

УДК 537.9; 549.086; 537.86.029  
DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-5-13

**Взаимосвязь оптических коэффициентов  
сверхтонких металлических пленок и геометрических параметров  
морфологии их поверхностей**

**А. С. Мазинов**

*Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского  
Симферополь, Россия*

*Аннотация*

Приведены теоретические и экспериментальные данные по исследованию оптических коэффициентов взаимодействия электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона 2–4,5 ГГц и их взаимосвязи с толщинами проводящих плёнок на примере алюминия. Показано, что преобразование рельефа тонкопленочной структуры при увеличении объемной массы осажденного материала обуславливает увеличение шероховатости поверхности с максимумом на 7 нанометрах. Замечательным является тот факт, что именно при данных толщинах исследуемых пленок в эксперименте достигается максимум поглощения падающей электромагнитной волны. При этом теоретический расчет коэффициентов отражения, пропускания и поглощения показал максимальное поглощение падающей волны на толщинах 5 нм. Отличие экспериментальных и теоретических значений коэффициента поглощения объясняется неидеальностью геометрии сверхтонких проводящих поверхностей. Сама же пленка при толщине от 1 нм до 10 нм формируется в виде отдельных nanoостровков.

*Ключевые слова*

оптические коэффициенты, электромагнитное взаимодействие, сверхтонкие структуры, металлические пленки

*Для цитирования*

Мазинов А. С. Взаимосвязь оптических коэффициентов сверхтонких металлических пленок и геометрических параметров морфологии их поверхностей // Сибирский физический журнал. 2020. Т. 15, № 2. С. 5–13. DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-5-13

**The Interrelation between the Optical Coefficients  
of Ultrathin Metal Films and Their Geometric Parameters  
of Surface Morphology**

**A. S. Mazinov**

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University  
Simferopol, Russian Federation*

*Abstract*

The theoretical and experimental data on the study of the optical coefficients of electromagnetic waves in the super high frequency range 2–4,5 GHz and their relationship with the thickness of the conductive films by the example of aluminum are presented. It is showed that transformation of the relief of a thin-film structure with an increase in the bulk mass of the deposited material causes an increase in surface roughness with a maximum of 7 nanometers. It is worth noting that exactly for these thicknesses of the studied films the maximum absorption of the incident electromagnetic wave is experimentally achieved. Meanwhile, a theoretical calculation of the reflection, transmission and absorption coefficients showed the maximum absorption of the incident wave at a thickness of 5 nm. The difference between the experimental and theoretical values of the absorptivity is explained by the non-ideal geometry of ultrathin

conductive surfaces. At the thicknesses from 1 nm to 10 nm the film itself is formed in the form of separate nanoislands.

*Keywords*

optical coefficients, electromagnetic interaction, ultrathin structures, metal films

*For citation*

Mazinov A. S. The Interrelation between the Optical Coefficients of Ultrathin Metal Films and Their Geometric Parameters of Surface Morphology. *Siberian Journal of Physics*, 2020, vol. 15, no. 2, p. 5–13. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2020-15-2-5-13

## Введение

Стремительный прогресс микроэлектронной схемотехники во многом связан с уменьшением линейных размеров ее составляющих, а это, в свою очередь, требует более глубокого понимания физики наноразмерных структур [1]. Особое внимание при этом уделяется процессам взаимодействия электромагнитного излучения с проводящими пленками, которые не только служат токопроводящими и контактными областями интегральных микросхем, но и выполняют роль отражающих и поглощающих функциональных слоев в многослойных мультипокрытиях [2; 3]. К тому же непосредственно сами проводящие покрытия с толщиной до 10 нм могут поглощать энергию волн практически до 50 % в широком диапазоне сверхвысоких частот [4; 5].

Если же физика взаимодействия сверхвысокочастотного излучения с идеальными пленками выстроена, то в случае процессов отражения (поглощения) электромагнитных волн от (с) покрытий, осажденных на дешёвые подложки большой площадью в широкомасштабном производстве, требуется более глубокое понимание. Оптические коэффициенты отражения, прохождения и поглощения при этом могут служить достаточно информативным инструментом, отображающим взаимосвязь роста и формирования неидеальных проводящих пленок с изменениями электромагнитного потока.

