DOI: 10.17725/rensit.2022.14.243

Динамика нагрева металлодиэлектрических структур с нанометровыми проводящими пленками при воздействии СВЧ-полей

Старостенко В.В., Григорьев Е.В., Мазинов А.С., Арсеничев С.П., Таран Е.П., Старосек А.В., Фитаев И.Ш.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, https://cfuv.ru/
Симферополь 295007, Российская Федерация
E-mail: starostenkovv@cfuv.ru, grigoriev@mail.ru, mazinovav@cfuv.ru, arsenichevsp@cfuv.ru, taran.ep@cfuv.ru, starosekav@cfuv.ru, fitaev.i@cfuv.ru

Поступила 19.08.2022, рецензирована 26.08.2022, принята 31.08 2022
Представлена действительным членом РАЕН С.П. Губиным

Аннотация: **В работе приведены результаты экспериментальных исследований динамики нагрева металлодиэлектрических структур (МДС) с алюминиевыми проводящими наноразмерными пленками, осажденными методом магнетронного распыления на бюджетные подложки (стекло, ситалл, лавсан и фторопласт), при воздействии монохроматических сверхвысокочастотных полей (СВЧ) в волноводе. При толщинах пленки менее 2 нм экспериментальные образцы обладали в большей степени свойствами диэлектрика. Заметное взаимодействие пленок с СВЧ, приводящее к тепловым процессам, наблюдалось при толщинах более 2 нм и достигало максимума на 5 нм. Тепловые процессы деградации металлизированного слоя проявлялись различным образом в МДС с твердыми и полимерными (гибкими) подложками. Пробой в проводящих пленках происходил, как правило, при температурах ниже температуры плавления материала пленки и происходил перпендикулярно вектору напряженности электрического поля.**

Ключевые слова: **металлодиэлектрическая структура, нанометровые проводящие пленки, СВЧ, волновод, тепловое воздействие, пробой**

УДК 537.874.7

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 22-22-20126).

Для цитирования: Старостенко В.В., Григорьев Е.В., Мазинов А.С., Арсеничев С.П., Таран Е.П., Старосек А.В., Фитаев И.Ш. Динамика нагрева металлодиэлектрических структур с нанометровыми проводящими пленками при воздействии СВЧ-полей. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии,* 2022, 14(3):243-248. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.243.

Heating dynamics of metal-dielectric structures with nanometer-thin conductive films under the influence of microwave fields

Vladimir V. Starostenko, Evgeniy V. Grigoriev, Alim S. Mazinov, Sergey P. Arsenichev, Evgeniy P. Taran, Aleksandr V. Starosek, Ibraim Sh. Fitaev

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, https://cfuv.ru/
Simferopol 295007, Russian Federation
E-mail: starostenkovv@cfuv.ru, grigoriev@mail.ru, mazinovav@cfuv.ru, arsenichevsp@cfuv.ru, taran.ep@cfuv.ru, starosekav@cfuv.ru, fitaev.i@cfuv.ru

Received August 19, 2022, peer-reviewed August 26, 2022, accepted August 31, 2022

Abstract: **The paper presents the results of experimental studies of the heating dynamics of metal-dielectric structures (MDS) with aluminum conductive nanoscale films deposited by magnetron sputtering on low-cost substrates (glass, sitall, PET and PTFE) under exposure to monochromatic**

ultrahigh frequency (UHF) fields in a waveguide. At film thicknesses less than 2 nm, the experimental samples had mostly dielectric properties. Noticeable interaction of the films with microwave, causing thermal phenomena, was observed at thicknesses greater than 2 nm and reached a maximum at 5 nm. Thermal degradation processes of the metallized layer manifested in different ways in MDS with solid and polymer (flexible) substrates. Breakdown in conductive films generally occurred at temperatures below the melting temperature of the film material and occurred perpendicular to the electric field strength vector.

Keywords: **metal-dielectric structure, nanometer conductive films, microwave, waveguide, thermal effect, breakdown**

PACS 78.70.Gq

Acknowledgments: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project no. 22-22-20126).

For citation: Vladimir V. Starostenko, Evgeniy V. Grigoriev, Alim S. Mazinov, Sergey P. Arsenichev, Evgeniy P. Taran, Aleksandr V. Starosek, Ibraim Sh. Fitaev. Heating dynamics of metal-dielectric structures with nanometer-thin conductive films under the influence of microwave fields. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies,* 2022, 14(3):243-248. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.243.

