

**Исследование динамики нагрева металлодиэлектрических структур с нанометровыми проводящими пленками при воздействии СВЧ-полей***С. П. Арсеничев, Е. В. Григорьев, А. С. Мазинов, О. И. Пармёнов, И. Ш. Фитаев**Приведены результаты экспериментальных исследований и анализ динамики нагрева металлодиэлектрических структур (МДС) с алюминиевыми проводящими пленками на подложках из стекла или ситалла при воздействии мощных СВЧ-полей, а также при воздействии постоянного и переменного токов.**Ключевые слова:* металло-диэлектрическая структура, нанометровые проводящие пленки, СВЧ, электромагнитный нагрев.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-93-98

**1. Введение**

Исследование особенностей нанометровых пленок является актуальной задачей для микроэлектроники, так как они являются основными структурными элементами интегральных микросхем, датчиков, функциональных модулей и т.д. Недостаточно изученными остаются вопросы, связанные со стойкостью нанометровых проводящих пленок к мощным СВЧ-полям. Разрушение тонких пленок напрямую зависит от поглощенной мощности и физических процессов преобразования этой мощности в тепло [1–4]. Исследовать свойства проводящих пленок в составе микросхем

очень сложно из-за большого количества и размеров микроструктурных элементов кристалла. Поэтому для проведения подобных исследований используют более простые объекты – металлодиэлектрические структуры (МДС), представляющие собой диэлектрическую подложку конечных размеров с нанесенным слоем металла различной толщины [5, 6].

Для исследования был применён волноводный метод [7, 8], т. к. при его использовании структура поля волны  $H_{10}$  известна и можно достаточно просто установить корреляцию между динамикой нагрева и коэффициентом поглощения. Для получения достоверных результатов измерений, как и в предыдущих работах по пробою авторов настоящей статьи [7], необходимо обеспечить условие  $S_{\text{МДС}}/S_{\text{Волновод}} \leq 0,1$ , поэтому размер МДС был выбран  $15 \times 15$  мм при стандартном волноводе на длине волны в 10 см.

Целью данной работы является исследование температурных зависимостей МДС с нанометровыми проводящими пленками при воздействии СВЧ-полей, а также постоянного и переменного токов.

**2. Динамика электротепловых процессов в проводящих пленках МДС при воздействии мощных СВЧ-полей**

В качестве источника СВЧ-излучения был выбран магнетрон М105-1, работающий на частоте 2450 МГц с выходной мощностью

**Арсеничев Сергей Павлович**, доцент кафедры радиофизики, к.ф.-м.н.

**Григорьев Евгений Владимирович**, доцент кафедры радиофизики, к.т.н.

**Мазинов Алим Сеит-Аметович**, доцент кафедры радиофизики, к.т.н.

E-mail: mazinovas@cfuv.ru

**Пармёнов Олег Игоревич**, доцент кафедры компьютерной инженерии и моделирования, к.т.н.

**Фитаев Ибраим Шекетович**, сотрудник кафедры радиофизики, аспирант.

Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского.

Россия, Республика Крым, 295007, Симферополь, просп. Вернадского, 4.

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2021 г.

© Арсеничев С. П., Григорьев Е. В., Мазинов А. С., Пармёнов О. И., Фитаев И. Ш., 2021

порядка 700 Вт и волновод с поперечным сечением  $34 \times 72$  мм. Время работы магнетронного генератора определялось таймером, позволяющим задавать временные интервалы от 1 с до одного часа.

Таймером выставлялся временной интервал воздействия мощного СВЧ-излучения. По окончании воздействия образец быстро извлекался через специальное отверстие в волноводном тракте и пирометром «Center 350» измерялась температура МДС. Затем образец МДС охлаждался до температуры окружающей среды и исследования производились с другим временным интервалом работы магнетронного генератора.

Так как в процессе экспериментов, особенно с измерением температуры образца МДС, возможны разбросы погрешностей результатов измерений, то данные одних и тех же измерений были получены в ходе проведения трех циклов экспериментов с последующим усреднением результатов. Для определения степени воздействия мощных СВЧ-полей на диэлектрические структуры образцы подложек из стекла и ситалла размером  $15 \times 15$  мм

устанавливались в измерительную секцию волновода. Все эксперименты проведены для выходной мощности магнетрона в 650 Вт. Исследования показали, что температура подложек без напыленной проводящей пленки не изменяется даже при воздействии на них СВЧ-излучения в течении 30 минут. Это отражено на рисунках с температурными зависимостями.