## Получение образцов и микроскопия поверхности

Общий обзор теоретических и экспериментальных результатов рассматривался для серии основных материалов задействованных современной микроэлектроникой: серебро, медь, золото, платина, алюминий, титан и др. [6; 7]. Нужно заметить, что взаимодействия металлодиэлектрических структур различных материалов отличаются друг от друга в зависимости от атомарных свойств каждого из них. Однако общие закономерности их электродинамических свойств схожи, и поэтому в данной работе в качестве базовых структур рассматривались алюминиевые пленки, полученные магнетронным методом, который обеспечивает высокое качество при приемлемых технологических требованиях [8].

Экспериментальные пленки алюминия были получены на вакуумной установке комбинированного нанесения покрытий магнетронным распылением и термическим резистивным испарением «МВУ ТМ Магна ТИС-03МК» методом высокочастотного магнетронного распыления на подложки алюминиевой мишени чистотой 99,98. Первоначальная температурная, а затем ионная очистка в комбинации с вращением подложек, обеспечила равномерность нанесения покрытий.

Аргументом в выборе типа подложек являлось то, что размеры большинства объектов, требующих экранирования, составляют как квадратные дециметры, так и квадратные метры. Требования равномерности поверхности менее единиц нанометров значительно превышают стоимость технологических процессов шлифовки, особенно в промышленных условиях. Как компромиссный вариант было принято решение осажать пленки на подстилающую поверхность с неоднородностями порядка десятка нанометров, что может быть достижимо в про-

мышленных условиях. Оксид кремния как один из самых распространённых и относительно дешёвых материалов имеет приемлемые показатели шероховатости поверхности в его аморфной (стеклообразной) фазе. Поэтому выбор дешёвых стеклянных подложек для образцов, проходящих тестирование на взаимодействие с электромагнитным полем, вполне оправдан. Прямоугольные стеклянные пластины толщиной 200 мкм использовались в качестве подложек.

Каждая партия образцов была получена в отдельном технологическом цикле по нормированному времени распыления алюминиевой мишени с шагом в 2 нм до толщины 7 нм и шагом 3 нм и выше. Оценка геометрии поверхности структуры осуществлялась в несколько этапов. Первоначально равномерность покрытия контролировалась длиннофокусным микроскопом типа МССО У4.2 с дальнейшим анализом в белом свете на МИИ-4М. Оценка средне-статистической неоднородности участков пленки осуществлялась посредством анализа интерференционной картины, полученной на МИИ-4М. Выделенные при этом области до  $50 \times 50$  нм подвергались более тщательному анализу с разрешением по высоте до двух нанометров на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) NT-MDT НАНОЭДЬЮКАТОР II. Финальным этапом исследования морфологии поверхности являлось сканирование посредством СЗМ NT-MDT INTEGRA. Атомно-силовое сканирование поверхности подложки позволило более детально изучить базисный рельеф и показало, что большинство дефектов представляют собой образования с размерами основания  $2 \times 2$  мкм, со средним размахом высот  $H_q = 20 \pm 5$  нм.

Диагностика выбранной поверхности велась в каждой партии, которая оценивалась интегрально по 3D-изображениям атомно-силового микроскопа (АСМ) и статистическим данным по шероховатостям и распределению высот поверхности плёнок (рис. 1). При этом на начальном этапе роста от 1 нм пленки имеют тенденцию к монотонному уменьшению средней шероховатости  $h_q$  практически до толщины 5 нм, в то же время происходит увеличение максимальной разности высот (до 3 нм). Дальнейшее увеличение толщины приводит к незначительному росту шероховатости с максимумом на 7 нм (рис. 1, в), после чего наблюдается спад с выходом на постоянную величину [9].

