

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 621.793.182
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-92-99>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ источников магнетронного распыления для осаждения толстых слоев меди с высокой скоростью для изделий микроэлектроники

М.В. Назаренко^{1, 2, @}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² ООО «РМТ», Москва, 115230 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: m.v.makarova@list.ru

Резюме

Цели. При проектировании производственного оборудования для реализации процессов осаждения металлических пленок актуальной задачей является выбор технологических источников, которые должны обеспечивать требуемое качество (структуру, внешний вид), максимальные эффективность процесса и производительность. Однако в реальных производственных условиях сделать этот выбор сложно в связи с недостаточностью сравнительных материалов источников. Лабораторные результаты нередко отличаются от результатов на производстве. Цель работы – сравнить методы магнетронного осаждения в реальных промышленных условиях (планарном протяженном магнетроне, жидкофазном магнетроне и цилиндрическом магнетроне с вращающимся катодом), выявить их преимущества, недостатки и особенности формирования металлических пленок, проанализировать экономическую целесообразность выбора каждого из них и дать практические рекомендации выбора источника при реализации требуемого процесса.

Методы. Для осаждения пленок применены методы ионного распыления в магнетронных системах. Измерение шероховатости проводилось с помощью профилометра MarSurf PS1. Структура пленок изучалась с помощью растрового электронного микроскопа Hitachi SU1510. Толщины пленок измерялись методом рентгено-флуоресцентного анализа с помощью прибора Fisherscope X-RAY XDV-SDD.

Результаты. Рассмотрены источники магнетронного распыления для скоростного осаждения слоев металлизации в промышленных условиях. Проведено сравнение полученных образцов по критериям: скорость осаждения и сохранением требуемого качества, поверхностные дефекты, размер зерна пленки, шероховатость, равномерность осажденного слоя, эффективность осаждения (отношение металла, осажденного непосредственно на подложку, к количеству выработанного металла во время процесса). Сравнение характеристик показало, что скорость осаждения для жидкофазного магнетрона соизмерима с аналогичным параметром для цилиндрического магнетрона и превосходит примерно в 4 раза скорость для классического планарного магнетрона при сохранении единого внешнего вида образцов. Самой высокой шероховатостью и самым крупным размером зерна обладают образцы, осажденные жидкофазным магнетроном. Самой низкой эффективностью распыления обладает метод жидкофазного магнетронного распыления, который является самым дешевым.

Выводы. Выбор метода осаждения зависит от решаемой задачи. Оптимальным по стоимости, скорости осаждения и качеству осаждаемых слоев можно считать магнетрон с цилиндрическим вращающимся катодом. Жидкофазное магнетронное распыление рекомендовано использовать для дешевого скоростного осаждения, при котором нет жестких требований к внешнему виду, или в случае эксплуатации малогабаритного оборудования.

Ключевые слова: магнетрон, жидкофазный магнетрон, планарный магнетрон, цилиндрический магнетрон, осаждение металлических пленок, эффективность осаждения, производительные методы, скорость осаждения, выбор метода осаждения

• Поступила: 07.02.2022 • Доработана: 07.07.2022 • Принята к опубликованию: 22.08.2022

Для цитирования: Назаренко М.В. Анализ источников магнетронного распыления для осаждения толстых слоев меди с высокой скоростью для изделий микроэлектроники. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):92–99. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-92-99>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Comparison of magnetron sputtering systems for high-rate deposition of thick copper layers for microelectronic applications

Mariia V. Nazarenko ^{1, 2, @}

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² RMT, Moscow, 115230 Russia

@ Corresponding author, e-mail: m.v.makarova@list.ru

Abstract

Objectives. When designing production equipment for the implementation of metal film deposition processes, the selection of technological sources for providing the required quality (structure, appearance), maximum process efficiency, and productivity, poses a challenging task. Since laboratory results often differ from issues faced in production processes, this choice becomes even more difficult under real production conditions due to a lack of sources for comparison. The purpose of the present work is therefore to compare magnetron deposition methods under real industrial conditions (planar extended magnetron, liquid-phase magnetron and cylindrical magnetron with a rotating cathode), identify their advantages and disadvantages along with features of thus-formed metal films, analyze the economic feasibility of each variant, and give practical recommendations for selecting a source when implementing the described process.

