

Влияние охлаждения мишени на морфологию алюминиевых пленок, получаемых методом магнетронного распыления

А. Д. Белянин^{1,2}, В. В. Витько¹, И. А. Нестеров²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²АО «НПП «ЭЛАР»
bellaynin99@yandex.ru

Аннотация. Исследованы структурные свойства тонких алюминиевых пленок, осажденных методом магнетронного распыления. Изучено влияние температуры воды, протекающей через полость охлаждения магнитной системы и мишени, на качество морфологии осажденной пленки. Получено, что увеличение начальной температуры воды в охладителе от 5 °С до 10 °С приводит к уменьшению вязкости с $1.506 \cdot 10^{-3}$ Па·с до $1.304 \cdot 10^{-3}$ Па·с, что, в свою очередь, позволяет эффективнее охлаждать мишень и, как результат, осаждать пленки с более равномерной морфологией. Дополнительное улучшение охлаждения возможно с помощью изменения конфигурации полости охлаждения, что, в свою очередь, приводит к более равномерной морфологии с размером зерна в диапазоне от 200 до 253 нм.

Ключевые слова: магнетронное распыление; охлаждение мишени; объем потока воды в охладительной системе

I. ВВЕДЕНИЕ

Последние три десятилетия научное и производственное сообщества активно проводят исследования и разработки фотоприемников матричного типа. Их применяют как для считывания одномерных изображений (например, штрих-кодов), так и в системах с механической развёрткой по координате. Простейшими примерами таких систем являются телефакс и сканер. Менее очевидные применения заключаются в применении матричных фотоприемников в системах наблюдения за земной поверхностью с космических аппаратов или самолётов, в которых изображение считывается благодаря движению самого аппарата относительно Земли [1–2].

Основными технологическими операциями, необходимыми для изготовления фотоприемников матричного типа, являются: создание полупроводниковой структуры с заданной концентрацией, формирование изолирующих слоев, нанесение диэлектрического защитного слоя, фотолитография, травление, нанесение металлических контактов. Все перечисленные операции на сегодняшний день имеют производственную документацию и технологические карты. Несмотря на важность каждого процесса в совокупности операций и в частности, для неискушенного специалиста морфология напыляемой металлической пленки,

получаемой в процессе создания металлизации для контактов, как завершающего процесса изготовления прибора, может показаться не столь важным аспектом. Однако на текущем уровне полупроводниковых технологий металлические пленки становятся межслойным контактным покрытием, в свою очередь морфология пленки определяет качество сварки контактной площадки и подводящих проволочных и пленочных электродов.

Рассмотрим конкретный пример применения алюминиевой пленки в качестве контактного покрытия для кремниевых структур. На пленку алюминия в зависимости от функционального назначения могут наноситься различные топологические слои, качество которых напрямую зависит от морфологии пленки алюминия. При этом наличие крупных агломератов на поверхности алюминия, соизмеримых с толщинами последующих слоев, могут привести к ухудшению качества прибора, или полного его выхода из строя. Поэтому особенно важно отслеживать морфологию полученной пленки на этапе ее создания и снизить или исключить вероятность появления крупных образований на ее поверхности.

Для получения тонких плёнок используют разнообразные методы, такие как: метод химического осаждения из раствора, химическое осаждение из паров металлоорганических соединений, золь-гель метод, испарение и конденсация в вакууме, ВЧ-катодное распыление, ВЧ-магнетронное распыление, DC-магнетронное распыление. [3]

На предприятии АО «НПП ЭЛАР» для нанесения металлических контактов используют, в том числе и магнетронный метод распыления. При этом к металлическим покрытиям в рамках текущего производства предъявляют следующие требования:

1. Высокая адгезия к подложке и предыдущим топологическим слоям.
2. Пленка алюминия не должна негативно влиять на морфологию последующего топологического слоя.
3. Соответствующие электрофизические характеристики.
4. Свариваемость алюминиевых контактов и контактных площадок с алюминиевой проволокой, которой осуществляют контактные соединения.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант номер ФСЕЕ – 2022-0017).