### Связь оптических коэффициентов с топологией пленок

В качестве оценки взаимодействия высокочастотного излучения с тонкими пленками в интервале частот 2–4,5 ГГц были выбраны оптические коэффициенты: отражения ( $R$ ); прохождения ( $P$ ); поглощения ( $I$ ). В качестве изолирующей камеры использовалась специализированная волноводная секция с поперечным сечением  $3,4 \times 7,2$  см, с вертикальным каналом для установки образцов. Внешняя обвязка осуществлялась посредством векторного анализатора цепей серии «Панорама» P4226 от компании Микран согласно схеме (рис. 2). Режим бегущей волны обеспечивался согласованной нагрузкой  $H$  и направленными ответвителями для прошедших  $P_3$  и отраженных  $P_2$  потоков. Размер образцов  $1,5 \times 1,5$  см был выбран из расчета 10 % от площади поперечного сечения волноводной секции с целью обеспечения минимального отражения на генератор ( $I$ ).

Образцы погружались в центр волноводной камеры так, чтобы максимум электрической волны приходился на середину образца. В качестве лифт-держателя на металлической заглушке использовался диэлектрический держатель, вносящий искажения менее одного процента [10]. При этом на векторном анализаторе цепей был выбран режим измерения  $S$ -параметров, из которого посредством возведения в квадрат соответствующих элементов  $S_{11}$  и  $S_{21}$  были рассчитаны оптические коэффициенты отражения  $R$  и прохождения  $P$ .

