

Формирование металлодиэлектрических структур с нанометровыми проводящими пленками и исследование их нагрева при воздействии СВЧ-полей

Е. В. Григорьев, С. П. Арсеничев, А. В. Старосек, И. Ш. Фитаев, Н. А. Болдырев

Приведены результаты экспериментальных исследований и анализ динамики нагрева металлодиэлектрических структур с алюминиевыми проводящими пленками, осажденными методом магнетронного распыления на подложки из стекла, при воздействии мощных СВЧ-полей. Результаты моделирования механизма формирования неоднородной структуры металлизации и возникновения проводимости при росте плёнки подтвердили наблюдаемый температурный экстремум. Полученный максимум нагрева напылённых металлизированных покрытий обусловлен максимальным поглощением электромагнитной волны на усредненных толщинах 5 ± 1 нм, что связано со структурой формирующейся плёнки и соответствующим ей механизмом проводимости.

Ключевые слова: металлодиэлектрическая структура, нанометровые проводящие пленки, СВЧ-воздействие, электромагнитный нагрев.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-64-69

Введение

Одними из наиболее уязвимых к СВЧ-излучению, как обычного техногенного фона, так и используемого преднамеренно для вывода из строя электронной аппаратуры, структурными компонентами микроэлектроники являются наноразмерные проводящие структуры, в частности, слои металлизации. Исследование механизмов поглощения тонкоплёночной структурой энергии электромагнитного излучения с преобразованием в тепловую, и

последующего их разрушения является актуальной задачей стойкости электронной аппаратуры и требует исследования температурных зависимостей в динамике [1–4].

Особенности плёночных металлодиэлектрических структур (МДС), с толщинами порядка единиц нанометров, обусловлены, в частности структурой плёнки, представляющей совокупность проводящих островковых образований. Это поднимает вопросы усреднённых значений толщины нанометровых плёнок, истинности определения из проводимости и т. д., а также вопросы, связанные с нелинейностью их структуры. Исследование функциональных плёночных элементов в составе интегральных микросхем малоэффективно, поэтому рассматривались простые макроскопические объекты – диэлектрические подложки конечных размеров с проводящим покрытием (алюминием) различной толщины [5, 6].

Исследования проводились волноводным методом [7–9], т. к. в этом случае структура поля волны H_{10} известна. При этом, для получения достоверного эффекта, отношение

Григорьев Евгений Владимирович, доцент, к.т.н.
Арсеничев Сергей Павлович, доцент, к.ф.-м.н.
Старосек Александр Викторович, ассистент кафедры.
E-mail: starosekav@cfuv.ru
Фитаев Ибраим Шекетович, ассистент кафедры.
Болдырев Николай Алексеевич, магистр кафедры.
Крымский федеральный университет
им. В. И. Вернадского.
Россия, Республика Крым, 295007, г. Симферополь,
просп. Вернадского, 4.

Статья поступила в редакцию 27 июня 2022 г.

© Григорьев Е. В., Арсеничев С. П., Старосек А. В.,
Фитаев И. Ш., Болдырев Н. А., 2022

площади исследуемых образцов к поперечному сечению волноводной камеры, в которой образцы размещались по нормали к вектору Пойнтинга, составляло не более 10 %.

Целью данной работы является исследование температурных зависимостей МДС с нанометровыми проводящими пленками с толщинами менее 5 нм при воздействии СВЧ-полей.

Получение плёнок и измерение поверхностного сопротивления

В качестве диэлектрических подложек использовались покровные стёкла размерами 18×18×0,15 мм. Такие подложки обладают достаточно хорошей повторяемостью геометрических размеров и шероховатостью [6]. Для напыления использовалась комбинированная вакуумная установка НИИТМ «МАГНА ТИС 03» в режиме магнетронного напыления.

После подготовки (промывка и обезжиривание в ультразвуковой ванне, ионная очистка в вакууме перед напылением) на подложки методом магнетронного напыления наносился алюминий. Использовался следующий режим напыления: мощность магнетрона 100 Вт, давление рабочего газа (аргона) 0,3 Па, мишень Al 99,999 %. Время напыления

варьировалось от 190 до 450 с, сериями по 5 и более образцов.

