








А.М. Жукешов* , А.Т. Габдуллина , М. Мухамедрыскызы ,
М.И. Пшиков , А.У. Амренова , Ж.М. Молдабеков ,
У. Абдыбай 

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: zhukeshov@physics.kz

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ МЕДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

Работа посвящена исследованию структуры слоев металлов, осажденных из плазмы вакуумной дуги. В условиях высоких градиентов температурных полей и плотности термической плазмы дуги, покрытия формируются с неоднородной структурой, пористые, с каплями металла на поверхности. Исследование слоев металлов, осажденных из термической плазмы, актуально в связи необычными свойствами и своеобразной структурой этих покрытий. Цель нашего исследования проследить эволюцию структуры покрытия из меди, осажденного из плазмы вакуумной дуги при импульсном режиме работы. Особенность метода в том, что импульсный режим предполагает малое энергопотребление, поэтому он более экономичный, чем стационарная дуга, однако характерные физические особенности дуговой плазмы сохраняются. Практической целью является осаждение тонкого слоя из меди на алюминии для применения в энергетике. В результате опытов, за время осаждения 15–40 мин наблюдали процесс существенного уплотнения слоя меди на поверхности алюминиевых подложек. Проведен анализ влияния времени осаждения на размер поверхностных дефектов. До 30 мин осаждения в покрытии наблюдали формирование высокодисперсной структуры из наноразмерных сферических образований, после 30 мин трансформацию структуры покрытия в толстый слой с высокой однородностью. Такое поведение может быть объяснено изначально формированием покрытия слоями из наноразмерной пыли. При изменении температуры подложки происходит укрупнение и распад кластеров, сопровождающих фазовые переходы. Сопутствующим нежелательным фактором наблюдали выделение фаз оксидов металлов. Развитие данного направления исследований необходимо в связи с тем, что в импульсных дугах достигается высокая скорость осаждения слоев, поэтому необходимо улучшать свойства покрытий, развивая данный метод.

Ключевые слова: вакуумная дуга, импульсный режим, металлическое покрытие, микроструктура, дефекты.

A.M. Zhukeshov*, A.T. Gabdullina, M. Mukhamedryskyzy,
A.U. Amrenova, Zh.M. Moldabekov, U. Abdybai

Al-Farabi Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: zhukeshov@physics.kz

Evolution of the structure of copper coatings deposited from pulse vacuum arc plasma

The work is devoted to the study of the structure of metal layers deposited from vacuum arc plasma. Under conditions of high gradients of temperature fields and thermal plasma density of the arc, coatings are formed with a non-uniform structure, porous, with drops of metal on the surface. The study of metal layers deposited from thermal plasma is relevant due to the unusual properties and unique structure of these coatings. The purpose of our study is to trace the evolution of the structure of a copper coating deposited from the plasma of a vacuum arc in a pulsed operating mode. The peculiarity of the method is that the pulsed mode involves low energy consumption, so it is more economical than a stationary arc, however, the characteristic physical features of arc plasma are preserved. The practical goal is to deposit a thin layer of copper on aluminum for energy applications. As a result of the experiments, during the deposition time of 15–40 minutes, a process of significant compaction of the copper layer on the surface of the aluminum substrates was observed. The influence of deposition time on the size of surface defects was analyzed. Before 30 min of deposition, the formation of a highly dispersed nanosize structure of

spherical clusters was observed in the coating; after 30 min, the transformation of the coating structure into a thick layer with high homogeneity was observed. This behavior can be explained by the initial formation of a coating of layers of nano-sized dust. When the substrate temperature changes, nanoscale clusters enlarge and disintegrate, accompanying phase transitions. An accompanying undesirable factor was the precipitation of metal oxide phases. The development of this area of research is necessary due to the fact that in pulsed arcs a high rate of layer deposition is achieved, therefore it is necessary to improve the properties of coatings by developing this method.

Key words: vacuum arc, pulse mode, metal coating, microstructure, defects.