$$R = |S_{11}|^2; \quad P = |S_{21}|^2.$$

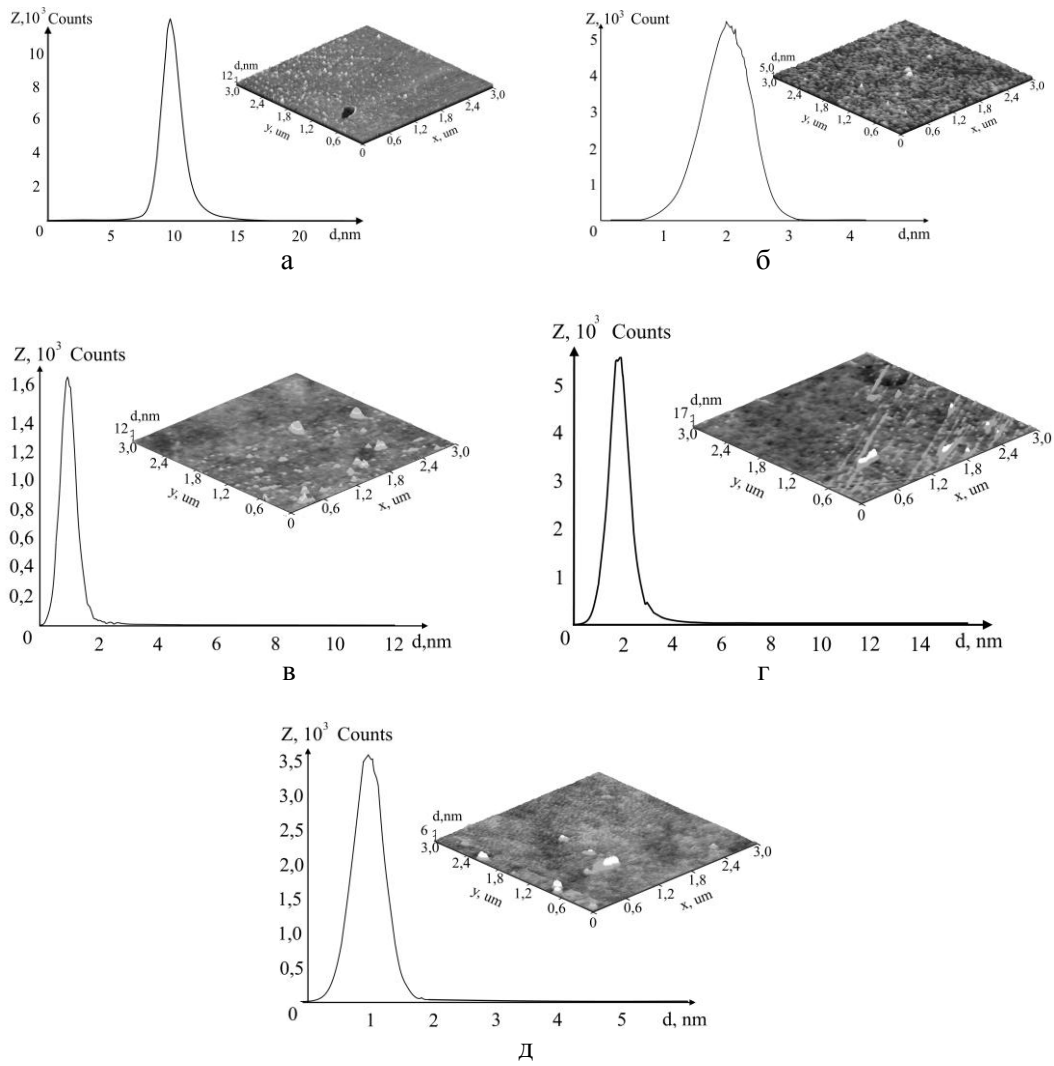


Рис. 1. Распределение высот и морфология поверхности для различных толщин алюминиевых плёнок:  
 $a$  – 1 нм;  $б$  – 3 нм;  $в$  – 5 нм;  $г$  – 7 нм;  $д$  – 10 нм

Fig. 1. Height distribution and surface morphology for various thicknesses of aluminum films:  
 $a$  – 1 nm;  $б$  – 3 nm;  $в$  – 5 nm;  $г$  – 7 nm;  $д$  – 10 nm

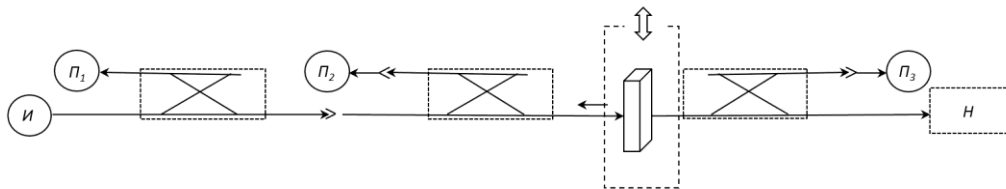


Рис. 2. Принципиальная схема определения оптических коэффициентов  
 Fig. 2. Schematic circuit for determining optical coefficients

Коэффициент поглощения был рассчитан из закона сохранения приходящих, отраженных и поглощенных мощностей:

$$A = I - R - P = I - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2.$$

Из вполне закономерных зависимостей, уменьшающегося коэффициента пропускания и возрастающего коэффициента отражения с увеличением толщины металлизации, стоит выделить нелинейную характеристику коэффициента отражения. Возрастающий коэффициент поглощения у образцов с толщиной до 7 нм обусловлен увеличением объемной доли проводящего материала, что совпадает с обнаруженным «пиком» на 7 нм, выбивающимся из закономерного монотонного «сглаживания» коэффициента шероховатости (рис. 3).

