектирования тонкоплёночных нагревателей оптических элементов космических аппаратов

А.В. Киселев * [1], А.В. Гусев[1], А.В. Глущенков[1], С.А. Косицын[1], Д.И. Суров[1], О.П. Баженова[2], Е.В. Рыков[3], А.О. Штокал[3]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *АО «НПО Лавочкина», Химки, Московская область, Россия*
[3] *Филиал АО «НПО Лавочкина» в г. Калуга, Калуга, Россия*

Статья поступила в редакцию 23.03.2026
Одобрена после рецензирования 16.04.2026
Принята к публикации 20.04.2026
Опубликована 30.04.2026

Аннотация

Отмечена актуальность обеспечения стабильного теплового режима работы высокоточных инструментов космических аппаратов, таких как оптические системы, при этом указано, что нагреватели оптических элементов космических аппаратов должны обладать минимально возможными газовыделением и неравномерностью распределения температур по своей поверхности. Представлены результаты численного моделирования и экспериментальной отработки конструкции тонкоплёночного нагревателя, предназначенного для терморегулирования оптического элемента космического аппарата. Численное моделирование выполнено с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics, позволившего детально описать электрические и тепловые процессы в исследуемом объекте. Проведённые исследования подтвердили качественное совпадение полученных температурных полей с результатами моделирования с допустимыми количественными отличиями, обусловленными упрощением условий теплопередачи в модели. Показано, что использование меандровой структуры и выбор материалов при формировании слоёв нагревателя позволяют обеспечить требуемую температурную однородность на поверхности нагревателя с точностью до 1,5 °C. При этом газовыделение поверхностей нагревателя является допустимым для оптических элементов космических аппаратов, работающих в широком спектре диапазонов длин волн. Полученные результаты могут быть использованы для разработки и совершенствования систем терморегулирования оптических элементов в космической технике.

Ключевые слова: меандр, нагреватель, терморегулирование, покрытия, газовыделение.

EDN: ORXNPC

doi:10.24412/2949-0553-2026-222-10-18

Design features of precision thin-film heaters for optical elements of spacecraft

A.V. Kiselev[1], A.V. Gusev[1], A.V. Gluschenkov[1], S.A. Kositsyn[1], D.I. Surov[1], O.P. Bazhenova[2], E.V. Rykov[3], A.O. Shtokal[3]

[1] *Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics RAS, Moscow, Russia*
[2] *Lavochkin Association, JSC, Khimki, Moscow region, Russia*
[3] *Affiliate of Lavochkin Association, JSC in the town of Kaluga, Kaluga, Russia*

* kav1996@yandex.ru

*Автор, ответственный за переписку: Анатолий Владимирович Киселев, kav1996@yandex.ru

 ©2026 А.В. Киселев, А.В. Гусев, ...

Abstract

The importance of ensuring a stable thermal operating mode for high-precision instruments on spacecraft, such as optical systems, was noted, and it was indicated that heaters for optical elements on spacecraft should have the lowest possible gas emission and uneven temperature distribution across their surface. The results of numerical modeling and experimental development of the design of a thin-film heater intended for thermal regulation of the optical element of a spacecraft are presented. Numerical modeling was performed using the COMSOL Multiphysics software package, which made it possible to describe in detail the electrical and thermal processes in the object under research. The conducted investigations confirmed the qualitative coincidence of the obtained temperature fields with the results of modeling with acceptable quantitative differences due to the simplification of heat transfer conditions in the model. It is shown that the use of a meander structure and the choice of materials in the formation of heater layers allows for the required temperature uniformity on the heater surface to be ensured with an accuracy of up to 1.5 °C. At the same time, outgassing from the heater surfaces is acceptable for optical elements of spacecraft operating in a wide range of wavelengths. The obtained results can be used for the development and improvement of thermal control systems for optical elements in space technology.

Key words: meander, heater, thermoregulation, coatings, outgassing.