Содержание

1. **Введение (244)**
2. **Методика экспериментальных исследований (245)**
3. **Электродинамические и тепловые экспериментальные исследования (245)**
4. **Заключение (247)**

Литература (247)

1. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное освоение сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона и широкое внедрение нанотехнологий в микроэлектронику сделали особо актуальной задачу исследований стойкости электронных компонентов к воздействию электромагнитных полей (ЭМП). Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные различными группами ученых в разных странах [1,2] показывают, что из таких пленочных микроструктурных компонентов как активные приборы, диэлектрические и проводящие элементы, составляющих основу интегральных микросхем, датчиков, микросборок, электронных модулей и т.д., наиболее уязвимыми являются проводящие пленки, в первую очередь, контактные площадки [1,2].

Работы по исследованию свойств нанометровых проводящих пленок в основном посвящены исследованию их электродинамических (дифракционных) свойств. В данной работе приводятся результаты динамики электротепловых процессов в нанометровых проводящих пленках, рассматриваемых ранее в работах [3–9].

Изучение физических явлений в проводящих структурах изделий микроэлектроники при воздействии ЭМП крайне затруднительно, поэтому исследования проводились на макрообъектах с металлодиэлектрическими структурами (МДС) конечных размеров в волноводном тракте. Преобразование энергии СВЧ в тепловую энергию при воздействии на МДС определяется толщиной и материалом проводящей пленки, мощностью генератора и значением поглощенной энергии (временем воздействия). Все исследования проводились при естественном теплообмене, т.е. без принудительного отвода тепла. В работе используются данные линейной дифракции на МДС в волноводе (неизменные значения коэффициента стоячей волны КСВ и ослабления *T*), теоретические и экспериментальные данные по динамике тепловых процессов в МДС. В экспериментальных исследованиях определялось влияние толщины пленок, мощности генератора и времени воздействия (поглощенной энергии) как на динамику нагрева, так и на пробой (прожог) пленок МДС.

В настоящее время тенденцией в электронике является уменьшение геометрических размеров микроструктурных элементов, что связано с толщинами используемых в них пленок. В проводящих нанометровых пленках в зависимости от толщины имеет место переход от диэлектрика (отсутствие пленки) к зеркальной (отражающей) структуре. В этой связи в работе особое внимание уделяется физическим явлениям в проводящих пленках толщиной 1-10 нм при воздействии на них мощного СВЧ-излучения.

Целью данной работы являются экспериментальные исследования процессов преобразования энергии СВЧ-полей в тепловую энергию при воздействии на металлодиэлектрические структуры с нанометровыми пленками.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве твердых диэлектрических подложек использовались покровные стекла и подложки из ситалла размером 18×18×0.15 мм. Перед напылением подложки подвергались плазменной шлифовке и имели шероховатость не более 10 нм. Кроме этого в качестве оснований для пленок использовались полимерные подложки из лавсана и фторопласта, поверхности которых достаточно сильно отличаются от подложек из стекла и ситалла [10,11].

Исследования дифракционных характеристик производились в волноводе на панорамном измерителе КСВ и ослабления T (Р2-56, f = 2.9-4.1 ГГц). В СВЧ-диапазоне соотношения между падающей, отраженной, прошедшей и поглощенной волнами не зависят от частоты, поскольку структурные неоднородности намного меньше длины волны; они также не меняются при масштабном сохранении отношений поперечных размеров МДС и волновода [10,11].

Схема установки по непосредственному воздействию монохроматических ЭМП на МДС приведена на **Рис. 1**.

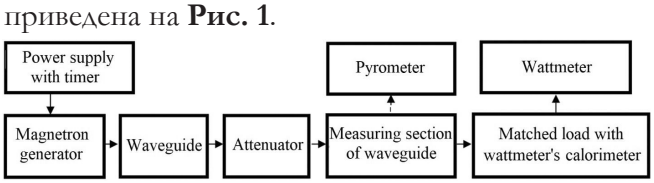

Рис. 1. *Структурная схема установки для исследования электротепловых процессов в МДС.*

В качестве генератора СВЧ-излучения использовался магнетрон М105-1, работающий на частоте 2450 МГц с выходной мощностью до 700 Вт. Волноводный тракт имел размеры 34×72 мм. Во всех волноводных исследованиях выполнялось условие $S_{\mathrm{MDS}} << S_{wg}$, где S_{MDS} и S_{wg} – поперечные сечения МДС и волновода. Следует отметить, что значения КСВ и ослабления T при расположении МДС нормально и вдоль оси волновода параллельно вектору напряженности электрической компоненты поля волны H_{10} одинаковы. Выбиралась ориентация МДС относительно оси волновода, которая была удобна для проведения измерений.