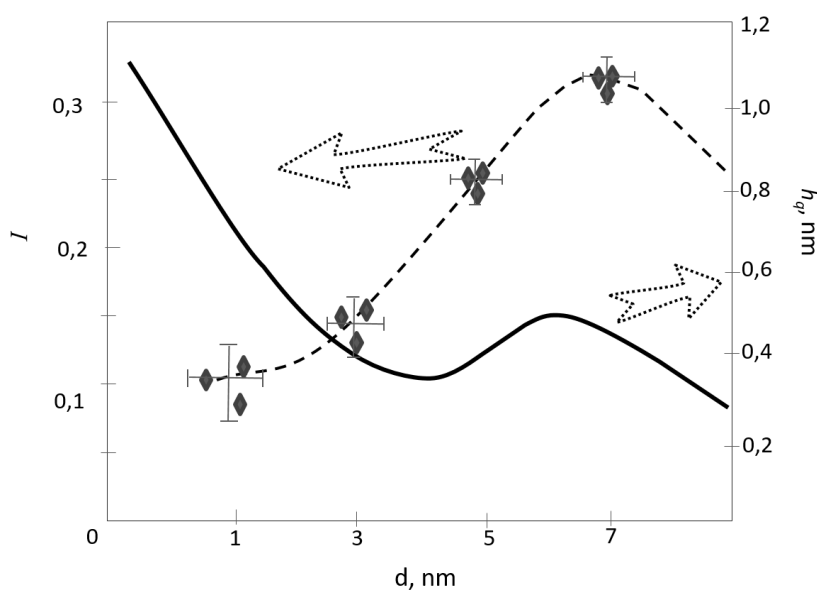


Рис. 3. Совпадение максимумов зависимостей поглощения ( $I$ ) и шероховатости поверхности ( $h_q$ ) от толщины металлических пленок

Fig. 3. Coincidence of the maxima for dependencies absorption and surface roughness from metal films thickness

Физику полученного совпадения возможно объяснить исходя из статистических данных роста пленок, полученных с помощью АСМ при соответствующей обработке. Так, следует предположить, что на начальном этапе рост пленки алюминия на стеклянной подложке происходит по механизму Фольмера – Вебера [11], т. е. при магнетронном осаждении образование сплошного покрытия соответствует механизму роста островкового типа.

Первичные зародыши формируются на участках подложки, имеющих неоднородности (углубления, возвышенности). Это объясняется тем, что атомы осаждаемого вещества способны некоторое время блуждать по поверхности подложки, пока не истратится запас их энергии или они не попадут в зону с более сильной связью атомов подложки. Подобные геометрические дефекты поверхности могут существенно повысить скорость зародышеобразования. В нашем случае имеется сложная, разветвленная геометрия подстилающей поверхности, которая обусловлена различными несовершенствами процесса полировки и шлифовки поверхности.

Именно на этих зародышах и начинает образовываться островковая топология пленки. Зародыши, увеличиваясь, превращаются в крупные агломераты конденсированной фазы [12]. И, как следствие, происходит сглаживание поверхности и уменьшение средней шероховато-

сти (рис. 4). При этом площадь основания островков растет быстрее их высоты, и, следовательно, через некоторое время островковые структуры, сливаясь, образуют различного вида каналы и пустоты. Данное утверждение также является обобщающим анализом АСМ изображений (рис. 1, а, б). Дальнейшее формирование рельефа происходит посредством заполнения пустот и создания сплошной пленки.

