

УДК 621.9.048

DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-58-67

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ Cu-C ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**А. Н. КУПО, А. С. РУДЕНКОВ, ВАНГ ЦЗИНЦЗЕ,
Д. Г. ПИЛИПЦОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»,
Республика Беларусь*

На основании спектров комбинационного рассеяния проведен сравнительный анализ и оптимизация методов формирования медь-углеродных (Cu-C) покрытий для производства твердых и электропроводящих композиционных материалов. В частности, исследованы методы дугового испарения (в постоянном и импульсном режимах, а также их одновременное использование) и высокомоощного импульсного магнетронного распыления. Отмечено, что варьирование параметров разряда в каждом из этих методов позволяет изменять структурно-фазовый состав углеродной матрицы, а именно – соотношение концентраций sp^2 - и sp^3 -гибридизированных атомов углерода, что в конечном итоге определяет физико-химические свойства покрытий. Показано, что минимальные размеры кластеров, слияние которых формирует углеродные частицы, характерны для покрытий, осажденных методом импульсного испарения композиционного медь-углеродного катода, при этом размер кластера равен 2,5 нм. Максимальные размеры углеродных кластеров установлены для метода высокоимпульсного магнетронного распыления при частоте 5 кГц и составляют 7,8 нм.

Ключевые слова: композиционные покрытия, дуговое испарение, магнетронное распыление, структурно-фазовый состав.

Для цитирования. Оптимизация методов формирования Cu-C покрытий электротехнического назначения /А. Н. Купо, А. С. Руденков, Ванг Цзинцзе, Д. Г. Пилипцов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 1 (100). – С. 58–67. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-58-67

OPTIMIZATION OF METHODS FOR FORMING Cu-C COATINGS FOR ELECTRICAL ENGINEERING APPLICATIONS

**A. N. KUPO, A. S. RUDENKOV, WANG JINGJIE,
D. G. PILIPTSOV**

*Francysk Skaryna Gomel State University,
the Republic of Belarus*

Based on Raman scattering spectra, a comparative analysis and optimization of methods for forming copper-carbon (Cu-C) coatings for the production of solid and electrically conductive composite materials were conducted. Specifically, arc evaporation methods (in both continuous and pulsed modes, as well as their simultaneous use) and high-power pulsed magnetron sputtering were studied. It was noted that varying the discharge parameters in each of these methods allows for the modification of the structural-phase composition of the carbon matrix, namely, the ratio of sp^2 - and sp^3 -hybridized carbon atoms, which ultimately determines the physicochemical properties of the coatings. It was shown that the smallest cluster sizes, whose merging forms carbon particles, are characteristic of coatings deposited by the pulsed evaporation of a composite copper-carbon cathode, with a cluster size of 2.5 nm. The largest carbon cluster sizes were observed for the high-power pulsed magnetron sputtering method at a frequency of 5 kHz, measuring 7.8 nm.

Keywords: composite coatings, arc evaporation, magnetron sputtering, structural-phase composition.

For citation. Kupo A. N, Rudenkov A. S, Jingjie Wang, Piliptsov D. G. Optimization of methods for forming Cu-C coatings for electrical engineering applications. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 1 (100), pp. 58–67 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-1-58-67

Введение

С 1990-х гг. в России и за рубежом публикуются работы, предлагающие введение углеродных наноструктур в металлическую матрицу с целью ее упрочнения [1–5]. Такой метод позволяет существенно улучшить свойства композиционных материалов электротехнического назначения и соответственно расширяет перечень областей их применения в изделиях электронной техники [1]. В связи с этим разработка новых эффективных методов синтеза металл-углеродных покрытий, обеспечивающих равномерное распределение углеродных фаз, введенных в объем металлической матрицы, является актуальной задачей, позволяющей получать новые многофункциональные материалы и изделия на их основе.

В настоящее время активно развиваются вакуумные технологии формирования композиционных медь-углеродных (Cu-C) покрытий для производства твердых и электропроводящих композиционных материалов. Авторами данной работы предложены методы формирования композиционных медьсодержащих алмазоподобных покрытий с контролируемым содержанием меди. Основным результатом достигаемых с помощью таких композиционных тонкопленочных систем заключается в увеличении механических свойств (повышении твердости, снижении коэффициента трения и износа сопряженных поверхностей покрытий,) а также при этом наличие меди способствует снижению хрупкости покрытий и, как известно [2–5], – увеличению электропроводности покрытий как за счет наличия меди, так и путем повышения содержания графита в объеме покрытия.

Целью данной работы является сравнительный анализ существующих методов формирования композиционных покрытий Cu-C в вакууме с их последующей оптимизацией путем выбора технологических режимов, основанного на анализе спектров комбинационного рассеяния полученных тонкопленочных систем.