А.М. Жукешов*, А.Т. Габдуллина, М.Мұхамедрысқызы,
А.У. Амренова, Ж.М. Молдабеков, Ұ.Әбдібай

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан
*e-mail: zhukeshov@physics.kz

Импульстік вакуумдық доғалық плазмадан тұндырылған мыс жабындарының құрылымының эволюциясы

Жұмыс вакуумдық доғалық плазмадан тұндырылған металл қабаттарының құрылымын зерттеуге арналған. Температуралық өрістердің жоғары градиенттері әсерінен және тығызды доғаның термиялық плазмалық жағдайында біркелкі емес құрылымды, кеуекті, бетінде металл тамшылары бар жабындар түзіледі. Термиялық плазмадан тұндырылған металл қабаттарын зерттеу осы жабындардың ерекше қасиеттері мен бірегей құрылымына байланысты өзекті болып табылады. Біздің зерттеуіміздің мақсаты импульстік жұмыс режимінде вакуумдық доғаның плазмасынан тұндырылған мыс жабынының құрылымының эволюциясын бақылау болып табылады. Әдістің ерекшелігі мынада: импульстік режим аз энергия тұтынуды қамтиды, сондықтан ол стационарлық доғаға қарағанда үнемді, алайда доғалық плазманың тән физикалық ерекшеліктері сақталады. Тәжірибелердің нәтижесінде 15-40 минут тұндыру уақытында алюминий астарларының бетінде мыс қабатының айтарлықтай тығыздалу процесі байқалды. Шөгудің уақытының беттік ақаулардың мөлшеріне әсері талданған. Тұндырудан 30 минут бұрын қаптамада нанолшемді жоғары дисперсті сфералық құрылымының түзілуі байқалды, 30 минуттан кейін жабын құрылымының біртектілігі қалың қабатқа айналуы байқалды. Бұл әрекетті нано өлшемді шаң қабаттарының жабынының бастапқы қалыптасуымен түсіндіруге болады. Астар температурасы өзгерген кезде нанолшемді кластерлер фазалық ауысулармен бірге ұлғаяды және ыдырайды. Ілеспе жағымсыз фактор металл оксиді фазаларының тұндыру болды. Зерттеудің бұл саласын дамыту импульстік доғаларда қабаттың шөгудің жоғары жылдамдығына қол жеткізілетіндіктен қажет, сондықтан бұл әдісті дамыту арқылы жабындардың қасиеттерін жақсарту қажет.

Түйін сөздер: вакуумдық доға, импульстік режим, металл жабыны, микроқұрылым, ақаулар.

Введение

Неоднородные по структуре и составу слои металлов микронной и субмикронной толщины, осажденные из плазмы вакуумной дуги, с одной стороны, являются интересным объектом для исследований, поскольку часто содержат внутренние напряжения, как следствие, искажения в структуре. Почти всегда слои материалов, осажденные из термической плазмы, содержат инородные включения или дефекты. Исследование структурных неоднородностей в термически напряженных покрытиях, эволюции их формирования сейчас активно изучаются [1]. С другой стороны, предложено много вариантов использования на практике осажденных слоев металлов, от плотных защитных слоев до полых мембран, но в нашем случае практической

целью является осаждение проводящего слоя из меди для применения в энергетике, так как скорость напыления в дуговых системах достаточно высокая [2].

Источник термической плазмы – дуговой разряд, формируемый в глубоком вакууме и развивающийся в парах материала электрода, эмитируемого из так называемых катодных пятен. Плотность тока в катодных пятнах достигает 10^6-10^7 А/см², а плотность энергии по разным оценкам – от 10^5 до 10^8 Вт/см² [3, 4]. Таким образом, в области катод – плазма – высокий вакуум, формируются слои с весьма высокими энергетическим и плотностным градиентом. Вследствие этого, на установках вакуумной дуги можно осаждают слои из всех токопроводящих материалов, включая тугоплавкие металлы, а также

углерод. Продукты эрозии покидают торцевую поверхность испаряемого электрода в виде высокоскоростных струй. Струи содержат паровую, ионизованную и пылевую компоненты [5-7]. Последняя компонента может содержать микрокапли с поперечными размерами до нескольких микрон. Хотя относительная доля капель в струе невелика (порядка 1%), их попадание на подложку нежелательно, т.к. в этом случае нарушается однородный микрорельеф поверхности наносимой пленки и снижает ее качество. Магнитная сепарация ионного потока от капель это отдельный технический вопрос актуальный в дуговых установках.