При электротепловом воздействии исследуемый образец помещался в измерительную секцию волноводного тракта и после дозированного воздействия СВЧ-излучения (кратного 1 с) температура образца измерялось пирометром "МЕГЕОН 16350" через специальное отверстие в волноводе. Затем образцу давали остыть до температуры окружающей среды и повторяли процесс с другой мощностью генератора. Поскольку при температурных измерениях возможны значительные погрешности, то проводилось пять циклов экспериментов с последующим усреднением полученных значений.

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

При панорамных измерениях характеристик дифракции на объектах в волноводе КСВ характеризует отраженную волну по полю, а коэффициент прохождения (ослабления) по мощности. Наиболее часто в качестве дифракционных характеристик используют относительные мощности отраженной (R), прошедшей (T) и поглощенной (A) волн – оптические коэффициенты. Из баланса мощностей следует условие $R + T + A = 1$, где R, T *и* A – нормированные к входной мощности дифракционные характеристики; R рассчитывается через КСВ, T – коэффициент прохождения (ослабления) по мощности, поглощение A находится из баланса мощностей [10,11].

Наибольший интерес представляет поведение *R, T* и *A* в интервале толщин от 1 до 10 нм. При таких толщинах происходит максимально возможное преобразование энергии ЭМП в тепловую энергию. При использовании бюджетных подложек и методов нанесения пленок понятие толщины до 7…10 нм достаточно условное. Это обусловлено шероховатостью поверхности, с одной стороны, пространственной и омической неоднородностями пленки, с другой. При таких толщинах пленка неоднородна и имеет островковую структуру (совокупность рассеивающих центров, наночастиц и т.д. [12]). Обычно для таких толщин пленок ставят в соответствие время напыления.

Температурные зависимости МДС от толщины напыления алюминиевой пленки при одинаковом времени воздействия $t = 1$ с для мощности СВЧ излучения 15, 30 и 60 Вт показаны на **Рис. 2**.

Из Рис. 2 следует, что до толщин пленки $d = 2$ нм МДС представляет в большей степени диэлектрик. При больших значениях толщины пленки начинают проявляться омические потери. Более подробная динамика преобразования энергии ЭМП в тепло при $1.5 < d < 3$ нм представлена во вставке Рис. 2. До толщин $d = 2$ нм температура пленки равна температуре окружающей среды, при $d > 2$ нм температура пленки растет за счет омических потерь, достигая максимальных значений при $d \approx 5$ нм. При $d > 5$ нм пленка практически сформировалась. Преобладающим при этом является отражение, а не поглощение. В целом, при $d > 10$ нм устанавливается стационарное соотношение между отраженной и

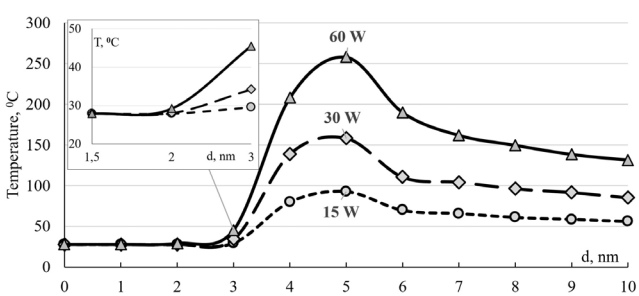

Рис. 2. *Температурные зависимости МДС от толщины Al пленки при t = 1с при мощности генератора в 15, 30 и 60 Вт.*

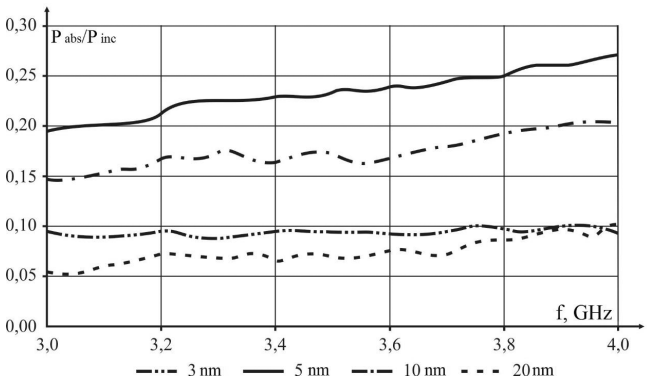

Рис. 3. *Динамика изменения зависимости P_{abs}/P_{inc} от частоты в диапазоне Р2-56 для МДС с алюминиевыми пленками различной толщины.*

прошедшей волнами, поглощенная мощность определяется воздействующей мощностью.