Methods. Films were deposited using magnetron sputtering system. Roughness was measured using a MarSurf PS1 profilometer. The structure of the films was studied using a Hitachi SU1510 scanning electron microscope. Film thicknesses were measured by X-ray fluorescence analysis using a Fisherscope X-RAY XDV-SDD measuring instrument.

Results. Sources of magnetron sputtering for the high-rate deposition of metallization layers under industrial conditions are considered. Obtained samples were compared according to the following criteria: deposition rate while maintaining the required quality, surface defects, film grain size, roughness, uniformity of the deposited layer, deposition efficiency (the ratio of the metal deposited directly onto the substrate to the amount of metal produced during the process). A comparison of the characteristics showed that the deposition rate for the liquid-phase magnetron is commensurate with the similar parameter for the cylindrical magnetron, exceeding the rate for the

classical planar magnetron by about 4 times while maintaining the uniform appearance of the samples. The samples deposited with a liquid-phase magnetron had the highest roughness and the largest grain size. Although the cheapest method, liquid-phase magnetron sputtering achieved the lowest sputtering efficiency.

Conclusions. The choice of the deposition method depends on the problem to be solved. The rotatable magnetron system can be considered optimal in terms of cost, deposition rate, and quality of the deposited layers. Liquid-phase magnetron sputtering is recommended for low-cost high-speed deposition where there are no strict requirements for appearance, or in case of operation of small-sized equipment.

Keywords: magnetron, liquid phase magnetron, planar magnetron, rotatable magnetron, metal film deposition, deposition efficiency, productive methods, deposition rate, choice of deposition method

• Submitted: 07.02.2022 • Revised: 07.07.2022 • Accepted: 22.08.2022

For citation: Nazarenko M.V. Comparison of magnetron sputtering systems for high-rate deposition of thick copper layers for microelectronic applications. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):92–99. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-92-99>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В быстро развивающейся сфере микроэлектроники постоянно повышаются требования к создаваемым устройствам, неотъемлемой частью которых стали платы на керамическом основании с проводящим медным слоем. Медные проводящие слои на керамических подложках используются в таких устройствах, как коммутационные платы, термоэлектрические модули, силовые диоды, силовые транзисторы и интегральные схемы [1–6]. Возрастают требования к качеству и надежности изделий, их габаритам и внешнему виду, производительности и себестоимости, что, в свою очередь, изменяет требования к материалам и технологическим процессам изготовления отдельных элементов изделий. Это ведет, в т.ч. к необходимости поиска более производительных методов осаждения металлизационных покрытий (медь, алюминий, титан и др.) по сравнению с применяющимися традиционно.

Однако выбор оптимального метода затруднителен, т.к. в литературе отсутствует анализ по таким критериям сравнения, как шероховатость поверхности, размер зерна, структура поверхности, скорость осаждения, стоимость осажденного слоя.

Целью данной работы является анализ методов осаждения проводящих слоев по обозначенным выше критериям на примере медных слоев.

СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ

На сегодняшний день наиболее высокими скоростями осаждения и при этом удовлетворительным качеством осаждаемых покрытий среди методов магнетронного распыления обладают методы:

- ионного распыления в магнетронных системах с жидкой мишенью (жидкофазного магнетронного распыления, ЖФМР) [6–9] (рис. 1а);

- с протяженной планарной мишенью [10] (рис. 1б);
- с цилиндрической вращающейся мишенью [11, 12] (рис. 1в).

Под высоким качеством покрытия понимается покрытие с минимальным количеством поверхностных дефектов (капельная фаза, различные вкрапления, кратеры) и с минимальным количеством внутренних дефектов (поры), но при этом – с адгезией, достаточной для обеспечения работоспособности изделия.