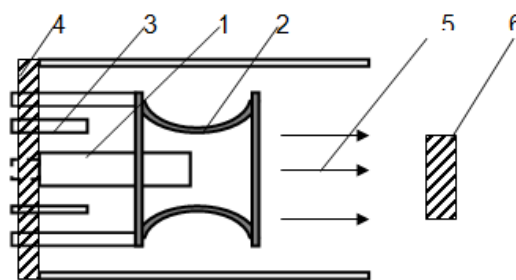
Цель данного исследования проследить эволюцию структуры покрытия из меди, осажденного из плазмы вакуумной дуги при импульсном режиме работы. Особенность метода в том, что импульсный режим предполагает весьма малое энергопотребление, поэтому он более экономичный, чем стационарная дуга, однако характерные физические особенности дуговой плазмы сохраняются.

Методы и материалы

Конструкция лабораторной установки ВДУ-1 предусматривает возможность как непрерывного, так и импульсного режима горения дуги с частотой 0,5-50 Гц. Основной разряд дуги формируется между катодом и анодом (в качестве одного из этих электродов может использоваться корпус установки). Зажигание дугового разряда обеспечивается кратковременной подачей высоковольтного пробойного импульса ~ 10 кВ. Под действием тока пленка на катоде испаряется и ионизируется в зоне поджига. После зажигания разряд с поджигающего электрода 3 переходит в основной разряд между катодом 1 и анодом 2 (в соответствии с рисунком 1).

В импульсном режиме с низкой периодичностью 2-10 Гц разрядный ток невелик, порядка нескольких ампер, мощность не превышает 1 кВт [8]. На используемом в установке водоохлаждаемом («холодном») катоде дуга представляется в виде серии катодных пятен, перемещающихся по его торцевой поверхности со скоростью порядка 10^2 м/с, что позволяет катоду оставаться в целом холодным, несмотря на высокую плотность энергии, сосредоточенной в пятне. Во вре-

мя работы катод полностью эродирует по всей поверхности.



1 – катод; 2 – анод; 3 – электрод поджига;
4 – изолятор; 5 – поток плазмы; 6 – изделие

Рисунок 1 – Конструкция электродной части ВДУ-1

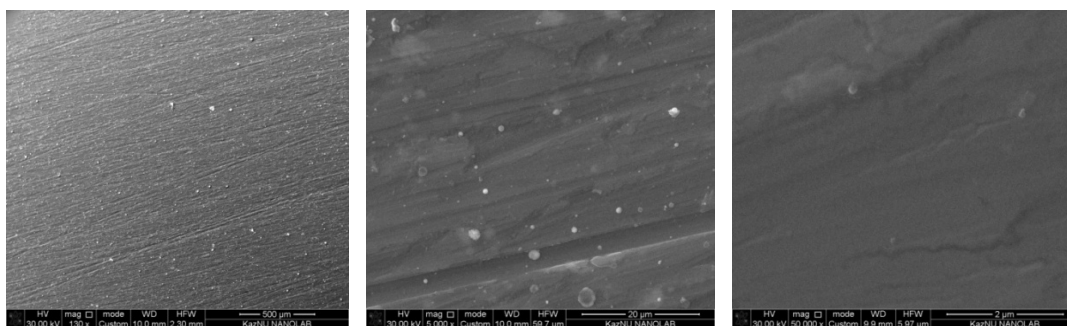
В катоде использовали техническую медь 99%, диаметр катода 5 мм, высота 12 мм. Подложки для осаждения изготовили из дюралюминия МГ в виде пластин 20*30*2 мм. Время напыления изменяли 15 до 40 минут. Уровень вакуума менялся (10^{-5} - 10^{-6}) Па в процессе работы установки.

После напыления на подложки при разных промежутках времени исследована микроструктура покрытий. Топография поверхности изучалась на сканирующем электронном микроскопе Quanta 3D 200i, рентгеноспектральный анализ элементного состава проводился анализатором Pegasus 2000 (аналитическое оборудование Национальной нанолaborатории открытого типа).

Результаты

Далее показаны изображения поверхности подложек № 1-6 полученные на сканирующем электронном микроскопе с установленным разрешением 500 мкм, 20 мкм и 2 мкм.