Введение

Обеспечение стабильного теплового режима является одной из ключевых задач при проектировании и эксплуатации космических аппаратов, особенно имеющих в своём составе высокоточные инструменты, такие как оптические системы [1]. Даже относительно небольшие колебания температуры могут привести к значительному ухудшению характеристик наблюдений и снижению точности получаемых данных. Поэтому особое внимание уделяется системам терморегулирования, которые должны обеспечивать необходимую температурную стабильность оптических компонентов космической аппаратуры. При этом в виду близкого расположения, а также более высокой температуры нагреватели оптических элементов космических аппаратов должны обладать минимально возможным газовыделением [2], т.к. летучие конденсирующиеся вещества, выделившиеся с поверхности нагревателя, будут конденсироваться на более холодных поверхностях оптических элементов, изменяя их рабочие характеристики и, следовательно, снижая качество получаемой ими информации. Также нагреватель в процессе своей работы должен обеспечивать минимально возможную неравномерность распределения температур по своей поверхности, т.к. это приводит к неравномерному нагреву оптического элемента, изменению его геометрических параметров и, как следствие, к снижению качества получаемой информации.

Для выполнения перечисленных выше условий был разработан тонкоплёночный нагреватель с низким газовыделением поверхностей. При его проектировании было использовано численное моделирование с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics, позволяющего учесть взаимодействие электрических и тепловых процессов. Эффективность и адекватность численной модели проверялись экспериментально с помощью тепловизионных измерений температурного поля изготовленного нагревателя.

1. Литературный обзор

1.1. Применение COMSOL Multiphysics и сферы использования

COMSOL Multiphysics является интегрированной программной платформой, позволяющей объединять в одном численном расчёте различные физические задачи, такие как электрические, тепловые и механические процессы [3, 4]. Благодаря наличию встроенной библиотеки материалов и специализированных модулей (Electric Currents, Heat Transfer и других) программный комплекс обеспечивает возможность точного моделирования взаимодействия электрических и тепловых явлений. Платформа широко применяется для анализа джоулева нагрева в электронных и микроэлектронных устройствах [5–7], а также используется в авиационно-космической отрасли для исследования тепловых характеристик нагревательных элементов [8].

1.2. Исследования по джоулевому нагреву в электронике

Среди исследований, выполненных с применением COMSOL Multiphysics, значительное место занимают работы, посвящённые джоулеву нагреву электронных устройств. В исследовании [6] на примере резистора медицинского электронного блока подробно описан подход к заданию граничных условий (конвекция, свойства материалов), выбору расчётной сетки и выявлению зон потенциального перегрева на этапе проектирования. В работе [7] рассмотрена трёхмерная модель контроллера для

железнодорожного транспорта с анализом теплоотдачи и теплообмена между отдельными элементами (микрочипы, транзисторы, светодиоды). Дополнительно в статье [8] изучены вопросы влияния контактных сопротивлений на джоулев нагрев, а в публикации [5] детально представлен процесс нагрева микрофлюидных устройств. Рассмотренные примеры подтверждают широкие возможности и высокую точность COMSOL Multiphysics при моделировании тепловых процессов в различных областях техники.

1.3 Использование поли-пара-ксилилена в космической промышленности

При проектировании и создании космических аппаратов особое внимание уделяется выбору материалов, которые должны выдерживать экстремальные условия эксплуатации, включая механические нагрузки, воздействие вакуума, радиации и микрометеоритных частиц. Эти материалы обязаны демонстрировать высокую надёжность, прочность и минимальный уровень газовыделения, что критически важно для долговечности и стабильности работы оборудования.

Особый интерес для применения в космической отрасли представляет поли-пара-ксилилен (парилен), обладающий уникальными эксплуатационными характеристиками, такими как химическая инертность, низкая проницаемость для газов и влаги, высокие барьерные свойства [9], а также значительная устойчивость к воздействию растворителей, кислот и щелочей [10] и низкое газовыделение [11].