Как было показано в предыдущих работах [6], прямое измерение толщин нанометровых плёнок весьма затруднительно, особенно с учётом их неоднородного строения на начальном этапе роста. Поэтому в данной работе, параллельно с интерференционной микроскопией, был использован сравнительный метод корреляции времени напыления и толщины с другими физическими параметрами, в частности, эталонного нормированием сопротивлением. Измерение сопротивления напылённой плёнки производилось с помощью анализатора Agilent B1500a, по двух- и четырёхзондовой схемам с расстоянием между зондами 1 см, с последующим усреднением результатов по поверхности с 10 и более циклами измерений по каждому образцу.

Сводные данные, представленные на рис. 1 четырьмя характерными сериями осаждения и соответствующими им циклами измерения, условно можно разделить на два участка. Первый участок – с временами напыления до 250 с, характеризуется экспоненциальным ростом проводимости, имеется значительный разброс измеренных значений сопротивления. На втором участке рост проводимости замедляется, разброс значений сопротивления мал.

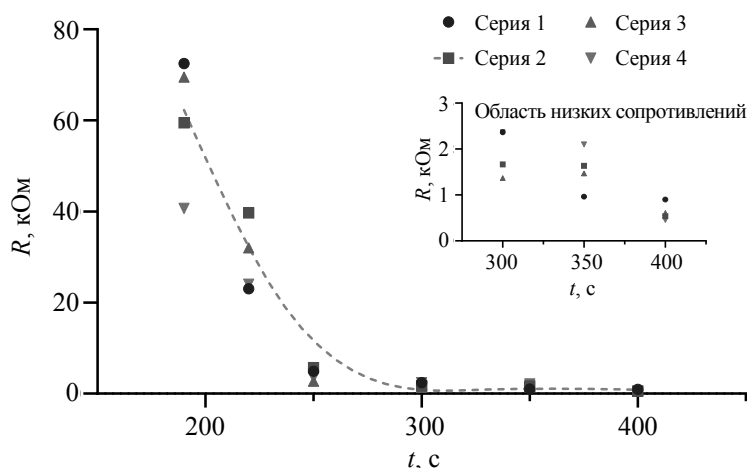


Рис. 1. Зависимость сопротивления плёнки от времени напыления

Природа резкого падения сопротивления определяется экспоненциальной зависимостью проводимости от толщины металлизированного слоя [10]. Это связано с особенностями формирования проводящей плёнки, которая имеет островковый характер, слабо

зависящий от шероховатости поверхности и наблюдающийся как на поверхностях, характерных для микроэлектроники, с шероховатостями менее 2–3 нм, так и в антенных системах с шероховатостью порядка десятков нм. Первоначально, осаждаемый на поверхность

подложки, вследствие различия кристаллических решёток, слой металла формируется в виде островков, что может привести как к нулевой проводимости слоя, так и к сравнимой с проводимостью объёмного материала [1, 11–14]. Более того, ряд авторов показали, что непосредственно внутри островков атомная решётка неидеальна [4, 6, 12], что в совокупности с диэлектрическими включениями и разрывами обуславливают общие резистивные свойства плёнки.

Динамика тепловых процессов в проводящих пленках при воздействии мощных СВЧ-полей

Исследование воздействия мощных монохроматических СВЧ-полей проводилось волноводным методом. Структурно установка для исследования состояла из источника питания с таймером, магнетронного генератора, волноводного тракта с аттенуатором, измерительной частью с пирометром и согласованной нагрузкой с калориметрической секцией ваттметра.

Для питания магнетрона используется высоковольтный выпрямитель с выходным напряжением порядка 4 кВ и током не менее 400 мА. Стабильность частоты магнетронного генератора обеспечивается высокостабильным источником питания. В качестве генератора СВЧ-излучения использовался магнетрон М105-1, работающий на частоте 2450 МГц с

выходной мощностью до 700 Вт. Время работы магнетронного генератора задавалось с помощью таймера, определяющего время коммутации М105-1 с источником питания. Минимальный шаг регулировки таймера составлял 1 секунду. Также волноводный тракт сечением 34×72 мм включал в себя измерительную секцию и калориметрическую секцию измерителя мощности МЗ-13/1 для контроля мощности СВЧ-излучения в процессе проведения экспериментов. Для более плавной регулировки мощности СВЧ-излучения использовался нормированный аттенуатор, включенный в волноводный тракт между измерительной секцией и генератором.