Поверхность образца №1 показана на рисунке 2. Время напыления – 15 минут. Покрытие пылевое – это нанопыль (рисунок 2 в), так как видна структура, но размеры точно определить трудно, это менее 100 нм. На рисунке 2 б прослеживается наличие капель металла. Капли металла, очевидно, попадают из эродирующего катода, однако их количество небольшое, а их размеры достаточно малы, порядка 1-2 мкм.

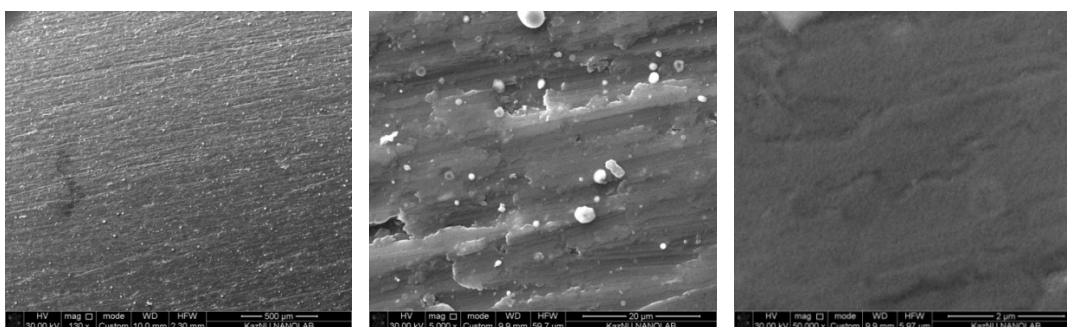


а) б) в)

а – разрешение 500 мкм, б – разрешение 20 мкм, в – разрешение 2 мкм
Рисунок 2 – Топография поверхности. Время напыления – 15 минут

Поверхность образца №2 показана на рисунке 3. Время напыления – 20 минут. Покрытие достаточно толстое. На самой поверхности наблюдается формирование слоев. Здесь уже более четко вид-

на пылевидная структура (рисунок 3 в). Обладает плохой адгезией, но покрытие достаточно равномерное. Капли металла здесь покрупнее до 5 мкм, мелкие остаются под нарастающим слоем пыли.



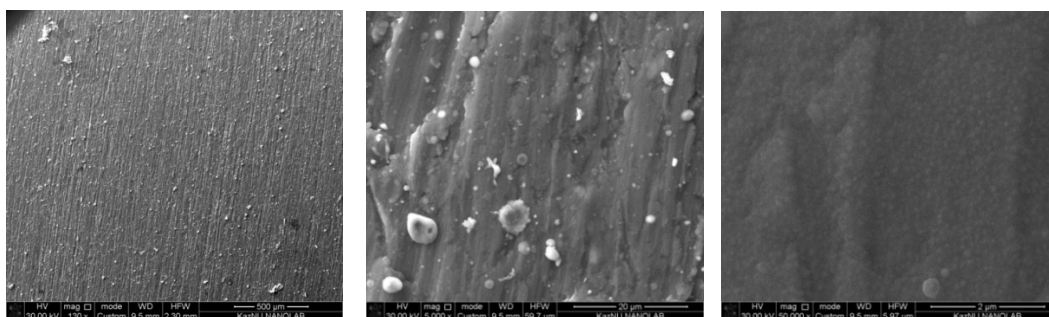
а) б) в)

а – разрешение 500 мкм, б – разрешение 20 мкм, в – разрешение 2 мкм
Рисунок 3 – Топография поверхности. Время напыления – 20 минут

Поверхность образца №3 показана на рисунке 4. Время напыления – 25 минут. На покрытии на рисунке 4 в наблюдаются некие сферические кластеры. Размеры этих образований порядка сотен нанометров, по-видимому, это нанокластеры. Шаровидные нанокластеры почти одинакового размера, а значит это высокодисперсная пыль. Структура покрытия более ровная. На фо-