Нанесение поли-пара-ксилилена осуществляется методом газофазного осаждения, что обеспечивает высокую равномерность покрытия и полное отсутствие дефектов, таких как натёки или неравномерности толщины. Толщина покрытия составляет от 0,5 до 75 мкм, позволяя минимизировать дополнительную массу космического аппарата, что является особенно важным фактором при запуске. Поли-пара-ксилилен сохраняет свою гибкость даже при экстремально низких (криогенных) температурах и характеризуется хорошей адгезией к различным подложкам, которая дополнительно усиливается при предварительной обработке поверхности силаном [12].

Диэлектрическая прочность и электроизоляционные свойства поли-пара-ксилилена обеспечивают надёжную защиту электронных компонентов от коротких замыканий и электрических пробоев. Особенно значимыми являются его высокая термическая стабильность и устойчивость к многократным термоциклам, а также низкое газовыделение [11], благодаря чему материал успешно применяется в таких космических проектах, как миссия NASA «Juno» и японская миссия «Hayabusa 2», подтверждая свою эффективность и надёжность в реальных условиях эксплуатации [13, 14].

2. Определение конструкции нагревателя

Тонкоплёночные слои, обеспечивающие функциональные характеристики нагревателя, сформированы на подложке из алюминиевого сплава АМг6. Выбор данного сплава обусловлен его высокой теплопроводностью, которая обеспечивает равномерное распределение тепла по всей поверхности нагревателя. При этом сплав АМг6 обладает требуемой прочностью и жёсткостью, обеспечивая приемлемые несущие характеристики подложки нагревателя для большинства конструктивных вариантов его исполнения. Резистивный слой, служащий источником тепла, нанесён методом магнетронного напыления алюминия, что гарантирует высокую однородность и стабильность рабочих характеристик токопроводящего покрытия вследствие близости коэффициентов теплового линейного расширения с материалом подложки. Для улучшения излучательной способности [15] поверхности нагревателя, обращённой к оптическому элементу космического аппарата, а также для создания изоляционного слоя под токопроводящим покрытием (резистивным слоем) было применено анодно-окисное покрытие типа Ан.Окс.нхр. Внешнюю электроизоляцию токопроводящего слоя, а также заполнение пор в анодно-окисном покрытии обеспечивает слой поли-пара-ксилилена, нанесённый методом газофазного осаждения.

Таким образом, фактическая структура разработанного тонкопленочного нагревателя включает в себя: металлическую несущую подложку из сплава АМг6 толщиной 2 мм; слой анодно-окисного покрытия толщиной 10 мкм; внутреннее электроизоляционное покрытие поли-пара-ксилилена толщиной 20 мкм; токопроводящий резистивный слой алюминия толщиной 0,2 мкм и внешнее защитное электроизоляционное покрытие поли-пара-ксилилена толщиной 20 мкм.

3. Математическая модель и расчёты

3.1. Постановка задачи джоулева нагрева пленочного нагревательного элемента

Пленочный нагреватель представляет собой набор извилистых резистивных дорожек, нанесённых на металлическую подложку. При протекании тока I тепловая мощность Q определяется выражением:

$$Q = I^2 R, \tag{1}$$

где

$$R = \frac{\rho l}{A}. \tag{2}$$

Здесь:

ρ – удельное сопротивление материала, Ом·м;

l – суммарная длина дорожек, м;

A – площадь поперечного сечения, м^2.

Стабильность температурного распределения во многом связана с формой нагревателя, позволяющей равномерно распределять тепловую нагрузку.

3.2. Модель в COMSOL Multiphysics

В данной работе численное моделирование проводилось для условий работы нагревателя в воздушной атмосфере при нормальном давлении (1 атм) и температуре окружающей среды 20 °C. Выбор данных условий обусловлен необходимостью сопоставления результатов моделирования с данными наземного тепловизионного эксперимента. В условиях реальной эксплуатации в космическом пространстве (вакуум) конвективная составляющая теплообмена будет отсутствовать, и основной сброс тепла будет осуществляться за счет теплового излучения.