Исследуемый образец помещался в измерительную секцию волноводного тракта на подставке. После воздействия СВЧ-излучения температура образца измерялась пирометром «МЕГЕОН 16350» непосредственно в волноводе, через специальное отверстие в измерительной секции. Затем образцу давали остыть до температуры окружающей среды и повторяли процесс с другой мощностью генератора. Поскольку ход эксперимента, в особенности измерение температуры образцов, даёт разброс результатов, проводились пять циклов экспериментов с последующим усреднением полученных значений. Зависимость изменения температуры образца от времени напыления при различной мощности СВЧ-генератора представлена на рис. 2.

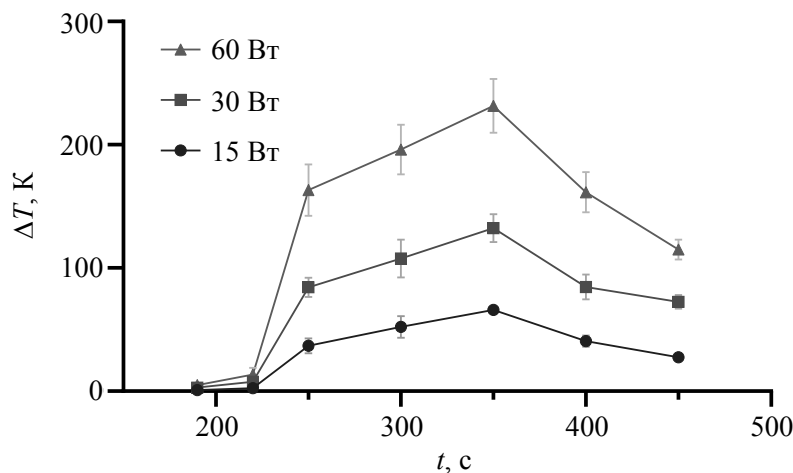


Рис. 2. Зависимость изменения температуры образца от времени напыления для различной мощности СВЧ

Установлено, что наибольшее изменение температуры наблюдается у образцов с временем напыления 350 с. Как следует из исследований на АСМ [6], это соответствует усреднённой толщине 5 нм. Начиная с 220 с напыления, что соответствует усреднённым толщинам 3 нм, с увеличением объёма металлизации наблюдается резкий рост максимальной температуры образцов до максимума на 350 с с последующим уменьшением. Отдельный эксперимент показал, что температура диэлектрических подложек без напылённого металла и с временем напыления менее 160 с не изменяется даже при воздействии на них СВЧ-излучения мощностью 400 Вт в течение более 10 минут.

Наблюдаемая зависимость объясняется механизмом формирования начальной атомной структуры плёнки. В нижнем пределе, при времени напыления менее 200 с (что соответствует $d < 3$ нм), плёнка представляет собой отдельные неконтактирующие островки напылённого материала. При воздействии СВЧ-излучения основными токами в подобной структуре являются поверхностные токи и токи смещения. Общий ток проводимости при больших сопротивлениях неидеального проводника составляет доли микроампер, как следствие, поглощённая мощность также стремится к нулю, и образец не нагревается. При толщине плёнки порядка 5 ± 2 нм рост отдельно взятых островков приводит к образованию отдельных гальванических связей, и основная проводимость осуществляется через контактирующие островки вследствие перколяции, с характерным сопротивлением 200–400 Ом. С дальнейшим ростом толщины

плёнки происходит переход к сплошной проводящей поверхности с ростом ее удельной проводимости к табличным значениям 10^7 Си/м [15].