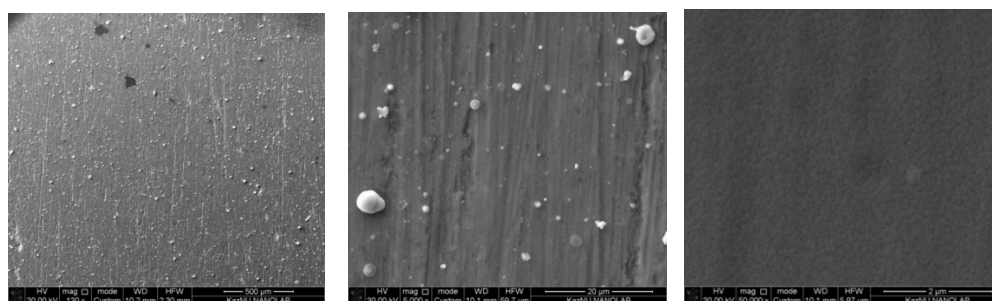
тографии 4 б наблюдаем процесс агломерации каплевидной фазы, образованной в результате налипания на капли нанокластеров.

Поверхность образца №4 показана на рисунке 5. Время напыления – 30 минут. Покрытие получилось спрессованным. Присутствует мелкий наноструктурный рельеф. Макрокапли обрастают некоей оболочкой.



а) б) в)

а – разрешение 500 мкм, б – разрешение 20 мкм, в – разрешение 2 мкм
Рисунок 4 – Топография поверхности. Время напыления – 25 минут

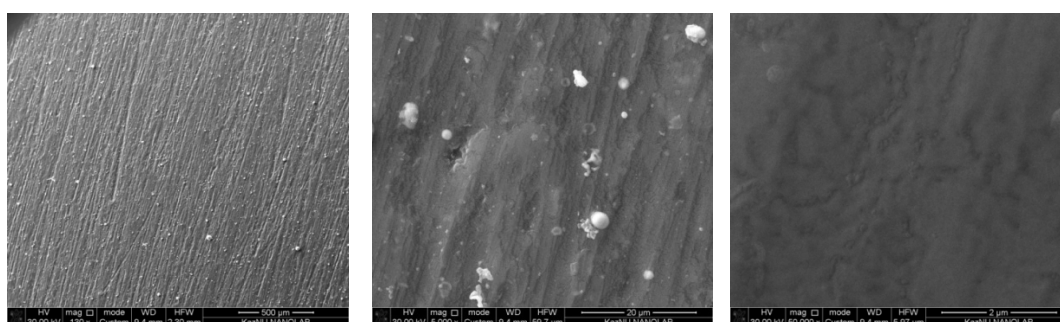


а) б) в)

а – разрешение 500 мкм, б – разрешение 20 мкм, в – разрешение 2 мкм
Рисунок 5 – Топография поверхности. Время напыления – 30 минут

Поверхность образца №5 показана на рисунке 6. Время напыления – 35 минут. На данном этапе продолжается стадия разглаживания. Но пока не до конца, не на завершающем этапе. В связи с

этим мы видим, что на данной поверхности, более гладкой, нет сформированных наноструктур. Присутствует укрупненный рельеф. Местами видны следы конденсации капель металла.



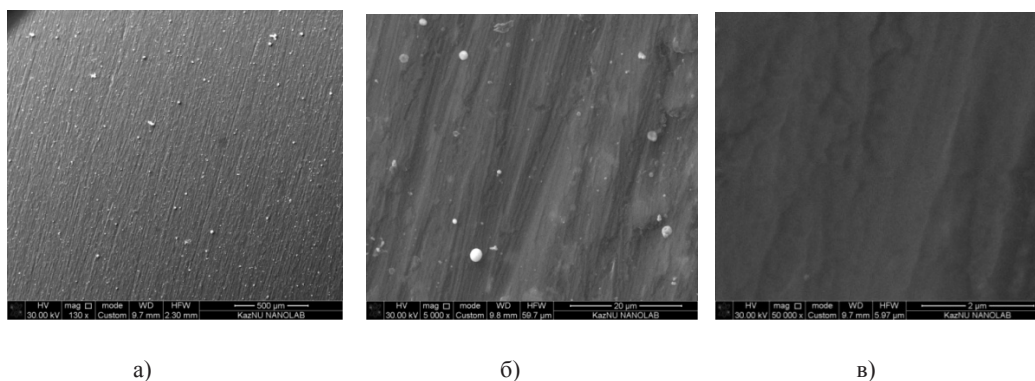
а) б) в)

а – разрешение 500 мкм, б – разрешение 20 мкм, в – разрешение 2 мкм
Рисунок 6 – Топография поверхности. Время напыления – 35 минут

Поверхность образца №6 показана на рисунке 7. Время напыления – 40 минут.