Для численного моделирования джоулева нагрева нагревательного элемента использовался программный пакет COMSOL Multiphysics (версия 6.0.0.318). Модель была создана путём объединения модулей Electric Currents для анализа электрических процессов и Heat Transfer in Solids для расчёта теплопередачи с учётом радиационных потерь. Для оптимизации вычислительных ресурсов геометрия расчётной модели была упрощена по сравнению с реальным изделием. В расчетной модели учитывались только два основных элемента: металлическая подложка из сплава АМг6 толщиной 2 мм и резистивная алюминиевая дорожка толщиной 0,2 мкм. Изоляционные слои, присутствующие в реальной конструкции нагревателя (анодно-окисное покрытие между подложкой и резистивным слоем, а также внешний слой поли-пара-ксилилена), в геометрию модели явно не включались. Такое упрощение было принято в связи с малой толщиной указанных слоёв по сравнению с толщиной подложки.

Расчет распределения температурного поля в твердотельных элементах нагревателя (подложке и резистивной дорожке) выполнялся путем решения стационарного уравнения теплопроводности (3)–(4):

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{ted}, \tag{3}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T. \tag{4}$$

где:

ρ – плотность материала, кг/м^3;

C_p – удельная теплоёмкость, Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$;

$\mathbf{u}$ – вектор скорости (в данной задаче $\mathbf{u} = 0$, так как рассматриваются неподвижные твердые тела);

T – абсолютная температура, К;

$\mathbf{q}$ – вектор удельного теплового потока, Вт/м^2;

Q – удельная мощность внутренних источников тепла, Вт/м^3;

Q_{ted} – вклад термоупругого демпфирования (принят равным нулю), Вт/м^3;

k – коэффициент теплопроводности, Вт·К$^{-1}$·м$^{-1}$.

Тепловые потери посредством излучения с внешних поверхностей нагревателя задавались с использованием условия радиационного теплообмена с окружающей средой. Результирующий радиационный тепловой поток q_r на границе раздела фаз вычислялся по формуле (5):

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_r = \varepsilon \left(G - e_b(T) \right). \tag{5}$$

где:

$\mathbf{n}$ – вектор внешней нормали к поверхности;

ε – коэффициент теплового излучения анодно-окисного покрытия, принятый 0,85;

G – падающее излучение от окружающей среды;

$e_b(T)$ – излучательная способность абсолютно черного тела, задаваемая уравнением (6)

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4, \tag{6}$$

где:

n – показатель преломления окружающей среды;

σ – постоянная Стефана-Больцмана;

T – температура окружающей среды, К.

Теплообмен с воздухом учитывался через граничное условие естественной конвекции на внешней поверхности нагревателя при температуре окружающей среды 20 °C и давлении 1 атм. Плотность конвективного теплового потока задавалась выражением (7), а коэффициент теплоотдачи рассчитывался в COMSOL Multiphysics с использованием условия «long horizontal cylinder».

$$q_{conv} = h(T - T_{amb}). \tag{7}$$

где:

q_{conv} – плотность теплового потока, передаваемого от поверхности нагревателя окружающему воздуху за счёт естественной конвекции, Вт/(м^2·К);

h – коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, Вт/(м^2·К);

T – температура поверхности нагревателя, К;

T_{amb} – температура окружающей среды, К.

При проектировании геометрии нагревателя особое внимание уделялось исключению острых углов для предотвращения локальных зон перегрева, а также варьировалась ширина резистивной дорожки с целью достижения равномерного температурного распределения. Физические параметры материалов, включая теплопроводность, удельное электрическое сопротивление, плотность и теплоёмкость, задавались по справочным значениям. Коэффициент излучения (ε) анодно-окисного покрытия был принят равным 0,85. В электрической постановке модели граничные условия включали потенциал 27 В на одном конце меандровой дорожки и 0 В (земля) на другом, что обеспечивало протекание тока через всю длину нагревателя.