Методы формирования Cu-C покрытий в вакууме

В качестве основных методов осаждения композиционных покрытий предлагается использовать методы дугового испарения (в постоянном и импульсном режимах, а также их одновременное применение) и высокоомощного импульсного магнетронного распыления. Указанные методы отличаются по способу генерации плазменных потоков и формированию углеродных фаз с различным отношением sp^2 - и sp^3 -гибридизированных атомов углерода.

На рис. 1 представлена схема осаждения покрытий с использованием дуговых методов, а именно – формирование медной компоненты покрытия с применением дугового разряда постоянного тока, а углеродной – испарением графитового катода импульсной дугой.

В процессе осаждения отношение концентрации элементов в композиционном Cu-C покрытии регулируется как за счет перемены тока дугового разряда (в диапазоне от 50 до 90 А), так и изменением частоты следования разрядных импульсов углеродной плазмы (от 3 до 20 Гц). Управление указанными параметрами позволяет получить поток ионов углерода со средней энергией ионов в диапазоне 40–80 эВ в зависимости от величины напряжения на конденсаторном блоке, что обеспечивает формирование углеродной компоненты покрытия с различным типом гибридизации углеродных связей.

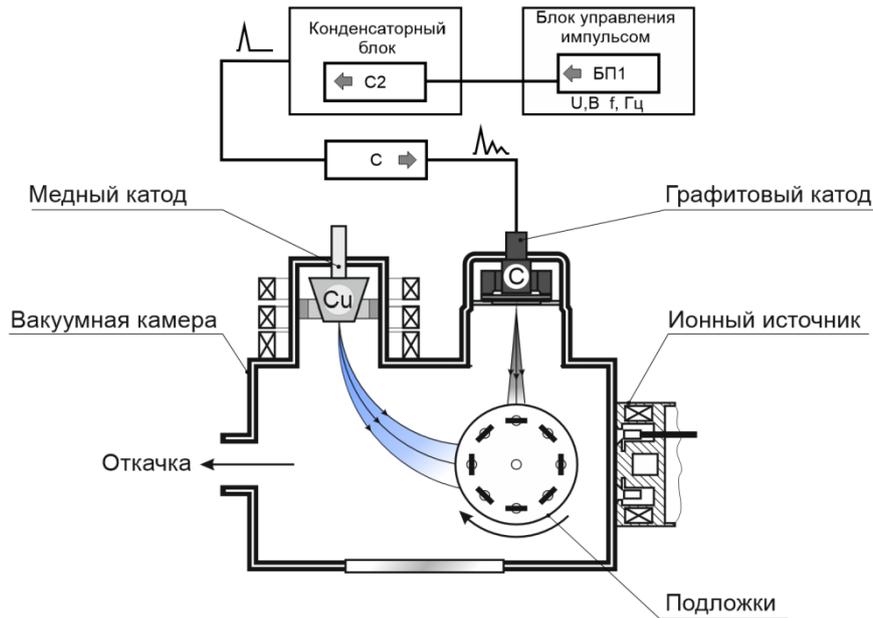


Рис. 1. Схема осаднения покрытий из совмещенных потоков медной и углеродной плазмы

Как было уже отмечено в [4, 5], при испарении меди в режиме высоких значений тока дугового разряда в покрытия присутствуют макрочастицы меди, существенно понижающие однородность структуры композиционных покрытий. При использовании таких композитов в качестве износостойких покрытий триботехнического назначения наличие капель меди приводит к снижению коэффициента трения за счет их сегрегации в процессе трения с образованием тонкой политурной медной пленки, которая выступает в качестве твердой смазки, заполняет дефекты, возникающие в зоне трения, что положительно сказывается на кинетике трения и износостойкости пары трения. При осаднении покрытий электрофизического назначения наличие капельной фазы, определяющей неоднородность структуры покрытий, является недопустимым. Поэтому необходимо обеспечивать режимы генерации плазменных потоков с минимальным содержанием капельной фазы, что достигается испарением медного катода при небольших токах (50–60 А) дугового разряда. При этом соотношение углеродной и медной составляющих композиционного покрытия регулируется за счет изменения частоты работы генератора углеродной плазмы. Варьирование частоты и напряжения разряда позволяют изменять структурно-фазовый состав углеродной матрицы, а именно – соотношение концентраций sp^2 - и sp^3 -гибридизированных атомов углерода, что в конечном итоге определяет физико-химические, и, в частности, электрофизические свойства покрытий [5].

Вторым методом, используемым в данной работе, является формирование покрытий в вакууме путем испарения составного медь-графитового катода импульсной дугой. Нанесение медь-углеродного покрытия осуществляли за счет импульсного испарения составного медь-графитового катода, изготовленного из высокочистого графита марки МПГ-6 (99,999 %) с плотностью $1,8 \text{ г/см}^3$, содержащего медные «вставки». Блок питания импульсного испарителя позволяет регулировать частоту следования разрядных импульсов в диапазоне от 3 до 15 Гц и напряжение разряда – (300–350 В). Схема данного метода представлена на рис. 2.