В табл. 1 для сравнения приведены значения скорости осаждения описанными методами. Данные получены экспериментально. Расстояние от поверхности магнетрона до подложек – 100 мм. В качестве подложек использовался нитрид алюминия (AlN) с шероховатостью $Ra = 10$ нм.

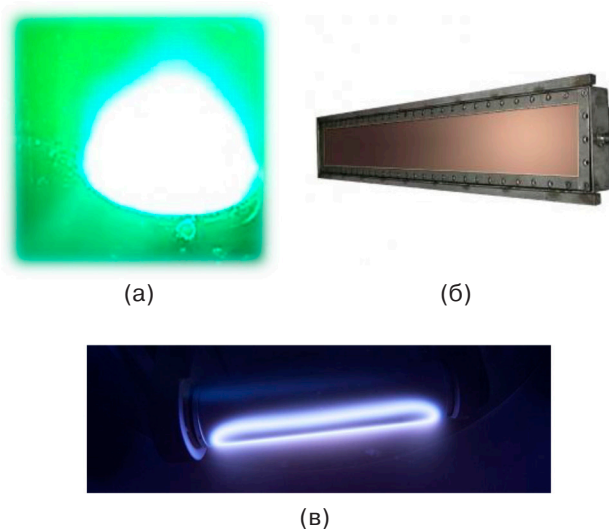


Рис. 1. Внешний вид технологических источников: (а) жидкофазный магнетрон, (б) планарный протяженный магнетрон, (в) цилиндрический магнетрон с вращающимся катодом [7]

Таблица 1. Сравнение максимально достигнутых скоростей осаждения на неподвижную подложку

Система магнетронного распыления	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
Скорость осаждения	40 мкм/мин	10 мкм/мин	41 мкм/мин

Таблица 2. Сравнение шероховатости поверхности

Номер образца	Система магнетронного распыления		
	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
1	68	31	51
2	70	28	44
3	98	26	51
4	89	29	42
Среднее значение	81	28	42

Таблица 3. Размер зерна медной поверхности

Размер зерна, мкм	Система магнетронного распыления		
	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
Минимальный	3	3	3
Максимальный	20	6	11

Для протяженного планарного магнетрона из-за его перегрева нельзя достигнуть такой же удельной мощности на катоде при сохранении необходимого качества осаждаемых пленок, как при цилиндрическом магнетроне с вращающейся мишенью. Этим объясняется такая разница в скоростях осаждения.

Как видно из табл. 1, методы осаждения с жидкой и с цилиндрической вращающейся мишенями имеют сопоставимые результаты. Классический магнетрон с протяженной планарной мишенью не обеспечивает таких высоких скоростей.

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Значения шероховатости медной поверхности (R_a , нм), которая измерялась с помощью профилометра MarSurf PS1 (Mahr GMBH, Германия), представлены в табл. 2.

Как видно, самой низкой шероховатостью обладает классический магнетрон с протяженной планарной мишенью, что объясняется невысокой скоростью осаждения. Метод с вращающейся цилиндрической мишенью имеет шероховатость в 1.5 раза выше. Метод с жидкой мишенью имеет шероховатость

почти в 4 раза выше, что может стать критичным для некоторых производственных задач [13–15]¹.

СТРУКТУРА ПЛЕНОК

Структура поверхности и размер зерна представлены на рис. 2. Исследования проведены на растровом электронном микроскопе Hitachi SU1510 (HITACHI, Япония). Размер зерна указан в табл. 3.

Самым мелким зерном обладает классическое распыление с планарной протяженной мишенью. Всего лишь в 2 раза больше размер зерна, обеспечиваемый магнетроном с цилиндрической вращающейся мишенью. Самым большим зерном обладает метод с жидкой мишенью, что говорит о высоком тепловом воздействии на подложку со стороны технологического источника. При снижении скорости осаждения на неподвижную подложку до 20 мкм/мин на магнетроне с вращающимся цилиндрическим катодом достигается размер зерна до 4 мкм, что соизмеримо с размером зерна, достигнутыми на планарном магнетроне с протяженной мишенью. Однако скорость осаждения при этом у цилиндрического магнетрона выше.