Расчёты выполнялись в стационарном режиме с относительной точностью около 10^{-3}. Для дискретизации расчётной области использовалась сетка из тетраэдрических элементов с размерами от 1,69 мм до 23,2 мм. Проверка сходимости проводилась по получаемым значениям температуры. В результате моделирования было определено распределение температуры, позволившее выявить зоны максимального нагрева в местах поворотов резистивной дорожки. Таким образом, созданная модель в COMSOL Multiphysics позволила достоверно оценить температурное поле нагревательного элемента.

4. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлено распределение температурного поля нагревателя, рассчитанное с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics. Диапазон температур варьируется от 32,96 до 33,98 °C. Максимальные температуры зафиксированы в зонах, где протекает наибольший электрический ток, тогда как минимальные значения приходятся на периферийные участки и внутренние вырезы нагревателя. Такое распределение полностью соответствует конструкции резистивной дорожки, так как локальные повышения температуры логично обусловлены увеличением плотности тока в местах её поворотов.

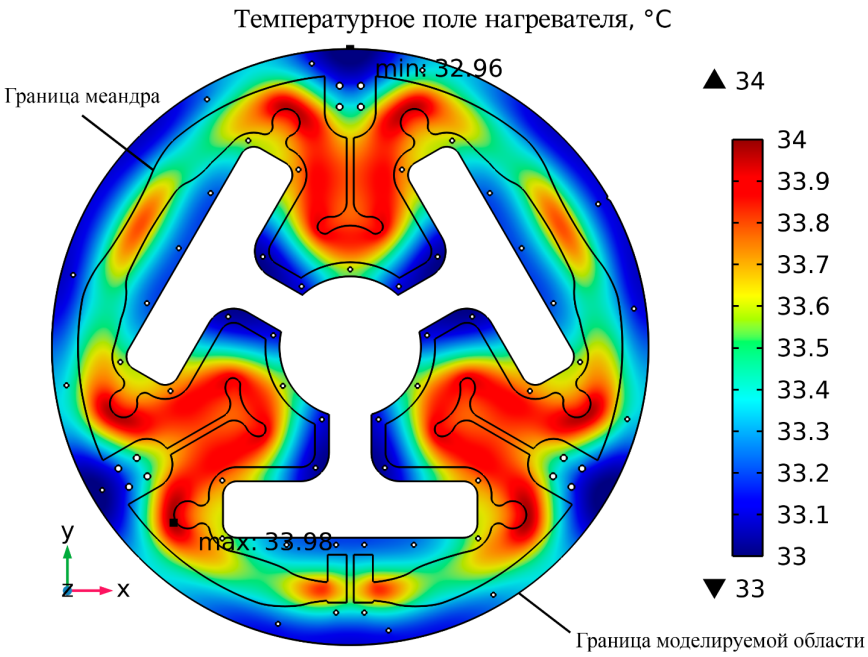


Рисунок 1 – Расчётное температурное поле нагревателя

Рисунок 2 – Экспериментальное температурное поле нагревателя

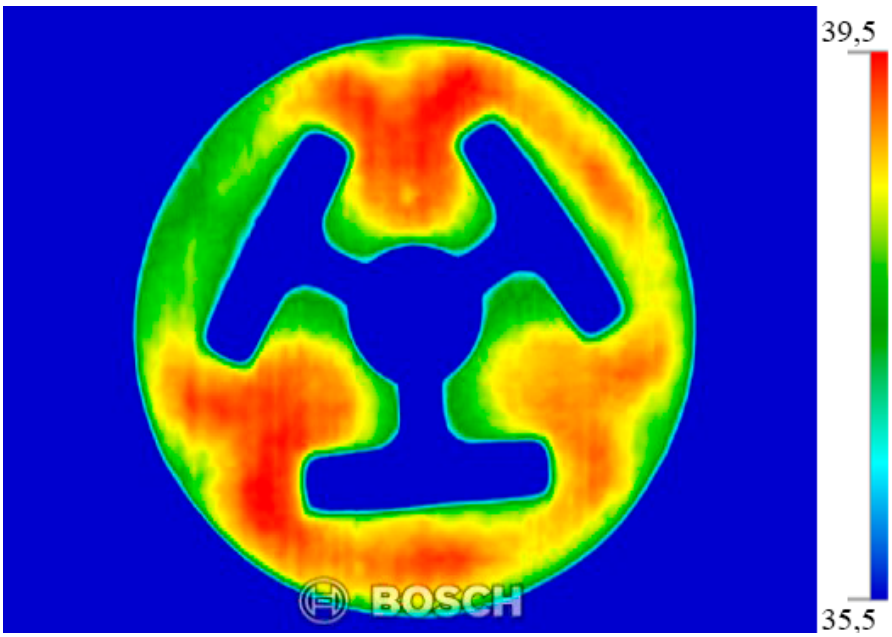


Рисунок 3 – Экспериментальное температурное поле нагревателя в уменьшенном интервале температур

На рисунке 2 представлен тепловизионный снимок нагревательного элемента, полученный с расстояния 1 м на фоне серой крафт-бумаги. Температурная шкала измерений составила от 17 до 38 °C. На рисунке 3 тепловизионное изображение приведено в уменьшенном интервале температур для повышения контрастности распределения температуры в рабочей области нагревателя. Дальнейшее уменьшение интервала не использовалось, поскольку в этом случае возрастает влияние краевых эффектов и шума. Поэтому рисунок 3 служит для качественного анализа температурного поля, а количественные значения неравномерности определялись отдельно по данным измерений в рабочей области. Несмотря на определённые количественные отличия в абсолютных значениях температуры по сравнению с расчётной моделью, обусловленные упрощением условий теплоотдачи в модели, наблюдается хорошее качественное соответствие распределения температур. Визуализация подтверждает, что наиболее нагретые области совпадают с расположением меандровой дорожки, в то время как периферийные участки остаются менее нагретыми. Количественная оценка температурной неоднородности проводилась по измеренным значениям температуры в рабочей области нагревателя и показала, что перепад температуры не превышает 1,5 °C, что удовлетворяет условиям эксплуатации большинства применяемых оптических элементов космических аппаратов.