Влиять на морфологию пленки и свариваемость можно током разряда, давлением рабочего газа в камере, прогревом и охлаждением камеры и оснастки, а на электрофизические характеристики – примесями в составе мишени. Управляя перечисленными технологическими параметрами, можно добиться стабильно воспроизводимого процесса напыления, а как следствие повторяемости качества напыляемых пленок алюминия. Так из [6] известно, что температура мишени приводит к укрупнению размера зерна растущей пленки.

Таким образом, одним из перспективных способов уменьшения размера зерна пленки (улучшения морфологии) является создание эффективного теплоотвода от мишени в процессе распыления. Конструкция магнетрона, используемая на предприятии, существовавшая на период начала работы, не позволяла эффективно отводить тепло от мишени, и тем самым достичь требуемой морфологии получаемых алюминиевых пленок.

В литературных источниках, известных авторам, слабо отражены вопросы влияния охлаждения мишени магнетрона с точки зрения термического воздействия поверхности мишени, с которой идет распыление, на морфологию растущей на подложке пленке. Однако, авторам удалось найти работы по исследованию влияния температуры воды и протока воды через полость охлаждения, в которой расположена магнитная система, на стабильность ее работы и воспроизводимость параметров магнитного поля [4–5]. При этом авторы описанных работ, фокусируются на вопросах деградации магнитной системы при недостаточном охлаждении, а не на результате в виде осаждаемых пленок.

Поэтому целью данной работы является исследование влияния температуры воды, протекающей через полость охлаждения магнитной системы и мишени на качество морфологии осаждаемых пленок.

II. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

ОХЛАЖДЕНИЯ МАГНЕТРОННОГО УЗЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОХЛАДИТЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

На момент начала работы, был отработан технологический процесс при начальной температуре воды в системе охлаждения – 5 °С. Известно, что при увеличении температуры воды уменьшается ее вязкость, что в свою очередь уменьшает сопротивление системы при протоке воды по трубопроводу [7]. На основе этой информации была проведена серия экспериментов, целью которых было выявление зависимости протока воды в системе охлаждения от начальной температуры охладителя. Результаты экспериментов будут представлены ниже в табл. 4.

Важно отметить, что основная часть первоначальной мощности бомбардирующих ионов (порядка 80 %) идет на нагрев мишени, поэтому мишени требуют постоянного охлаждения. Мощность, которая затрачивается на распыление мишени, составляет порядка 5 %, а остальная часть мощности тратится на внедрение ионов в мишень, на её радиационные повреждения, вторичную электронную эмиссию, обратное рассеивание ионов и электромагнитные излучения [8]. Поэтому необходимо контролировать температуру нагрева мишени в процессе напыления.

Было проведено численное моделирование процесса охлаждения магнетронного узла при изменении начальной температуры охлаждающей жидкости. Параметры расчета для удобства представлены в табл. 1. Значения для выполнения расчета

ТАБЛИЦА I. ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТА.

Мощность разряда P , Вт	2000	Диаметр мишени D , м	$180 \cdot 10^{-3}$
Теплоемкость воды c_w , Дж/кг·К	4200	Объем мишени $V_{tar} = \pi \cdot D^2 \cdot h / 4$, м ³	$3.563 \cdot 10^{-4}$
Теплоемкость алюминия c_{al} , Дж/кг·К	930	Плотность алюминия ρ_{al} , кг/м ³	2700
Время t , с	60	Масса мишени m_{tar} , кг	0.962
Комнатная температура t_{com} , К	296	Высота мишени h , м	$14 \cdot 10^{-3}$

Как описывалось выше, на нагрев мишени идет порядка 80 % мощности бомбардирующих ионов. Поэтому, тепловая энергия, передаваемая мишени от блока питания, определяется следующим образом:

$$Q_p = 0.8 \cdot P \cdot t = 0.8 \cdot 2000 \cdot 60 = 9.6 \cdot 10^4 \text{ Дж} . \quad (1)$$

Чтобы определить температуру нагрева мишени решим тепловую задачу, сформулированную следующим образом: получим на сколько градусов нагревается мишень за 1 минуту.

$$Q_{tar} = c_{al} m_{tar} (x - t_{com}) , \quad (2)$$

где $Q_{tar} = Q_p$ – теплота, идущая на нагрев мишени, а x – температура, до которой нагревается мишень.

$$x = Q_{tar} / (c_{al} m_{tar}) + t_{com} = 403.315 \text{ } ^\circ\text{C} , \quad (3)$$

тогда из уравнения (2) разница температур равняется $\Delta t = x - t_{com} = 107.315 \text{ } ^\circ\text{C}$. Результаты расчета температур нагрева мишени для различных начальных температур охлаждающей жидкости представлены в табл. 3 для дальнейшего сравнения.