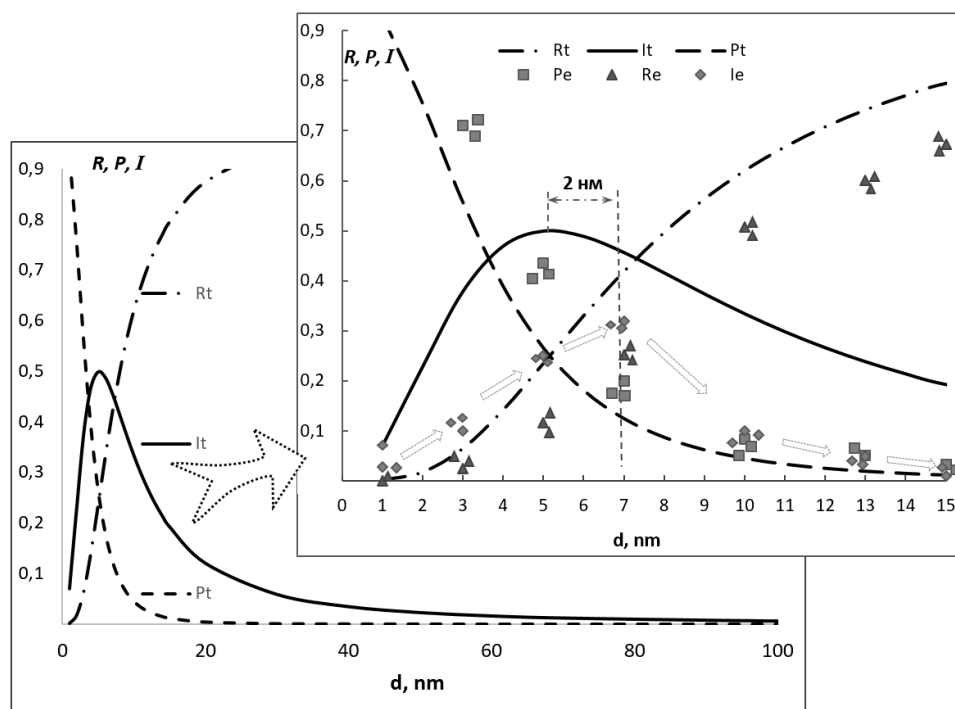


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных значений и теоретических расчетов оптических коэффициентов для различных толщин плёнок. Экспериментальные значения оптических коэффициентов  $R_e$ ,  $P_e$ ,  $I_e$  обозначены соответствующими фигурами, теоретические  $R_t$ ,  $P_t$ ,  $I_t$  – линиями

Fig. 4. Comparison the experimental values and theoretical calculations of optical coefficients for different film thicknesses. The experimental values of the optical coefficients  $R_e$ ,  $P_e$ ,  $I_e$  are indicated by the corresponding figures, the theoretical  $R_t$ ,  $P_t$ ,  $I_t$  – by the lines

Наличие начального разветвленного рельефа обуславливает то, что при формировании новой поверхности с меньшей шероховатостью на участках, где были впадины и углубления, материала больше, чем на «холмах» и возвышениях. Естественно, можно предположить, что на более тонких участках в силу рассогласованности периода атомарной решетки подложки и вновь растущей пленки остаются напряженности. Следовательно, появляются более энергетически выгодные участки для поступающих атомов осаждаемого материала. Это, в свою очередь, создает условие селективного роста нанокристаллических структур на определенных участках поверхности уже образованной металлической пленки и объясняет пик роста динамики изменения шероховатости поверхности на толщине 7 нм (см. рис. 1, в). Данные нанокристаллиты крупнее первоначальных островков, формируемых на начальном этапе роста.

Продолжение процесса осаждения материала приводит к критическому вертикальному росту нанокристаллитов, при котором начинает значительно расти его площадь, а это приводит к сглаживанию рельефа уже на всей площади и образованию сплошной пленки с минимальной шероховатостью (рис. 1, г; 3).

Параллельно теоретическое представление взаимодействия электромагнитного излучения с металлодиэлектрической структурой строилось из модельной аппроксимации тонкой проводящей пленкой, окруженной двумя бесконечными полупространствами диэлектрика. Высокочастотная волна падает по нормали к поверхности. Зависимости оптических коэффициентов от толщины плёнки определялись аналитическими выражениями модели Френеля – Эйри [13; 14]. На рис. 4 показаны зависимости оптических коэффициентов ( $R_t$ ,  $P_t$ ,  $I_t$ ) от толщины плёнки, рассчитанных для частоты от 1 до 10 ГГц. При удельной проводимости порядка  $10^6$  См/м, максимум поглощения достигается при толщине  $d = 5$  нм (см. рис. 4), в то время как при удельной проводимости для большинства кристаллических проводников более  $10^7$  См/м этот максимум сдвигается в сторону меньших толщин практически на порядок. Совпадения характерного поведения экспериментальных результатов поглощения с теоретическими расчетами (см. вкладку рис. 4) объясняется тем, что в результате напыления осажденный алюминий был аморфным, а его удельная проводимость была меньше  $10^6$  См/м.

Уменьшение и смещение пика поглощения и неполное совпадение экспериментальных результатов с теоретической моделью (см. вкладку рис. 4) объясняется тем, что данная модель предполагает наличие гладких границ проводящего слоя и проведение эксперимента в отсутствие дифракции и переизлучения на высших гармониках с учетом их поляризации [15], которая присутствовала в эксперименте.