Зависимость изменения температуры МДС с подложкой из ситалла от времени воздействия СВЧ-излучения и от толщины проводящей пленки показаны на рис. 1.

Измерения температуры МДС (рис. 1) с 5 нм плёнками были проведены только при воздействии 1 и 2 с, т. к. на третьей секунде МДС разрушилась.

Зависимость изменения температуры МДС с подложкой из стекла незначительно отличается от рисунка 1, но МДС разрушилась на второй секунде.

Измерения показали, что динамика нагрева практически не зависит от материала подложки и определяется толщиной плёнки и временем воздействия.

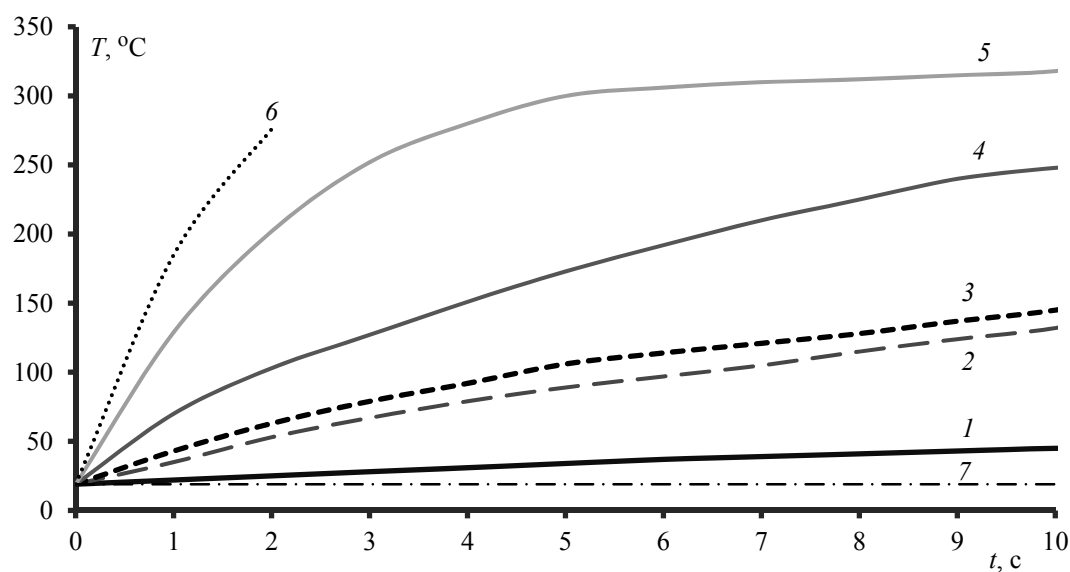


Рис. 1. Зависимость температуры МДС с подложкой из ситалла от времени воздействия СВЧ-излучения для алюминиевой пленки толщиной: 1 – 300 нм; 2 – 100 нм; 3 – 70 нм; 4 – 30 нм; 5 – 10 нм; 6 – 5 нм; 7 – чистая подложка.

Установлено, что самая большая скорость роста температуры у плёнки из алюминия толщиной 5 нм. Это коррелируется с тем, что проводящие пленки толщиной от 3 до 7 нм имеют самое большое значение коэффициента поглощения [1–6]. Поэтому при этих толщинах преобразование энергии СВЧ-поля в теп-

ловую энергию максимально. Показательной является зависимость температуры МДС для различных толщин плёнок алюминия за одну секунду воздействия СВЧ-излучения (рис. 2). Возле экспериментальных точек обозначены их толщины и измеренная пирометром температура.