¹ Печатные платы: Справочник: в 2 кн.; под ред. К.Ф. Кумбза. М.: Техносфера; 2018. Кн. 1. 1016 с. [Pechatnye platy: Spravochnik: v 2 kn. (Printed circuit boards: Handbook: in 2 books). Moscow: Tekhnosfera; 2018. Book 1. 1016 p. (in Russ).]

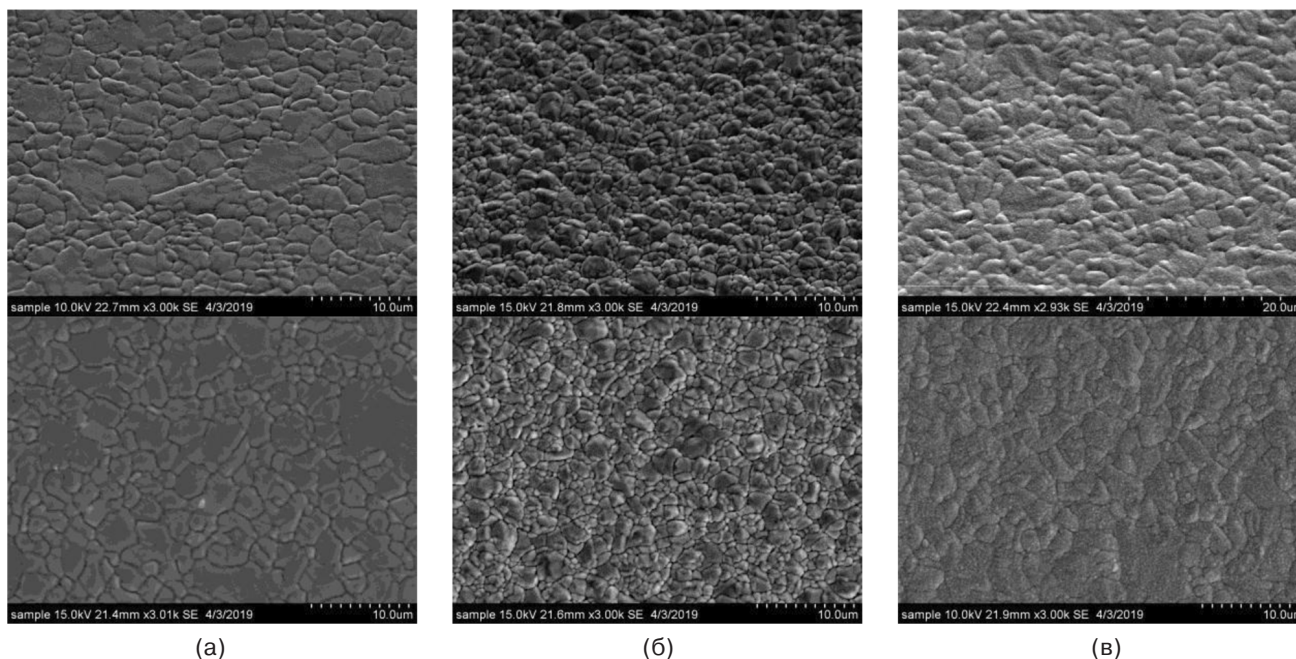


Рис. 2. Вид поверхности, осажденной с помощью: (а) метода ЖФМР, (б) планарного магнетрона с протяженной мишенью, (в) магнетрона с цилиндрической вращающейся мишенью

Таблица 4. Результаты оценки эффективности использования материала

Параметр	Система магнетронного распыления		
	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
Доля осажденного на подложки материала, %	~20	~60	~90
Выработка материала «мишеней», %	~90–100	~45	~70
Эффективность, %	20	27	63