### Заключение

В общем корреляция между максимумами коэффициента поглощения падающей электромагнитной волны и шероховатостью поверхности проводящей пленки показывает, что величиной омических потерь в сверхтонких пленках можно управлять как непосредственно технологическими процессами осаждения материала (скорость вращения подложкодержателей, ток магнетрона и т. д.), так и заданием определенной топологии поверхности исходной диэлектрической подложки с наперед подготовленной шероховатостью поверхности, которая, в свою очередь, формируется технологическими операциями (шлифовка, полировка и т. д.). Приведенные в работе экспериментальные и теоретические исследования поверхности подложки из стекла и динамика образования пленки из алюминия подтверждают данное утверждение. Стартовая геометрия определила начальный рост отдельных участков, который привел к увеличению разности высоты до 25 нм, в то время как средняя шероховатость монотонно уменьшалась до одного нанометра. Это, в свою очередь, определило совпадение максимумов поглощения и шероховатости на 7 нм, тогда как теоретические расчёты коэффициента поглощения, основанные на предположении сплошной равномерной пленки, дают корреляцию на 5 нм.

### Список литературы

1. **Emdadul Huq Minhaj, Shahara Rahman Esha, Md. Mohsinur Rahman Adnan, Tuhin Dey.** Impact of Channel Length Reduction and Doping Variation on Multigate FinFETs. In: Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE) 2018, International Conference, 2018, p. 1–4.
2. **Silva T. I., Soares K. P., Pereira I. M., Calheiros L. F., Soares B. G.** Evaluation of Epoxy Resin Composites in Multilayer Structure for Stealth Technology. *J. Aerosp. Technol. Manag.*, 2019, no. 11, Special ed., p. 37–40.
3. **Maa Y., Zhoua Y. Y., Qia C., Suna Y., Zhanga Y., Liu Y.** Microwave absorption coating based on assemblies of magnetic nanoparticles for enhancing absorption bandwidth and durability. *Progress in Organic Coatings*, 2020, no. 141, p. 105538.
4. **Nimtz G., Panten U.** Broad band electromagnetic wave absorbers designed with nano-metal films. *Ann. Phys.*, 2010, no. 19, p. 53–59.

5. **Sucheng Li, Shahzad Anwar, Weixin Lu, Zhi Hong Hang, Bo Hou, Mingrong Shen, Ching-Hua Wang.** Microwave absorptions of ultrathin conductive films and designs of frequency-independent ultrathin absorbers. *AIP advances*, 2014, no. 4, p. 017130.
6. **Антонец И. В., Котов Л. Н., Некипелов С. В., Карпушов Е. Н.** Проводящие и отражающие свойства тонких металлических пленок // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, вып. 11. С. 102–106.
7. **Андреев В. Г., Вдовин В. А.** Измерение оптических коэффициентов нанометровых металлических пленок на частоте 10 ГГц // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 11. С. 1–15.
8. **Abegunde O. O., Akinlabi E. T., Oladijo O. P., Akinlabi S., Ude A. U.** Overview of thin film deposition techniques. *AIMS Materials Science*, 2019, vol. 6 (2), p. 174–199.
9. **Старостенко В. В., Мазинов А. С., Фитаев И. Ш., Таран Е. П., Орленсон В. Б.** Динамика формирования поверхности проводящих пленок алюминия на аморфных подложках // Прикладная физика. 2019. Вып. 4. С. 60–65.
10. **Арсеничев С. П., Григорьев Е. В., Зуев С. А., Старостенко В. В., Таран Е. П., Фитаев И. Ш.** Дифракция электромагнитного излучения на тонких проводящих пленках металлодиэлектрических структур в прямоугольном волноводе // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22, № 2. С. 48–53.
11. **Коропов А. В.** Морфологическая устойчивость островков малых размеров при осаждении вещества на поверхности кристалла // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, вып. 11. С. 2093–2097.
12. **Zhigalsky G. P., Jones B. K.** The Physical Properties of Thin Metal Films. Taylor&Francis, 2003, 232 p.
13. **Горшков М. М.** Эллисометрия. М.: Сов. радио, 1973. 200 с.
14. **Fitaev I. S., Orlenon V. B., Romanets Y. V., Mazinov A. S.** Surface topologies of thin aluminum films and absorbing properties of metal dielectric structures in the microwave range. In: ITM Web of Conferences, 2019, vol. 30. DOI 10.1051/itmconf/20193008013
15. **Moharam M. G., Grann E. B., Pommet D. A.** Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, vol. 12, no. 5, p. 1068–1076.