Газовыделение материалов нагревателя измеряли при следующих условиях: вакуум $5 \cdot 10^{-4}$ Па; температура нагрева образцов 125 °C; температура нагрева конденсирующей пластины 25 °C; длительность испытания 24 ч. В итоге относительная потеря массы составила не более 0,03 %, количество летучих конденсирующихся веществ – не более 0,02 %, что в разы ниже, чем у традиционно применяемых при изготовлении космических аппаратов материалов (не более 1 % и не более 0,1 % соответственно).

Заключение

В результате численного моделирования и проведённых экспериментов подтверждена эффективность разработанной конструкции тонкоплёночного нагревателя для оптических элементов космических аппаратов. Применение программного комплекса COMSOL Multiphysics позволило достоверно прогнозировать качественное распределение температурного поля, несмотря на выявленные количественные расхождения между модельными и экспериментальными данными. Основной причиной таких расхождений является упрощение условий теплоотдачи в численной модели, что следует учитывать при дальнейшем совершенствовании методики моделирования.

Полученные данные продемонстрировали, что использование меандровой структуры при оптимально выбранных материалах позволяет обеспечить высокую температурную однородность поверхности работающего нагревателя в пределах 1,5 °C и газовыделение в разы ниже традиционно применяемых при изготовлении космических аппаратов материалов. Представленные результаты могут служить основой для последующей оптимизации нагревательных систем и повышения их надёжности в условиях эксплуатации космической техники.

Список литературы

[1] Штокал А.О., Рыков Е.В., Баженова О.П., Шостак С.В. Перспективы создания и особенности применения терморегулирующих покрытий алюминиевых конструктивных элементов внутренней полости оптических систем космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 4 (62). С. 87–92. DOI: doi:10.26162/LS.2023.62.4.012 EDN: EGNEAN

[2] Моишеев А.А., Ильясов М.Ф., Зверев А.В. и др. Особенности конструкции телескопа Т-170М // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5 (26). С. 53–60. EDN: TDWXRP

[3] COMSOL Multiphysics Programming Reference Manual [Электронный ресурс]. URL: https://cdn.comsol.com/doc/6.3.0.290/COMSOL_ProgrammingReferenceManual.pdf (дата обращения: 24.04.2026).