РАВНОМЕРНОСТЬ ТОЛЩИНЫ ОСАЖДЕННОГО СЛОЯ

Измерение толщины медного покрытия проводилось на рентгенофлуоресцентном толщиномере Fisherscope X-RAY XDV-SDD (Fischer GMBH, Германия)². Сканирование проводилось в центре и по периметру подложки с отступом 3 мм от края. Оценка неравномерности показала, что методы распыления с жидкой мишенью и классический протяженный планарный магнетрон имеют неравномерность слоя не более $\pm 5\%$, в то время как магнетрон с цилиндрической вращающейся мишенью – не более $\pm 3\%$.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСПЫЛЕНИЯ

Коэффициент использования материала оценивался следующим образом: доля выработанного из мишени материала за цикл ее жизни умножалась на величину доли материала, который осаждался на подложки. Для перевода в проценты коэффициент умножен на 100%. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Как показали расчеты, наиболее эффективным по распылению является магнетрон с жидкой мишенью.

Оценка стоимости осажденного слоя толщиной 50 мкм проводилась с учетом стоимости материала и эффективности распыленного слоя (табл. 5). За базу взята средняя стоимость по рынку гранулированной вакуум-плавленной меди – X . Стоимости

² Дулов Е.Н., Ивойлов Н.Г. *Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ: учебно-методическое пособие для студентов физического факультета*. Казань: Издательство Казанского государственного университета, 2008. 50 с. [Dulov E.N., Ivoilov N.G. *X-ray spectral fluorescence analysis: teaching book for students of the Faculty of Physics*. Kazan: Kazan State University Press; 2008. 50 p. (in Russ.).]

Таблица 5. Оценка стоимости осаждения слоя толщиной 50 мкм

Параметр	Система магнетронного распыления		
	С жидкой мишенью ($\varnothing$ тигля 86 мм)	С протяженной планарной мишенью (108 × 440 мм)	С цилиндрической вращающейся мишенью (450 × $\varnothing$ 152 мм)
Максимальная нагрузка подложек в одном процессе размером 60 × 48 мм	20	70	80
Количество процессов на одной мишени, шт.	150 гр. (загрузка в виде гранул на 1 процесс)	5	40
Стоимость мишени (примерная), у.е.	1 кг – X	1 шт. – 4.5X	1 шт. – 29X
Стоимость осажденного слоя на одну подложку, у.е.	~X/131	~X/80	~X/111

планарной и цилиндрической вращающейся мишени даны в коэффициентах относительно базовой стоимости X условных единиц (у.е.).

Несмотря на низкую эффективность осаждения, самым экономически выгодным является магнетрон с жидкой мишенью в силу отсутствия необходимости изготовления мишени сложной формы. Вопреки высокой стоимости мишени за счет своей повышенной эффективности к нему близок по стоимости «осажденного слоя» магнетрон с вращающейся цилиндрической мишенью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы пленки меди, полученные методами магнетронного распыления с помощью цилиндрического магнетрона, планарного протяженного магнетрона и жидкофазного магнетрона. Проведенное сравнение методов осаждения по критериям «скорость осаждения покрытия», «структура покрытия и поверхностные дефекты», «шероховатость», «равномерность осажденного слоя», «эффективность распыления» и «экономическая целесообразность» показало, что не существует одного универсального метода, который давал бы лучшие характеристики по всем этим параметрам. Например, оптимальным по стоимости осаждения

является метод жидкофазного магнетронного распыления, относительная стоимость осажденного слоя которого составляет X/131 у.е. против X/111 у.е. в случае цилиндрического магнетронного распыления и X/80 у.е. в случае планарного протяженного магнетрона. Но при этом метод ЖФМР проигрывает цилиндрическому магнетронному распылению по критериям структуры поверхности (шероховатости, размеру зерна и поверхностным дефектам). Скорости их осаждения соизмеримы и составляют около 40 мкм/мин в описанных условиях.