Теперь рассчитаем вязкость воды, которая зависит от температуры [7]:

$$\eta(T) = \eta_0 \exp \left(a \cdot p + \frac{E - b \cdot p}{R(T + 273) - \theta - c \cdot p} \right) . \quad (4)$$

При значениях постоянных величин $E = 4.753$ кДж/моль, $\eta_0 = 2.4055 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\theta = 139.7$ К, $a = 4.42 \cdot 10^{-4}$ 1/Бар, $b = 9.565 \cdot 10^{-5}$ кДж/моль·Бар, $c = 1.24 \cdot 10^{-2}$ К/Бар. Расчетные значения вязкости воды для случая, представленного в табл. 1, приведены в табл. 2

ТАБЛИЦА II. Вязкость воды при различных температурах

Начальная температура охладителя T , °С	Вязкость воды, Па·с
5	$1.506 \cdot 10^{-3}$
7	$1.42 \cdot 10^{-3}$
10	$1.304 \cdot 10^{-3}$

Рассчитаем поток воды через полость охлаждения по следующей формуле:

$$J_{chil}(T) = \frac{\Delta P \pi r^4}{8\eta(T)l} \quad (5)$$

где $\Delta P = 2 \cdot 10^5$ Па, $r = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 1.5$ м, тогда для начальной температуры $5^\circ\text{C} - J_{chil} = 2.815 \cdot 10^{-3}$ м³/с, $7^\circ\text{C} - J_{chil} = 2.986 \cdot 10^{-3}$ м³/с, $10^\circ\text{C} - J_{chil} = 3.253 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Тогда масса воды, проходящая за 1 секунду через полость охлаждения равна:

$$m(T) = J_{chil}(T) \rho_v \quad (6)$$

Для начальной температуры $5^\circ\text{C} - m = 2.815$ кг, $7^\circ\text{C} - m = 2.986$ кг, $10^\circ\text{C} - m = 3.253$ кг.

Теперь рассчитаем энергию, которую не отводит охлаждающая жидкость, известно, что при работе магнетрона вода за 1 минуту напыления на практике, при стартовой температуре охлаждающей жидкости 7°C , успевает нагреться на 0.8°C .

$$Q_{ква}(T) = c_v m(T) \Delta t \quad (7)$$

Рассчитаем на сколько градусов нагревается вода за 1 минуту напыления.

$$Q_a(T) = c_v m(T) \Delta T \quad (8)$$

Из уравнения (8) были получены величины изменения температуры охлаждающей жидкости ΔT при различных начальных температурах. Результаты расчета приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА III. ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ВОДЫ И МИШЕНИ

Начальная температура охлаждающей жидкости $T, ^\circ\text{C}$	Изменение температуры охлаждающей жидкости $\Delta T, ^\circ\text{C}$	Температура, до которой нагревается мишень $x, ^\circ\text{C}$
5	0.848	403.315
7	0.8	389.294
10	0.734	388.044

Видно, что увеличение начальной температуры охлаждающей жидкости приводит к уменьшению ΔT . Следуя уравнению (3), при увеличении начальной температуры охлаждающей жидкости температура x , до которой нагревается мишень, уменьшается. Таким образом, расчеты показали, что для уменьшения температуры мишени во время процесса магнетронного распыления необходимо увеличить начальную температуру охлаждающей жидкости.

Для удобства сравнения экспериментальные данные и рассчитанные значения потока протекания воды в охлаждающей полости магнетрона были сведены в табл. 4. При расчетах в модели была учтена простая форма полости охлаждения магнетрона. Несмотря на это упрощение видно, что полученные в результате расчета данные хорошо согласуются с экспериментальными.