На **Рис. 3** приведены зависимости P_{abs}/P_{inc} для МДС с пленками различных толщин в диапазоне частот панорамного измерителя Р2-56. Данные зависимости показывают, что максимальное преобразование энергии ЭМП в тепловую энергию происходит при толщине пленок вблизи 5 нм. Сходные результаты получаются для МДС с пленками с удельной проводимостью более 10^7 См/м, в частности, с пленками из золота, алюминия и т.д. [5,12]. Незначительная зависимость P_{abs}/P_{inc} от частоты (Рис. 3) объясняется изменением электрических размеров МДС в диапазоне частот панорамного измерителя. Сопоставление приведенных на Рис. 2 и 3 зависимостей показывает, что на указанных на Рис. 2 значениях мощности генератора в тепло преобразуется только около 30% падающей мощности (Рис. 3).

При увеличении мощности генератора возможен разогрев пленки до температуры плавления (**Рис. 4**). Как следует из Рис. 4, заметное преобразование энергии ЭМП в тепло начинается при толщинах пленок 3 нм и более. В МДС с пленкой толщиной 3 нм температура поднималась до 200°С за 3 с (Рис. 4). При воздействии на МДС с пленкой толщиной в 5 нм за 1 с происходил пробой, аналогичная ситуация имеет место для МДС с пленкой толщиной 7 и 10 нм.

В МДС при катастрофическом отказе температура пленки может не достигать температуры плавления — при воздействии

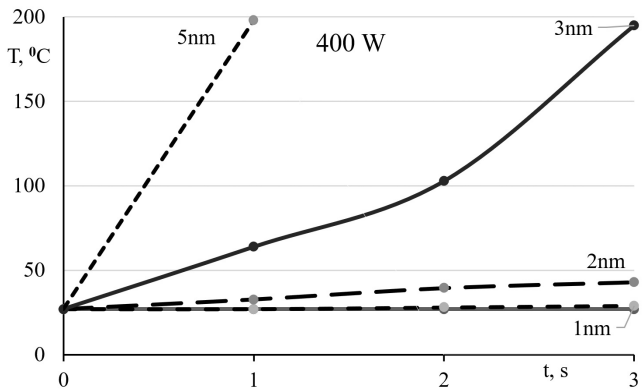

Рис. 4. *Температурные зависимости при воздействии на МДС с пленками толщиной 1, 2, 3 и 5 нм ЭМП мощностью в 400 Вт.*

ЭМП раньше наступает пробой пленки. Это обусловлено спецификой распределения тока и температуры в объектах конечных размеров при воздействии ЭМП. Максимальные значения электрической компоненты поля создаются на ребрах, параллельных *E*-компоненте ЭМП. Снос электронов к ребрам МДС происходит за счет силы Лоренца, соответственно это приводит к большим плотностям токов и тепловым градиентам на ребрах МДС, параллельных *E*-компоненте поля. Все это является причиной пробоя, который развивается перпендикулярно *E*-компоненте поля.

На **Рис. 5** приведены характерные примеры пробоя в МДС на твердой и полимерной подложках.

Тепловые изменения в МДС с полимерными подложками наблюдаются уже при толщинах пленок в 2 нм: МДС при этом меняют свою геометрию, подложки начинают изгибаться и скручиваться.