### Reference

1. **Emdadul Huq Minhaj, Shahara Rahman Esha, Md. Mohsinur Rahman Adnan, Tuhin Dey.** Impact of Channel Length Reduction and Doping Variation on Multigate FinFETs. In: Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEED) 2018, International Conference, 2018, p. 1–4.
2. **Silva T. I., Soares K. P., Pereira I. M., Calheiros L. F., Soares B. G.** Evaluation of Epoxy Resin Composites in Multilayer Structure for Stealth Technology. *J. Aerosp. Technol. Manag.*, 2019, no. 11, Special ed., p. 37–40.
3. **Maa Y., Zhoua Y. Y., Qia C., Suna Y., Zhanga Y., Liu Y.** Microwave absorption coating based on assemblies of magnetic nanoparticles for enhancing absorption bandwidth and durability. *Progress in Organic Coatings*, 2020, no. 141, p. 105538.
4. **Nimtz G., Panten U.** Broad band electromagnetic wave absorbers designed with nano-metal films. *Ann. Phys.*, 2010, no. 19, p. 53–59.
5. **Sucheng Li, Shahzad Anwar, Weixin Lu, Zhi Hong Hang, Bo Hou, Mingrong Shen, Ching-Hua Wang.** Microwave absorptions of ultrathin conductive films and designs of frequency-independent ultrathin absorbers. *AIP advances*, 2014, no. 4, p. 017130.
6. **Antonets I. V., Kotov L. N., Nekipelov S. V., Karpushov E. N.** Conducting and Reflecting Properties of Thin Metal Films. *Journal of Technical Physics*, 2004, vol. 74, no. 11, p. 102–106. (in Russ.)



7. **Andreev V. G., Vdovin V. A.** Measurement of optical coefficients of nanometer metal films at a frequency of 10 GHz. *Journal of Radioelectronics*, 2017, no. 11, p. 1–15. (in Russ.)
8. **Abegunde O. O., Akinlabi E. T., Oladijo O. P., Akinlabi S., Ude A. U.** Overview of thin film deposition techniques. *AIMS Materials Science*, 2019, vol. 6 (2), p. 174–199.
9. **Starostenko V. V., Mazinov A. S., Fitaev I. Sh., Taran E. P., Orlenson V. B.** Forming surface dynamics of conductive aluminum films deposited on amorphous substrates. *Applied Physics*, 2019, no. 4, p. 60–65. (in Russ.)
10. **Arsenichev S. P., Grigoryev E. V., Zuev S. A., Starostenko V. V., Taran E. P., Fitaev I. Sh.** Diffraction of electromagnetic radiation on thin conductive films of metal-dielectric structures in a rectangular waveguide. *Electromagnetic waves and electronic systems*, 2017, vol. 22, no. 2, p. 48–53. (in Russ.)
11. **Koropov A. V.** Morphological stability of small islands during the deposition of matter on the crystal surface. *Solid State Physics*, 2008, vol. 50, no. 11, p. 2093–2097. (in Russ.)
12. **Zhigalsky G. P., Jones B. K.** The Physical Properties of Thin Metal Films. Taylor&Francis, 2003, 232 p.
13. **Gorshkov M. M.** Ellipsometry. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1973, 200 p. (in Russ.)
14. **Fitaev I. S., Orlenson V. B., Romanets Y. V., Mazinov A. S.** Surface topologies of thin aluminum films and absorbing properties of metal dielectric structures in the microwave range. In: ITM Web of Conferences, 2019, vol. 30. DOI 10.1051/itmconf/20193008013
15. **Moharam M. G., Grann E. B., Pommet D. A.** Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, vol. 12, no. 5, p. 1068–1076.

Материал поступил в редколлегию

Received  
03.03.2020

#### Сведения об авторе / Information about Author

**Мазинов Алим Сеит-Аметович**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики и электроники, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского (Симферополь, Россия)

**Alim S. Mazinov**, PhD, assoc. professor of the Department of Radiophysics and Electronics, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Simferopol, Russian Federation)

mazinovas@cfuv.ru