Модельные представление взаимодействия электромагнитного поля и тонких проводящих пленок

Для обоснования предложенного выше механизма преобразования тонкими проводящими пленками энергии падающей электромагнитной волны в тепловую энергию, методом конечных элементов в пакете Ansys HFSS было проведено численное моделирование роста проводящих частиц с вычислением коэффициентов отражения, прохождения и поглощения.

Исходя из проведенных с помощью АСМ исследований [6], при моделировании задавалась элементарная трехмерная ячейка, с размерами $25 \times 25 \times 275$ нм. Моделируемая ячейка включала в себя передающий и приемный порты, моделируемый проводящий островок и периодические граничные условия. Островок представлен в виде полуэллипсоида, полуоси которого (малая полуось – диаметр в плоскости основания, большая полуось – высота от границы слоя металл-стекло) задавались как переменные величины. Результаты расчета зависимости оптических коэффициентов от диаметра основания представлен на рис. 3.

Как видно из рис. 3, всплеск коэффициентов отражения и поглощения происходит при соприкосновении краёв полусферы с границей модулируемой ячейки, что соответствует слиянию островков.

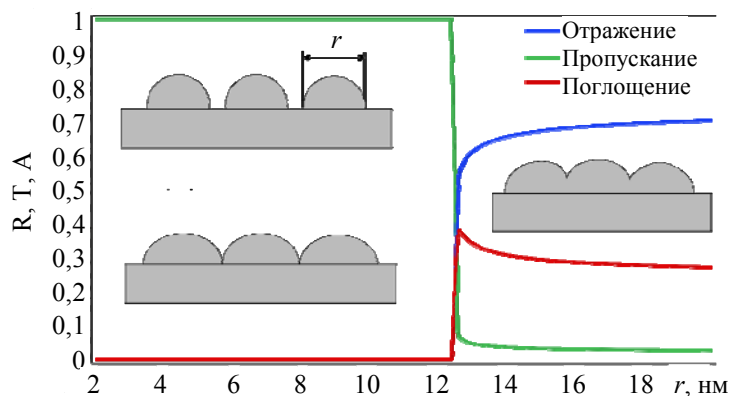


Рис. 3. Зависимости коэффициента пропускания, отражения и поглощения от диаметра основания островка

Выводы

Сравнительный анализ динамики нагрева показал, что при воздействии СВЧ-полей зависимость температуры образцов от толщины проводящей плёнки имеет пик на 5 нм. Растущая плёнка с разветвлённой поверхностью имеет сложный механизм формирования структуры посредством роста отдельных островков, что приводит к перколяционному механизму проводимости и, как следствие, большому разбросу значений проводимости.

Падающая электромагнитная волна практически не взаимодействует с отдельными группами островков, что проявляется в малых значениях коэффициентов поглощения и отражения в исследуемом диапазоне частот. Слияние групп островков с формированием значительных линейных структур вдоль вектора напряжённости электрического поля обуславливает сильное взаимодействие с электромагнитным полем и уменьшении коэффициента прохождения ниже 30 % при возрастании коэффициента поглощения до 50 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-20126).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nimtz G., Panten U. // Annalen der Physik. 2010. Vol. 19. № 1-2. P. 53.*

2. *Bosman H., Lau Y. Y., Gilgenbach R. M. // Applied Physics Letters. 2003. Vol. 82. № 9. P. 1353.*

3. *Li S., Anwar S., Lu W., Hang Z. H., Hou B., Shen M., Wang C.-H. // AIP Advances. 2014. Vol. 4. № 1. P. 017130.*

4. *Soethe V. L., Nohara E. L., Fontana L. C., Rezen-de M. C. // Journal of Aerospace Technology and Management. 2012. Vol. 3. № 3. P. 279.*

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.-А., Фитаев И. Ш., Таран Е. В., Орленсон В. Б. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 60.*

7. *Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1970.*

8. *Никольский В. В., Никольская Т. Н. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989.*

9. *Фитаев И. Ш., Старостенко В. В., Мазинов А. С., Падалинский М. М., Арсеничев С. П., Григорьев Е. В. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 340.*

10. *Mazinov A. S., Tyutyunik A. S., Gurchenko V. S., Fitaev I. Sh., Vasilchenko V. M. / 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov, 2020. С. 47–50.*