Присутствует крупный рельеф. Пыль спрессована в виде покрытия, но при этом покрытие

гладкое. Структура однородная. Если при 15 минутах было напыление с плохой адгезией, то при 40 минутах за счет прессовки получился толстый и хороший слой.



а) – разрешение 500 мкм, б) – разрешение 20 мкм, в) – разрешение 2 мкм

Рисунок 7 – Топография поверхности. Время напыления – 40 минут

Проведен рентгеноспектральный анализ алюминиевых образцов до и после обработки на ВДУ 1. В элементном составе поверхностного слоя исследуемых образцов обнаружено присутствие 19,98% Си, что доказывает наличие покрытия из меди на алюминиевых образцах. При всем этом состав покрытия 69,66 Al и 6,72 O₂ показывает процесс окисления алюминия кислородом, вероятно присутствующим изначально на поверхности подложек. Обнаружено изменение элементного состава исследуемого материала: если в составе исходного образца соотношение кислорода к алюминию было 10,53% к 89,47%, то после плазменной обработки содержание основных элементов O₂ и Al уменьшается до 6,72 и 69,66 соответственно. В последних РФА анализах в покрытиях алюминия на медных подложках обнаружен Al₂O₃, но не наблюдали окиды меди на медных покрытиях.

Заключение

Целью исследования было проследить эволюцию структуры покрытия из меди, осажденного из плазмы вакуумной дуги при импульсном режиме работы. За время осаждения 15-40 мин наблюдали процесс существенного уплотнения слоя меди на поверхности алюминиевых подложек. Из рисунков 2-7 прослеживается эволюция размера поверхностных дефектов. Сначала это видимая нанопыль, затем некие сферические

кластеры, растущие в размерах, затем опять пыль, но более мелкая. Такое поведение может быть объяснено изначально формированием покрытия слоями, постепенным ростом и заполнением этими слоями поверхности. Далее под влиянием температуры происходит структурная трансформация пыли в нанокластеры. При 25 мин осаждения шаровидные нанокластеры достигают почти максимального одинакового размера, а значит это высокодисперсная структура. Процесс трансформации продолжается до 30 мин напыления. После 30 мин наблюдали высокую однородность структуры, и определить размер нанокластерных включений не представляется возможным, вероятно размеры нанокластеров стали еще меньше. Объяснение данным явлениям возможно дать как с точки зрения термодинамических процессов, так и процессов передачи заряда. Так как подложка и покрытие металлические, а основание подложки имело контакт с металлическим корпусом, передачу заряда из плазмы на покрытие считаем маловероятным, хотя это и требует проверки. С точки зрения термодинамических процессов, подложка постепенно нагревается до 200⁰ С за 20 мин. напыления, как было показано в нашей работе [9]. До какой то определенной температуры, пыль формируется в нанокластеры, их размеры растут. Далее начинается процесс распада, но в результате размеры кластеров становятся еще меньше, или это уже наночастицы. Наночастицы

обнаруживали в дуговых плазменных покрытиях ряд авторов, например [10,11]. Очевидно, это происходит в результате того, что пыль осаждается из плазмы уже в виде наночастиц. Вопросы формирования нанопыли из ионной компоненты плазмы в области дугового разряда, в особенности механизм этого процесса, требует дополнительного исследования.

Таким образом, в данной работе обнаружено формирование и распад нанокластеров в пылевом покрытии при осаждении медного покрытия. Очевидно, осаждение сплошных покрытий данным методом возможно при достаточном времени экспозиции более 30 мин. Развитие дан-

ного направления исследований необходимо в связи с тем, что в импульсных дугах достигается высокая скорость осаждения слоев, поэтому необходимо улучшать свойства покрытий, развивая данный метод.

Благодарность, конфликт интересов

Исследование выполнено в рамках грантового финансирования КН МОН РК грант ИРН BR21882187 «Разработка новых наноматериалов и технологий для химических и электрохимических устройств преобразования и хранения энергии». Конфликт интересов отсутствует.