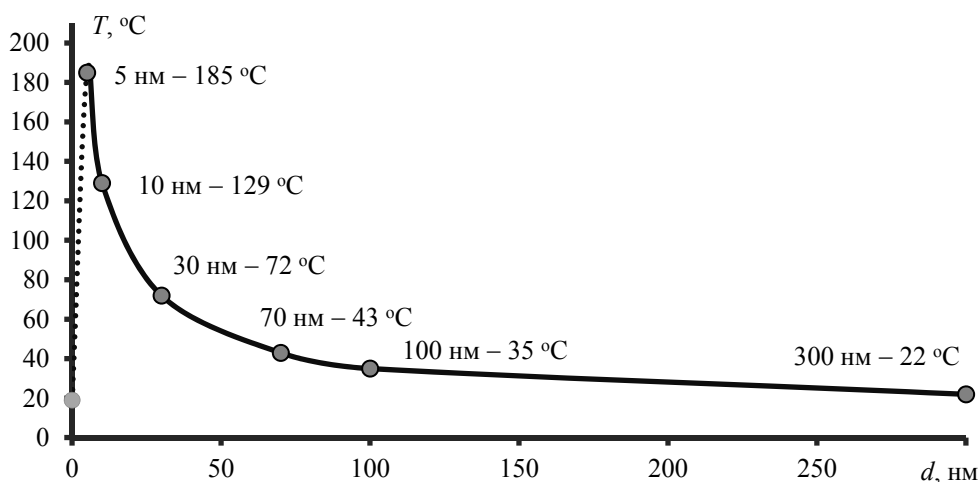


Рис. 2. Зависимость температуры МДС с подложкой из ситалла для разных толщин пленок из алюминия за одну секунду воздействия СВЧ-излучения.

Зависимость температуры МДС с подложкой из стекла отличается от рис. 2 тем, что структура с 5 нм алюминиевой пленки разогрелась до 218 °С.

Такая температурная зависимость объясняется тем, что удельная проводимость проводящих пленок  $\sigma$  меняется в зависимости от толщины пленки  $d$  в широких пределах: при  $d \rightarrow 0$  проводимость пленки также стремится к нулю и пленка не нагревается. При  $d < 7$  нм пленка представляется в виде совокупности наночастиц, т. е. не является сплошной, тем не менее, усредненное значение проводимости достаточно большое  $\sigma \approx 10^6$  См/м. При толщине проводящей пленки  $d < 7$  нм токи проводимости при воздействии СВЧ-полей замыкаются через токи смещения. Следует отметить, что зависимость  $\sigma = \sigma(d)$  при  $0 < d < 20$  нм практически линейная [10, 11], а нелинейность удельного сопротивления обусловлена переходом к сформированной пленки с табличными значениями удельной проводимости соответствующих материалов. Максимальное поглощение определяется электродинамическими факторами – перераспределением мощности падающей волны между отраженной и прошедшей волнами, при этом поглощенная мощность пропорциональна  $\sigma E^2$ , где  $E$  напряженность поля в пленке.

При воздействии СВЧ-полей на МДС токи проводимости могут замыкаться через токи смещения. При постоянном напряжении, приложенном к МДС, токи проводимости замыкаются по более извилистым путям, что отражается в наличии усредненного значения сопротивления МДС на постоянном и низкочастотном переменном напряжении. Представляет интерес исследовать динамику нагрева МДС при этих напряжениях.

### 3. Динамика электротепловых процессов в проводящих пленках МДС при воздействии постоянного или переменного токов

В экспериментальных исследованиях МДС через распределенный прижимной контакт подключали к источнику постоянного тока с напряжением 15 В или к источнику переменного тока с частотой 50 кГц и напряжением 15 В, а пирометром «Center 350» измерялась температура нагрева. Было установлено, что тепловыделение возрастает с увеличением толщины плёнки, а зависимости температуры МДС для постоянного и переменного токов практически идентичны. Поэтому на рис. 3 и 4 представлены температурные зависимости только для постоянного тока.