При выборе метода осаждения покрытий необходимо четко понимать решаемую задачу, а именно, требования к производительности, к качеству покрытия (к структуре и дефектам), к себестоимости. Оптимальным по стоимости осажденного слоя, скорости осаждения и качеству осаждаемых слоев можно считать магнетрон с цилиндрическим вращающимся катодом. Однако из-за больших габаритов таких источников он не может быть применен для малогабаритных вакуумных камер. ЖФМР рекомендовано использовать для дешевого скоростного осаждения, в т.ч. при небольших габаритах вакуумной камеры. При кажущейся оптимальности метод осаждения с применением протяженных планарных магнетронных систем проигрывает ЖФМР и цилиндрическим магнетронам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдинцев В. Развитие мировой микроэлектроники. Новое в стратегии. Часть II. *Электроника: Наука. Технология. Бизнес*. 2008;4:108–113. URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/413>
2. Громов Г.Г. Объемные и тонкопленочные термоэлектрические модули. *Компоненты и технологии*. 2014;9(158):87–92. URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/15887.pdf>
3. Parashchuk T., Sidorenko N., Ivantsov L., Sorokin A., Maksymuk M., Dzundza B., Dashevsky Z. Development of a solid-state multi-stage thermoelectric cooler. *J. Power Sources*. 2021;496:229821. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229821>
4. Lavrentev M.G., Drabkin I.A., Ershova L.B., Volkov M.P. Improved extruded thermoelectric materials. *J. Electron. Mater.* 2020;49:2937–2942. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07988-0>
5. Dashevsky Z., Skipidarov S. Investigating the performance of bismuth-antimony telluride. In: Skipidarov S., Nikitin M. (Eds.). *Novel Thermoelectric Materials and Device Design Concepts*. 1st ed. Springer, Cham; 2019. P. 3–21. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12057-3_1
6. Moiseev K.M., Nazarenko M.V. Use of magnetron sputtering with liquid target in manufacturing of electronic components for spacecraft. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2171(1):170010. <https://doi.org/10.1063/1.5133321>
7. Макарова М.В., Моисеев К.М. Проблемы формирования толстых слоев олова методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018;1(73). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-1-1717>
8. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Юрьева А.В. Анализ возможностей магнетронных распылительных систем для высокоскоростного осаждения функциональных покрытий. *Современные технологии, экономика и образование: сборник материалов II Всероссийской научно-методической конференции*. Томск: Изд-во ТПУ; 2020. С. 51–52.
9. Kouptsov A.D., Vasiliev D.D., Sidorova S.V., Moiseev K.M. Design of a liquid-phase magnetron sputtering small-sized source for the vacuum coating system MVTU-11-1MS. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1799(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1799/1/012016>
10. Shandrikov M.V., et al. Deposition of Cu-films by a planar magnetron sputtering system at ultra-low operating pressure. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125600. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125600>
11. Agrawal S. Development of rotatable magnetron. In: *33rd National Symposium on Plasma Science & Technology (PLASMA 2018)*: Abstract Book. 2018. P. 172–173. URL: <http://www.pssi.in/documents/Abstract%20Book@Plasma%202018.pdf>
12. Gudmundsson J.T., Lundin D. Introduction to magnetron sputtering. In: *High Power Impulse Magnetron Sputtering*. Elsevier; 2020. P. 1–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812454-3.00006-1>
13. Беляков С. Сборка микросхем в России: реальность и перспективы. *Компоненты и технологии*. 2014;5:185–187. URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/154185.pdf>