ТАБЛИЦА IV. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И РАСЧЕТА

Начальная температура охлаждающей жидкости $T, ^\circ\text{C}$	Эксперимент. Поток протекания воды в охлаждающей полости магнетрона, $v, \text{л/мин}$	Расчет. Поток протекания воды в охлаждающей полости магнетрона, $v, \text{л/мин}$
5	2.900	2.815
7	3.200	2.986
10	3.700	3.253

Используемая в расчете модель позволяет адекватно описывать процесс охлаждения мишени и позволяет оценить температуру мишени во время процесса напыления.

III. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследования влияния охлаждения мишени на морфологию алюминиевой пленки, полученной методом магнетронного распыления, была проведена серия экспериментов. В соответствии с моделированием были выбраны следующие параметры режима таковы: Ток прогрева 3.75A , время прогрева 30 мин, время охлаждения 30 минут, время отжига после напыления 15 мин, ток разряда 4 A , напряжение разряда 500 В , мощность разряда 2000 Вт , время напыления $7+4+8$ минут, толщина алюминия 0.7 микрон, 4 минуты – это время охлаждения мишени после цикла напыления в течение 7 минут, при давлении $P = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-2}$ Па в камере, регистрируемом вакуумметром в месте его установки в процессе работы магнетрона. Расстояние мишень подложка – 10 см.

Изготовленные пленки были переданы на исследование сканирующим электронным микроскопом (СЭМ). Исследование проводилось на установке MIRA 3 TESCAN со следующими параметрами: ускоряющее напряжение 15 кВ , поле зрения 4 мкм , рабочее расстояние 7 мм . Изображения, полученные на СЭМ при начальных температурах $5, 7, 10^\circ\text{C}$, представлены на рис. 1–3.

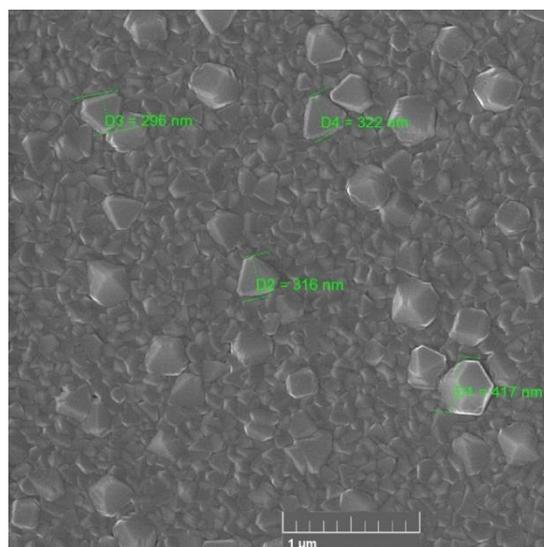


Рис. 1. Морфология пленки алюминия при начальной температуре $T = 5^\circ\text{C}$

Морфология пленки при начальной температуре воды в 5°C , имеет хаотичное расположение и большие размеры зерен. Которые не удовлетворяют требованиям предприятия.

Как было показано в моделировании при увеличении начальной температуры воды увеличивается поток протекающей воды, что позволяет охлаждать до более низких температур. Что в свою очередь позволило получить пленку с меньшими размерами зерен (рис. 2). Однако это еще не удовлетворяет требованиям предприятия.

Дальнейшее увеличение начальной температуры воды в охладителе требует большего нагрева (рис. 3). Что в свою очередь нецелесообразно.

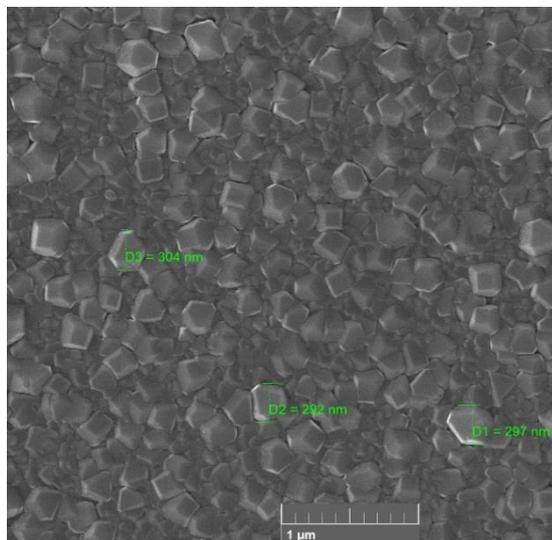


Рис. 2. Морфология пленки алюминия при начальной температуре $T=7^{\circ}\text{C}$