[4] COMSOL – Software for Multiphysics Simulation [Электронный ресурс]. URL: https://www.comsol.com/ (дата обращения: 24.04.2026).

[5] Gallo-Villanueva R.C., Perez-Gonzalez V.H., Cardenas-Benitez B. et al. Joule heating effects in optimized insulator-based dielectrophoretic devices: An interplay between post geometry and temperature rise // Electrophoresis. 2019. No. 40. P. 1408–1416.

[6] Алексеев В.Ф., Пискун Г.А., Калиновский Д.В., Ивлиев И.А. Моделирование джоулева нагрева в среде COMSOL Multiphysics // Доклады БГУИР. 2018. № 7 (117). С. 90–95. EDN: YVNQDJ

[7] Рыбаков Д.Г., Беликов А.Н. Моделирование тепловых процессов, протекающих в контроллере железной дороги в программной среде COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] // Репозиторий БГУИР, 2023. URL: https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/53104 (дата обращения: 07.04.2025). EDN: OGQKUA

[8] Li Y.H., Shen F., Ke L.L. Multi-physics electrical contact analysis considering the electrical resistance and Joule heating // International Journal of Solids and Structures. 2022. Vol. 256. Art. no. 111975. DOI: doi:10.1016/j.ijsolstr.2022.111975 EDN: XIKVDA

[9] Богинская И.А., Гусев А.В., Маилян К.А. и др. Полимерные пленки на основе поли-п-ксилилена для применения в микро- и оптоэлектронике // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 5. С. 17–22. EDN: MVYKMP

[10] Coelho B.J., Pinto J.V., Martins J. et al. Parylene C as a Multipurpose Material for Electronics and Microfluidics // Polymers. 2023. Vol. 15. Art. no. 2277. DOI: doi:10.3390/polym15102277 EDN: LDWEYW

[11] Walter N.A., Scialdone J.J. Outgassing data for selecting spacecraft materials. NASA Reference Publication 1124. Revision 4. June 1997. 436 p.

[12] Kim B.J., Meng E. Review of polymer MEMS micromachining // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2016. Vol. 26. Art. no. 013001.

[13] Low Outgassing Conformal Coatings Protect Critical Space Electronics. Specialty Coating Systems [Электронный ресурс]. URL: https://scscoatings.com/newsroom/blog/low-outgassing-conformal-coatings-protect-critical-space-electronics/ (дата обращения: 24.04.2026).

[14] Low-Outgassing, Space-Grade Coatings Cover Electronics, Sensors, Pacemakers. NASA Spinoff [Электронный ресурс]. URL: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2020/hm_3.html (дата обращения: 24.04.2026).

[15] Киселев А.В., Гусев А.В., Маилян К.А. и др. К вопросу управления излучательной способностью покрытий при создании систем обеспечения теплового режима космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2024. № 3 (65). С. 36–42. DOI: doi:10.26162/LS.2024.78.17.005 EDN: RNRUYJ

Ссылка для цитирования:

Киселев А.В., Гусев А.В., Глущенков А.В., Косицын С.А., Суров Д.И., Баженова О.П., Рыков Е.В., Штокал А.О. Особенности проектирования тонкоплёночных нагревателей оптических элементов космических аппаратов // Современная электродинамика. 2026. Т. 5, № 2(22). С. 10-18. EDN ORXNPC, doi:10.24412/2949-0553-2026-222-10-18

Citation link:

Kiselev A.V., Gusev A.V., Gluschenkov A.V., Kositsyn S.A., Surov D.I., Bazhenova O.P., Rykov E.V., Shtokal A.O. Design features of precision thin-film heaters for optical elements of spacecraft // Modern Electrodynamics. 2026. Vol. 5, No. 2(22). P. 10-18. EDN ORXNPC, doi:10.24412/2949-0553-2026-222-10-18