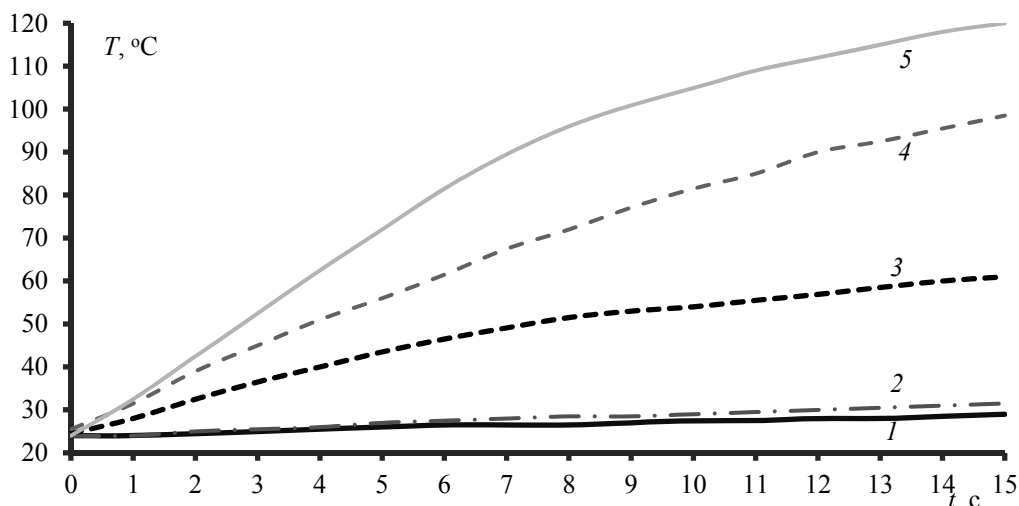


Рис. 3. Зависимость температуры МДС от времени воздействия постоянного тока для пленок алюминия, с толщиной: 1 – 5 нм; 2 – 10 нм; 3 – 20 нм; 4 – 30 нм; 5 – 50 нм.

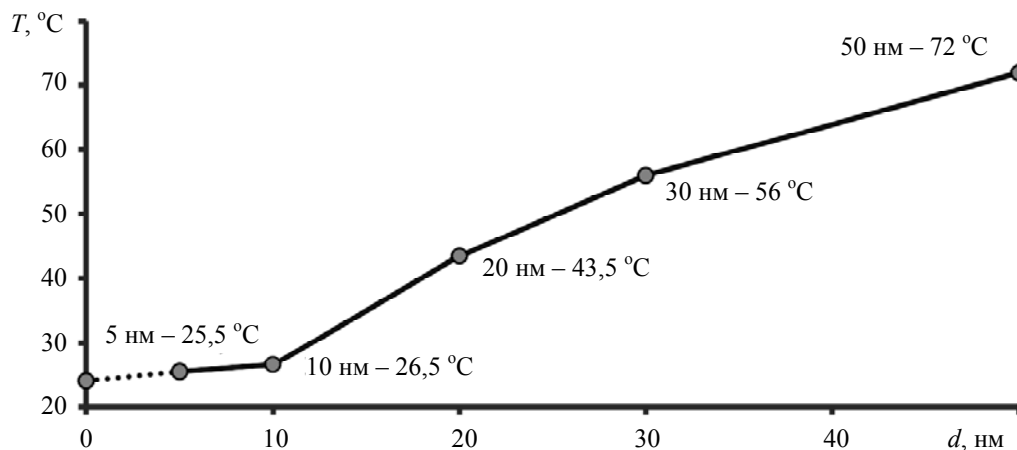


Рис. 4. Зависимость температуры МДС от толщин пленок алюминия за 5с воздействия постоянного тока.

Для того, чтобы установить степень влияния материала подложки на температурные зависимости, измеренные пирометром в процессе экспериментов, был проведён расчёт количества теплоты, выделенной в алюминиевых нанометровых пленках при прохождении постоянного тока. Согласно закону Джоуля-Ленца в интегральной форме количество теплоты в плёнках с разной толщиной и одинаковым приложенным напряжением определяется их сопротивлением. В таблице приведены значения сопротивлений алюминиевых пленок МДС размером  $15 \times 15$  мм, полученных ионным способом и расчетное количество теплоты за время воздействия 1 с.

Сопротивления измерялись между прижимными контактами. Так как сопротивление плёнок одинаковой толщины из-за неравномерности напыления у различных МДС отличаются, измерения сопротивлений были про-

ведены на пяти одинаковых структурах и в таблице указаны их интервалы.

Таблица

Значения сопротивлений алюминиевых пленок

Толщина напыления $d$ , нм	Значения величин сопротивлений алюминиевых пленок $R$ , Ом	Расчетное количество теплоты, Дж
5	700–750	0,31
10	320–360	0,66
20	100–120	2,05
30	40–60	4,48
50	25–35	7,51

Полученная расчетная зависимость динамики нагрева алюминиевых плёнок достаточно коррелируются с экспериментальными данными и показывает, что степень влияния подложек, близких по своим характеристикам, на температурные зависимости незначительна.