Литература

1. I.I. Aksenov, D.S. Aksyonov. Physical aspects of vacuum-arc coating deposition east eur. J. Phys. Vol.1 no.3 (2014) 22-39.
2. Yoshiaki Agawa, Satoshi Endo, Masamichi Matsuura and Yoshikazu Ishii. Behaviors of Metal Nano-particles Prepared by Coaxial Vacuum Arc Deposition // Advanced Materials Research Online: 2010-08-11. ISSN: 1662-8985, Vols. 123-125, pp 1067-1070. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.123-125.1067
3. I. Pilch, D. Soderstrom, D. Lundin, U. Helmersson. The use of highly ionized pulse plasmas for the synthesis advances thin films and nanoparticles. Kona Powder and Particle journal, 31, 2014, p. 171 – 180.
4. Lafferty J.M. (Ed.), Vacuum Arcs – Theory and Application; Wiley, New York, 1980.
5. Jüttner B. Cathode spots of electric arcs // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – V. 34. – R103.
6. Hantsche E. Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2003. – V. 31. – P. 799–808.
7. Batrakov A.V., Jüttner B.J., Popov S.A., Proskurovskii D.I., Vogel N.I., Droplet spot as a new object in physics of vacuum discharge, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 2002, 75, 2, P. 76–82
8. Zhukeshov, A.M., Gabdullina, A.T., Amrenova, A.U., K. Fermakhan. The pulse vacuum-arc plasma generator for nanoengineering application // Appl. Phys. A, V.126, Iss.742 (2020).
9. Zhukeshov A.M., Fermakhan K., Gabdullina A.T., Amrenova A.U., Dauyt N.N., Nazar E.A. The use of pulsed vacuum arc plasma for the synthesis of hollow spherical particles // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes, 25(2), -2021. P. 1–7.
10. Ryabchikov A.I., Sivin D.O., Bumagina A.I. Physical mechanisms of macroparticles number density decreasing on a substrate immersed in vacuum arc plasma at negative high frequency short-pulsed biasing // Applied Surface Science. – 2014. – V. 305. – P. 487–491.
11. И.В. Карпов, А.В. Ушаков, Л.Ю. Федоров, А.А. Лепешев. Метод получения нанодисперсных материалов в плазме импульсного дугового разряда низкого давления // Журнал технической физики, 2014, том 84, вып. 4. С. 93-97.

References

1. I.I. Aksenov, D.S. Aksyonov. Physical aspects of vacuum-arc coating deposition east eur. J. Phys. Vol.1 no.3 (2014) 22-39.
2. Yoshiaki Agawa, Satoshi Endo, Masamichi Matsuura and Yoshikazu Ishii. Behaviors of Metal Nano-particles Prepared by Coaxial Vacuum Arc Deposition // Advanced Materials Research Online: 2010-08-11. ISSN: 1662-8985, Vols. 123-125, pp 1067-1070. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.123-125.1067
3. I. Pilch, D. Soderstrom, D. Lundin, U. Helmersson. The use of highly ionized pulse plasmas for the synthesis advances thin films and nanoparticles. Kona Powder and Particle journal, 31, 2014, p. 171 – 180.
4. Lafferty J.M. (Ed.), Vacuum Arcs – Theory and Application; Wiley, New York, 1980.
5. Jüttner B. Cathode spots of electric arcs // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – V. 34. – R103.
6. Hantsche E. Mysteries of the arc cathode spot: A retrospective glance // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2003. – V. 31. – P. 799–808.
7. Batrakov A. V., Jüttner B. J., Popov S. A., Proskurovskii D. I., Vogel N. I., Droplet spot as a new object in physics of vacuum discharge, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 2002, 75, 2, P. 76–82
8. Zhukeshov, A.M., Gabdullina, A.T., Amrenova, A.U., K. Fermakhan. The pulse vacuum-arc plasma generator for nanoengineering application // Appl. Phys. A, V.126, Iss.742 (2020).