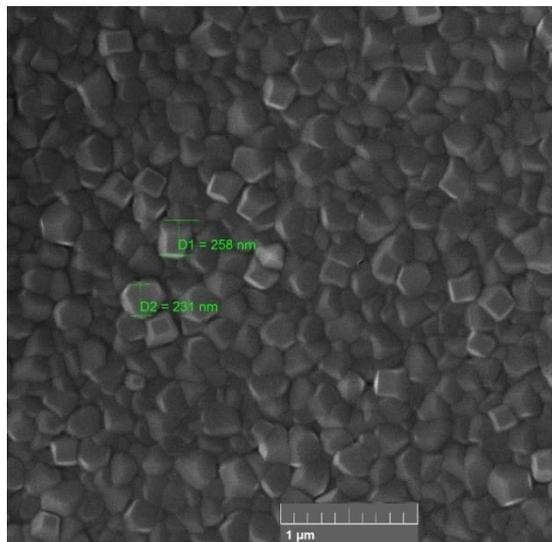


Рис. 3. Морфология пленки алюминия при начальной температуре $T=10^{\circ}\text{C}$

ТАБЛИЦА V. РАЗМЕРЫ ЗЕРЕН ПРИ РАЗЛИЧНОЙ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОДЫ

Начальная температура воды, $^{\circ}\text{C}$	Минимальный размер зерна, нм	Максимальный размер зерна, нм
5	295	417
7	292	304
10	231	258

Из результатов напыления видно, что, увеличив начальную температуры воды в охладителе на 2 и 5 $^{\circ}\text{C}$, минимальные и максимальные размеры кристаллитов уменьшились в среднем на 64 нм и 159 нм

соответственно. Проведенный эксперимент показал одну из возможностей существенного улучшения морфологии получаемых пленок алюминия.

Дополнительным способом улучшения морфологии является разработка магнетрона с другой конфигурацией полости охлаждения. Для этого был изготовлен новый корпус магнетрона, который представлен на рис. 4. Цель изменений заключалась в увеличении внутренней полости магнетрона, где расположена магнитная система, которая ограничена самой мишенью. Токарной обработкой, зазоры были увеличены на 4 мм по диаметру корпуса магнетрона. Таким образом, зазор между корпусом магнитной системы и внутренним диаметром полости магнетрона, был увеличен на 2 мм с каждой стороны. Так же был расширен диаметр стержня на 5 мм.

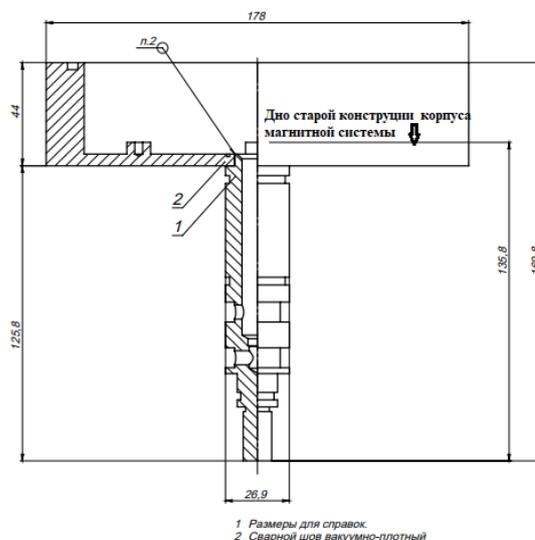


Рис. 4. Чертеж разработанного корпуса магнитной системы

Новая конструкция корпуса магнитной системы позволила увеличить проток воды до 5 л/мин.