### Выводы

Сравнительный анализ динамики нагрева показал, что при воздействии СВЧ-полей температурные зависимости от толщины проводящей пленки и времени воздействия значительно отличаются от подобных зависимостей на постоянном или переменном токах. На графиках (рис. 3, 4) отсутствует участок аномально высокого роста температуры для плёнок толщиной 5–10 нм, имеющий место при воздействии СВЧ-полей. Это можно объяснить тем, что при воздействии СВЧ-поля токи проводимости замыкаются через токи смещения, а на низких частотах и постоянном токе должны иметь место устойчивые проводящие участки между электродами для нагрева пленки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. – М.: Физматгиз, 1958.
2. Bosman H., Lau Y. Y., Gilgenbach R. M. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 1353.
3. Nimitz G., Panten Uwe // Ann. Phys. (Berlin). 2010. Vol. 19. № 1–2. P. 53.
4. Sucheng Li, Shahzad Anwar, Weixin Lu, Zhi Hong Hang, Bo Hou, Mingrong Shen, Chin-Hua Wang // AIP ADVANCES. 2014. Vol. 4. P. 017130.
5. Арсеничев С. П., Григорьев Е. В., Зуев С. А., Старостенко В. В., Таран Е. П., Фитаев И. Ш. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22. № 2. С. 48.
6. Старостенко В. В., Мазинов А. С., Фитаев И. Ш., Таран Е. П., Орленсон В. Б. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 60.
7. Арсеничев С. П., Григорьев Е. В., Иванов Р. А., Орленсон В. Б., Налогин А. Г., Таран Е. П., Старостенко В. В., Фитаев И. Ш. / СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2018): материалы докладов 28-й Международной Крымской конференции. – Севастополь, 2018. С. 2013–2018.
8. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989.
9. Антонец И. В., Котов Л. Н., Некипелов С. В., Карпушов Е. Н. // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. Вып. 11. С. 104.
10. Антонец И. В., Котов Л. Н., Некипелов С. В., Карпушов Е. Н. // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 12. С. 1394.
11. Пронин С. М., Вдовин В. А., Андреев В. Г. // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2016. № 5. С. 165411-1.

PACS: 41.20.Jb; 4.40.+a

## Investigation of the dynamics of heating metal-dielectric structures with nanometer conductive film under the influence of microwave fields

*S. P. Arsenichev, E. V. Grigoriev, A. S. Mazinov, O. I. Parmenov, and I. Sh. Fitaev*

Vernadsky Crimean Federal University  
4 Prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russia

*Received September 21, 2021*

***The paper presents the results of experimental studies and analysis of the dynamics of heating of metal-dielectric structures (MDS) with aluminum conducting films on glass or siall substrates when exposed to powerful microwave fields, as well as when exposed to direct and alternating currents.***

**Keywords:** metal-dielectric structure, nanometer conducting films, microwave, electromagnetic heating.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-6-93-98

## REFERENCES

1. G. V. Rosenberg, *Optics of thin coatings* (Fizmatgiz, Moscow, 1958).
2. H. Bosman, Y. Y. Lau, and R. M. Gilgenbach, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1353 (2003).
3. G. Nimtz and Uwe Panten, *Ann. Phys. (Berlin)* **19** (1–2), 53 (2010).
4. Sucheng Li, Shahzad Anwar, Weixin Lu, Zhi Hong Hang, Bo Hou, Mingrong Shen, and Chin-Hua Wang, *AIP ADVANCES* **4**, 017130 (2014).
5. S. P. Arsenichev, E. V. Grigoriev, S. A. Zuev, V. V. Starostenko, E. P. Taran, and I. Sh. Fitaev, *Electromagnetic waves and electronic systems* **22** (2), 48 (2017).
6. V. V. Starostenko, A. S. Mazinov, I. Sh. Fitaev, E. P. Taran, and V. B. Orlenson, *Applied Physics*, No. 4, 60 (2019) [in Russian].
7. S. P. Arsenichev, E. V. Grigoriev, R. A. Ivanov, V. B. Orlenson, A. G. Nalogin, E. P. Taran, V. V. Starostenko, and I. Sh. Fitaev, in *Proceedings of 28-th International Conference "Microwave and Telecommunication Technology" (CriMiCo'2018)*. pp. 2013–2018.
8. V. V. Nikolsky and T. I. Nikolskaya, *Electrodynamics and radio wave propagation* (Nauka, Moscow, 1989).
9. I. V. Antonets, L. N. Kotov, S. V. Nekipelov, and E. N. Karpushov, *Technical Physics* **49** (11), 1496 (2004).
10. I. V. Antonets, L. N. Kotov, S. V. Nekipelov, and E. N. Karpushov, *Radio engineering and electronics* **51** (12), 1394 (2006).
11. S. M. Pronin, V. A. Vdovin, and V. G. Andreev, *Scientific Notes of the Physics Faculty of Moscow University* **5**, 165411-1 (2016).