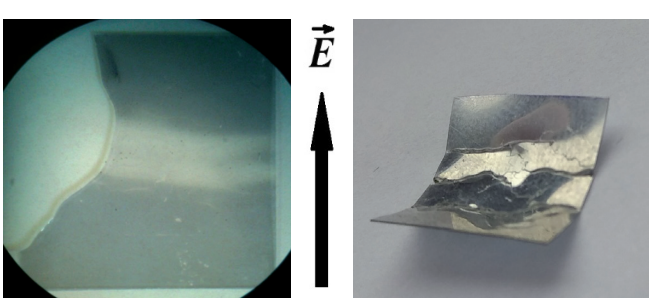

Рис. 5. *Пробои и разрушения в МДС на твердой и полимерной подложках, толщина пленок 10 нм, P = 60 Вт, t = 2 с.*

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты исследований электротепловых процессов в проводящих пленках толщиной менее 10 нм при воздействии ЭМП в волноводе. Заметные температурные явления проявляются в проводящих пленках при толщинах более 2 нм, причем тепловые процессы проявляются различным образом в МДС с твердыми и полимерными (гибкими) подложками. Пробой в проводящих пленках происходит, как правило, при температурах ниже температуры плавления материала пленки и происходит перпендикулярно вектору напряженности электрической компоненты поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Antinone RJ. *Electrical Overstress Protection for Electronic Devices.* New York, Noyes Publications, 1986, 492 p.
2. Чернышев АА. *Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем*. Москва, Радио и связь, 1988, 256 с.
3. Bosman H, Lau YY, Gilgenbach RM. Microwave absorption on a thin film. *Appl. Phys. Lett.,* 2003, 82(9):1353-1355.
4. Nimtz G, Panten U. Broad band electromagnetic wave absorbers designed with nano-metal films. *Ann. Phys.*, 2010, 19(1-2):53-59.
5. Li S, Anwar S, Lu W, Hang ZH, Hou B, Shen M, Wang C-H. Microwave absorptions of ultrathin conductive films and designs of frequency-independent ultrathin absorbers. *AIP Adv.*, 2014, 4(1):017130.
6. Пронин МС, Вдовин ВА, Андреев ВГ. Исследование оптических коэффициентов нанометровых пленок меди и золота в СВЧ диапазоне. *Ученые записки физического факультета Московского университета*, 2016, 5:165411.
7. Старостенко ВВ, Мазинов АС, Фитаев ИШ, Таран ЕВ, Орленсон ВБ. Динамика формирования поверхности проводящих пленок алюминия на аморфных подложках. *Прикладная физика*, 2019, 4:60-65.
8. Zuev SA, Starostenko VV, Taran EP, Shcherbakov SV, Arsenichev SP, Grigoriev EV, Fitaev ISh.

Microwave Range Diffraction Properties of Structures with Nanometer Conductive Films on Amorphous Dielectric Substrates. *26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 1-4, Belgrade, 2018. DOI:10.1109/TELFOR.2018.8611867.

9. Zuev SA, Zuev AS, Starostenko VV, Grigoriev EV, Mazinov AS, Taran EP, Fitaev ISh, Orlenson VB. Breakdown features in functional devices of telecommunication systems. *27th Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 1-3, Belgrade, 2019. DOI:10.1109/TELFOR48224.2019.8971293.
10. Арсеничев СП, Григорьев ЕВ, Зуев СА, Старостенко ВВ, Таран ЕП, Фитаев ИШ. Дифракция электромагнитного излучения на тонких проводящих пленках металлодиэлектрических структур в прямоугольном волноводе. *Электромагнитные волны и электронные системы,* 2017, 22(2):48-53.
11. Мазинов АС. Физические и электродинамические свойства наноразмерных проводящих пленок на полимерных подлжках. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии,* 2020, 12(2):247-252. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.247.
12. Maier SA *Плазмоника, теория и применения.* Москва-Ижевск, НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2011, 296 с.

Старостенко Владимир Викторович
д.ф.-м.н., профессор
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
Симферополь 295007, Россия
starostenkovv@cfuv.ru

Григорьев Евгений Владимирович
к.т.н., доцент
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
Симферополь 295007, Россия
grigoriev@mail.ru

Мазинов Алим Сеит-Аметович
к.т.н., доцент
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
Симферополь 295007, Россия
mazinovav@cfuv.ru

Арсеничев Сергей Павлович
к.ф.-м.н., доцент
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
Симферополь 295007, Россия
arsenichevsp@cfuv.ru

Таран Евгений Павлович
к.ф.-м.н., доцент
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
Симферополь 295007, Россия
taran.ep@cfuv.ru

Старосек Александр Викторович
ассистент
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
Симферополь 295007, Россия
starosekav@cfuv.ru

Фитаев Ибраим Шевкетович
ассистент
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
Симферополь 295007, Россия
fitaev.i@cfuv.ru.