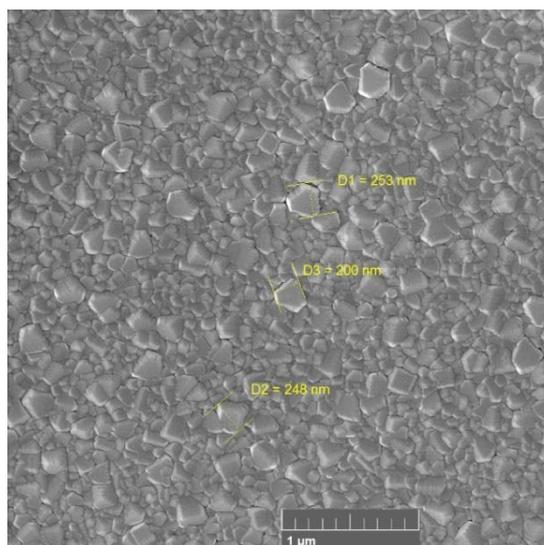


Рис. 5. Морфология пленки при новой системе охлаждения

Из результатов напыления видно (рис. 5), что при замене системы охлаждения на новую, минимальные и максимальные размеры кристаллитов уменьшились в среднем на 5 нм и 31 нм соответственно.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были определены наилучшие температура 10°C и проток охлаждающей жидкости (воды) 3.253 л/мин через полость охлаждения магнитной системы и мишени магнетрона. Как показали полученные результаты, выбранный режим газового разряда (мощность), позволил практически не брать в расчет охлаждение магнитной системы и сосредоточиться непосредственно на охлаждении мишени.

Так же было выявлено, что увеличение начальной температуры жидкости в охладителе приводит к увеличению протока воды в полости охлаждения магнетрона. Из-за его происходит охлаждение мишени до более низких температур, что способствует получению пленки с более равномерной морфологией и меньшим размером зерна.

По итогу выполнения работы, выяснилось, что влияние теплового поля мишени магнетрона в процессе распыления существенно влияет на морфологию растущей пленки. Тем не менее, проведенное численное моделирование охлаждения магнетрона в соответствии с которым, были подобраны параметры процесса распыления, позволили удовлетворить требованиям высокой адгезии, соответствующие электрофизические свойства, свариваемость алюминиевых контактов и контактных площадок с алюминиевой проволокой, которой осуществляют контактные соединения. Так же практически полностью удовлетворялось требование, что пленка алюминия не должна негативно влиять на морфологию последующего топологического слоя, но не в полной мере.

Принято решение доработать конструкцию корпуса магнетрона с точки зрения улучшения охлаждения мишени. Взяв за основу имеющийся ранее корпус

магнетрона, мы уменьшили толщину металла на дне корпуса и увеличили внутренний диаметр штока магнетона, через который осуществляется ввод и вывод охлаждающей жидкости. Таким образом был увеличен проток воды через полость охлаждения мишени. Примененное решение позволило увеличить проток воды через магнетрон на 1.3–1.4 л/мин и довести его до 4.5–4.8 л/мин до начала работы магнетрона при температуре воды 10°C (против 3.5–3.6 л/мин в старой конструкции), и до 5.6–5.8 л/мин (против 4.4–4.8 л/мин до доработки) в процессе работы магнетрона, когда за счет нагрева воды в охладителе уменьшается ее вязкость и проток увеличивается. Новая конструкция магнетрона позволила полностью удовлетворить требование к морфологии пленки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лазовский Л. Приборы с зарядовой связью: прецизионный взгляд на мир. СПб.: АВТЭКС. 2008.
- [2] Пресс Ф.П. Фотоувствительные приборы с зарядовой связью. Радио и связь, 1991. 264 с.
- [3] Антоненко С.В. Технология тонких пленок: учебное пособие. М.: МИФИ. 2008. Т. 64. 104 с.
- [4] Omar A.A. et al. Effect of cooling system design on the heat dissipation of the magnetron sensitive components with rectangular target during sputtering by Ar+ // *Results in Engineering*. 2022. Т. 16. С. 100696.
- [5] Bardineshin S., Amrollahi R., Sadeghi H. Design and Simulation of a Water-Cooling System for a Magnetron with 2.45 GHz Frequency and 1 KW Power // *Journal of Nuclear Research and Applications*.
- [6] Трофимов В.И., Осадченко В.А. Рост и морфология тонких пленок. М.: Энергоатомиздат (1993). 325 с.
- [7] Лихачев Е.Р. Зависимость вязкости воды от температуры и давления // *Журнал технической физики*, 2003, том 73, вып. 4. С. 135-136.
- [8] Кузьмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы. Книга 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. 2008. К.: Аверс, 244 с.