REFERENCES

1. Yudin V. Global microelectronics development. New strategies. Part II. *Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes = Electronics: Science. Technology. Business*. 2008;4:108–113 (in Russ.). Available from URL: <https://www.electronics.ru/journal/article/413>
2. Gromov G.G. Volumetric and thin-film thermoelectric modules. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*. 2014;9(158):87–92 (in Russ.). Available from URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/15887.pdf>
3. Parashchuk T., Sidorenko N., Ivantsov L., Sorokin A., Maksymuk M., Dzundza B., Dashevsky Z. Development of a solid-state multi-stage thermoelectric cooler. *J. Power Sources*. 2021;496:229821. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229821>
4. Lavrentev M.G., Drabkin I.A., Ershova L.B., Volkov M.P. Improved extruded thermoelectric materials. *J. Electron. Mater.* 2020;49:2937–2942. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07988-0>
5. Dashevsky Z., Skipidarov S. Investigating the performance of bismuth-antimony telluride. In: Skipidarov S., Nikitin M. (Eds.). *Novel Thermoelectric Materials and Device Design Concepts*. 1st ed. Springer, Cham; 2019. P. 3–21. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12057-3_1
6. Moiseev K.M., Nazarenko M.V. Use of magnetron sputtering with liquid target in manufacturing of electronic components for spacecraft. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2171(1):170010. <https://doi.org/10.1063/1.5133321>
7. Makarova M.V., Moiseev K.M. The problems of thick tin layers formation by ion sputtering in magnetron systems in target vapors. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2018;1(73) (in Russ.). <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-1-1717>
8. Bleikher G.A., Krivobokov V.P., Yur'eva A.V. Analysis of the capabilities of magnetron sputtering systems for high-rate deposition of functional coatings. In: *Sovremennye tekhnologii, ekonomika i obrazovanie: sbornik materialov II Vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii (Modern Technologies. Economics and Education: Collection of materials of the Second All-Russian Scientific and Methodological Conference)*. Tomsk: TPU; 2020. P. 51–52 (in Russ.).
9. Kouptsov A.D., Vasiliev D.D., Sidorova S.V., Moiseev K.M. Design of a liquid-phase magnetron sputtering small-sized source for the vacuum coating system MVTU-11-1MS. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021;1799(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1799/1/012016>
10. Shandrikov M.V., et al. Deposition of Cu-films by a planar magnetron sputtering system at ultra-low operating pressure. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125600. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125600>
11. Agrawal S. Development of rotatable magnetron. In: *33rd National Symposium on Plasma Science & Technology (PLASMA 2018)*: Abstract Book. 2018. P. 172–173. Available from URL: <http://www.pssi.in/documents/Abstract%20Book@Plasma%202018.pdf>
12. Gudmundsson J.T., Lundin D. Introduction to magnetron sputtering. In: *High Power Impulse Magnetron Sputtering*. Elsevier; 2020. P. 1–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812454-3.00006-1>

14. Сobotka С., Херрманн Р. Интеллектуальный транспорт XXI века. *Силовая электроника*. 2010;1:12–15. URL: https://power-e.ru/wp-content/uploads/2010_1_12.pdf
15. Макарова М.В., Моисеев К.М. Свойства медных пленок, полученных методом жидкофазного магнетронного распыления. *12-я Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технологии»*: Сборник публикаций. 2017. 5 с.
13. Belyakov S. Microchip assembly in Russia: reality and prospects. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*. 2014;(5):185–187 (in Russ). Available from URL: <https://kit-e.ru/wp-content/uploads/154185.pdf>
14. Sobotka S., Herrmann R. Intelligent transport of the 21st century. *Silovaya elektronika = Power Electronics*. 2010;1:12–15 (in Russ). Available from URL: https://power-e.ru/wp-content/uploads/2010_1_12.pdf
15. Makarova M.V., Moiseev K.M. Properties of copper films obtained by liquid-phase magnetron sputtering. In: *12-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologii."* Sbornik publikatsii (*12st International Scientific and Technical Conference "Vacuum technology, materials and technologies."* Collection of publications). 2017. 5 p. (in Russ).

Об авторе

Назаренко Мария Владимировна, аспирант, кафедра нанoeлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); ведущий инженер-технолог, ООО «PMT» (115230, Россия, Москва, Варшавское шоссе, д. 46). E-mail: m.v.makarova@list.ru. SPIN-код РИНЦ 2797-9450, <https://orcid.org/0000-0003-1707-8587>

About the author

Mariia V. Nazarenko, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Leading Process Engineer, RMT (46, Varshavskoe sh., Moscow, 115230 Russia). E-mail: m.v.makarova@list.ru. RSCI SPIN-code 2797-9450, <https://orcid.org/0000-0003-1707-8587>