11. *Abdellaoui N., Pereira A., Novotny M., Bulir J., Fül P., Lancok J., Moine B., Pillonnet A. // Applied Surface Science. 2017. Vol. 418. P. 517.*

12. *Антонец И. В., Котов Л. Н., Голубев Е. А., Шавров В. Г., Щеглов В. И. // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 5. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.5.2*

13. *Hövel M., Gompf B., Dressel M. // Physical Review B. 2010. Vol. 81. № 3. P. 035402.*

14. *Андреев В. Г., Вдовин В. А., Пронин С. М., Хорин И. А. // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 11.*

15. *Starostenko V. V., Arsenichev S. P., Grigorjev E. V., Fitaev I. S., Mazinov A. S. // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves. – Divnomorskoe, 2021. P. 223–226.*

PACS: 41.20.Jb; 4.40.+a

Formation of metal-dielectric structures with nanometer conductive films and study of their heating under the influence of microwave fields

E. V. Grigoriev, S. P. Arsenichev, A. V. Starosek, I. Sh. Fitaev, and N. A. Boldyrev

V. I. Vernadsky Crimean Federal University
4 Prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russia
E-mail: starosekav@cfuv.ru

Received June 27, 2022

The paper presents the results of experimental studies and analysis of the heating dynamics of metal-dielectric structures with aluminum conducting films deposited by magnetron sputtering

on glass substrates exposed to powerful microwave fields. The results of modeling the mechanism of formation of inhomogeneous metallization structure and the appearance of conductivity in growing film confirmed the observed temperature extremum. That extremum is due to a maximum absorption of electromagnetic waves at approximate thickness of 5 nm, which is associated with the structure of the growing film and its corresponding mechanism of conductivity.

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-4-64-69

REFERENCES

1. G. Nimtz and Uwe Panten, *Ann. Phys. (Berlin)* **19** (1-2), 53 (2010).
2. H. Bosman, Y. Y. Lau, and R. M. Gilgenbach, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1353 (2003).
3. S. Li, Sh. Anwar, W. Lu, Zhi Hong Hang, Bo Hou, M. Shen, and Chin-Hua Wang, *AIP ADVANCES* **4** (1), 017130 (2014)
4. V. L. Soethe, E. L. Nohara, L. C. Fontana, and M. C. Rezende, *J. Aerosp. Technol. Manag.* **3** (3), 279 (2012).
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. I. V. Lebedev, *Technique and microwave devices*. V. 1. (Higher school, Moscow, 1970).
8. V. V. Nikolsky and T. I. Nikolskaya, *Electrodynamics and radio wave propagation* (Nauka, Moscow, 1989).
9. I. Sh. Fitaev, V. V. Starostenko, A. S. Mazinov, M. M. Padalinsky, and S. P. Arsenichev, *Microwave and Telecommunication Technology* **3**, 340 (2021).
10. A. S. Mazinov, A. S. Tyutyunik, V. S. Gurchenko, I. Sh. Fitaev, and V. M. Vasilchenko, in *2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*, (Saratov, 2020), p. 47–50.
11. N. Abdellaoui, A. Pereira, M. Novotny, J. Bulir, P. Fitl, J. Lancok, B. Moine, and A. Pillonnet, *Applied Surface Science* **418**, 517 (2017).
12. I. V. Antonets, L. N. Kotov, E. A. Golubev, V. G. Shavrov, and V. I. Shcheglov, *Journal of Radio Electronics* **5**, (2018). DOI 10.30898/1684-1719.2018.5.2
13. M. Hövel, B. Gompf, and M. Dressel, *Physical Review B* **81** (3), 035402 (2010).
14. V. G. Andreev, V. A. Vdovin, S. M. Pronin, and I. A. Khorin, *Journal of Radio Electronics*, No. 11 (2017).
15. V. V. Starostenko, S. P. Arsenichev, E. V. Grigorjev, I. Sh. Fitaev, and A. S. Mazinov, in *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves*, (Divnomorskoye, 2021), p. 223–226.