9. Zhukeshov A.M., Fermakhan K., Gabdullina A.T., Amrenova A.U., Dauyt N.N., Nazar E.A. The use of pulsed vacuum arc plasma for the synthesis of hollow spherical particles // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Tech Plasma Processes, 25(2), -2021. P. 1–7.

10. Ryabchikov A.I., Sivin D.O., Bumagina A.I. Physical mechanisms of macroparticles number density decreasing on a substrate immersed in vacuum arc plasma at negative high frequency short-pulsed biasing // Applied Surface Science. – 2014. – V. 305. – P. 487–491.

11. I.V. Karpov, A.V. Ushakov, L.Ju. Fedorov, A.A. Lepeshev. Metod poluchenija nanodispersnyh materialov v plazme impul'snogo dugovogo razrjada nizkogo davlenija // Zhurnal tehnicheckoj fiziki, 2014, V 84, Issue. 4. p. 93-97.

Авторлар туралы мәлімет:

Жукешов Ануар Муратович (корреспонденция авторы) – Физика-математика ғылымдарының докторы, әл-Фараби ҚазҰУ плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасы профессоры (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: zhukeshov@physics.kz); ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9153-323X>

Габдуллина Асылгул Тулепбергеновна – физика-математика ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби ҚазҰУ, плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.пошта: gabdullyna71@gmail.com);

Мухамедрысқызы Маржан – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, әл-Фараби ҚазҰУ, плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.пошта: mukhamedryskuzum@gmail.com)

Пишков Мустахим Искендерович – физика-математика ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби ҚазҰУ, плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.пошта: mustahim64@mail.ru);

Амренова Асем Уахитовна – физика-математика ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби ҚазҰУ, плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.пошта: Amrenova.ase77@gmail.com);

Молдабеков Жангали Мусырманкулович – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, әл-Фараби ҚазҰУ, плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.пошта: Zhan.moldabek@gmail.com);

Абдыбай Улан – техника ғылымдарының магистрі, әл-Фараби ҚазҰУ, плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының докторанты (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.пошта: abdibayulan@gmail.com) 0009-0002-5309-5827

Сведения об авторах:

Жукешов Ануар Муратович (корреспондентный автор) – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики физико-технического факультета КазНУ имени аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: zhukeshov@physics.kz);

Габдуллина Асылгул Тулепбергеновна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа (ННЛОТ) при КазНУ имени аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: gabdullyna71@gmail.com); 0000-0002-2751-2167

Мухамедрысқызы Маржан – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики, КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы Казахстан, эл.почта: mukhamedryskuzum@gmail.com);

Пишков Мустахим Искандерович – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики плазмы нанотехнологии и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы Казахстан, эл.почта: mustahim64@mail.ru); 0000-0002-6602-0018

Амренова Асем Уахитовна – кандидат физико-математических наук, ст. преподаватель кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики, КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: Amrenova.ase77@gmail.com); ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6945-3644>

Молдабеков Жангали Мусырманкулович – магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики, КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы Казахстан, эл.почта: Zhan.moldabek@gmail.com); ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3634-6022>

Абдыбай Улан – магистр технических наук, докторант кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики, КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы Казахстан, эл.почта: abdibayulan@gmail.com)

Information about authors:

Zhukeshov Anuar Muratovich (corresponding author) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: zhukeshov@physics.kz); ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9153-323X>

Gabdullina Assylgul Tulepbergenovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the National Nanotechnology Laboratory of the Open Type (NNLOT) at the Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: gabdullyna71@gmail.com); 0000-0002-2751-2167

Mukhamedryskyzy Marzhan – MSc in Physics, senior lecturer of the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: mukhamedryskyzym@gmail.com); 0000-0003-1745-5100

Pshikov Mustahim Iskanderovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior lecturer of the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: mustahim64@mail.ru.); 0000-0002-6602-0018

Amrenova Assem Uakhitovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior lecturer of the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: Amrenova.ase77@gmail.com); ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6945-3644>

Moldabekov Zhanqali Musirmankulovich – MSc in Physics, senior lecturer of the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: Zhan.moldabek@gmail.com); ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3634-6022>

Abdibay Ulan – Master of Engineering Sciences, PhD student, Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: abdibayulan@gmail.com) 0009-0002-5309-5827

Принято к печати 21 сентября 2024