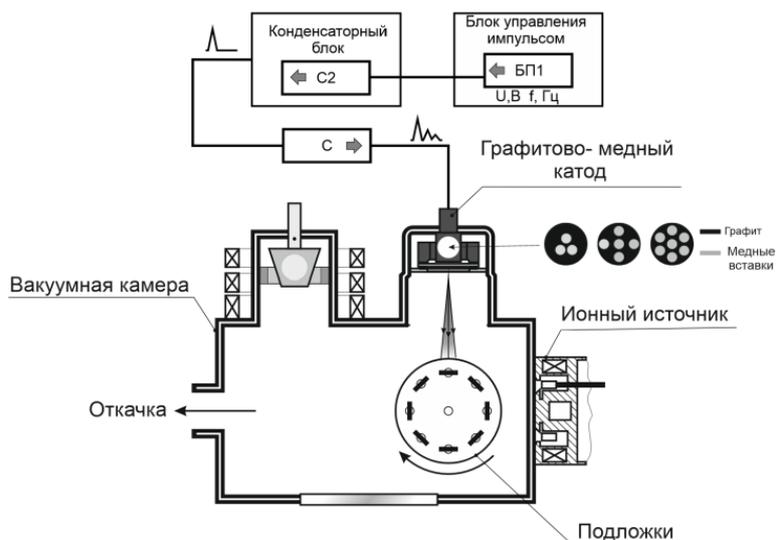


Рис. 2. Схема осаждения покрытий, за счет испарения составного медь-углеродного катода

При реализации схемы, показанной на рис. 2, осаждение покрытий требуемого стехиометрического и элементного состава возможно за счет изменения относительной площади, занимаемой графитом и медью на поверхности катода. Получение в покрытии требуемой концентрации углерода и меди возможно после проведения серии экспериментов, позволяющих установить зависимость отношения концентрации меди и графита в покрытии от отношения площадей, занимаемых медью и графитом на поверхности катода. Также стоит отметить, что частота импульсов и напряжение разряда катодно-дугового разряда определяет отношение sp^2 - и sp^3 -гибридизированных атомов углерода в покрытии. Кроме того, как уже отмечалось, при этом, согласно работам [1, 4, 5], наличие меди приводит к графитизации углеродной матрицы.

В качестве перспективного метода формирования медь-углеродных покрытий исследовано импульсное высокотокковое магнетронное распыление. Магнетронное распыление импульсами высокой мощности (в англоязычной литературе – HiPIMS [6–8]) представляет собой разновидность импульсного магнетронного распыления, отличительной особенностью которой является применение для испарения материала мишени импульсов разрядного тока с малой длительностью и высокой частотой следования разрядных импульсов, что определяет их высокую импульсную мощность. На рис. 3 приведена схема эксперимента по осаждению композиционных медь-углеродных покрытий с использованием магнетронной высокотокковой импульсной распылительной системы.

Отработку технологических режимов нанесения покрытий, получаемых методом HiPIMS, проводили в вакуумной камере, содержащей:

- ионный источник, с помощью которого производилась очистка и нагрев подложек;
- магнетронную распылительную систему с блоком питания APCL-M-5HPP-800, позволяющим формировать высокотокковые импульсы с различной длительностью и частотой следования;
- систему подачи рабочих газов, состоящую из двух независимых регуляторов расхода газа, дающую возможность обеспечить и поддерживать необходимый расход как рабочего (Ar), так и реактивного (N₂) газов (РРГ-12, Элточприбор, Российская Федерация).

Для формирования покрытий использовались катоды диаметром 80 мм и толщиной 6 мм, изготовленные из меди (М0) и графита МПГ-6 (99,999 %) При осаждении покрытий Cu рабочим газом являлся аргон, подаваемый непосредственно в катодный узел магнетронной распылительной системы.

Режим работы магнетронной распылительной системы (стабилизация по току, напряжению или мощности) также оказывает влияние на структурно-фазовое состояние покрытий и скорость осаждения.

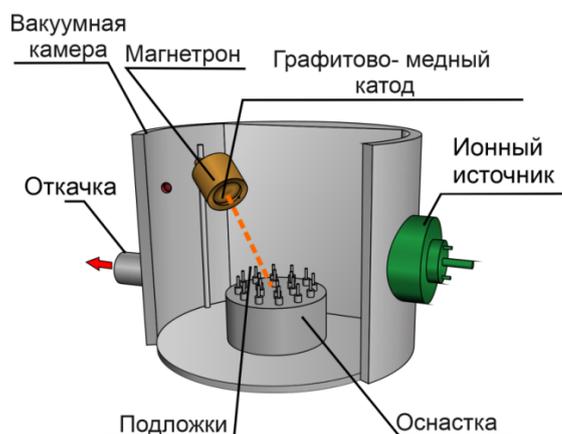


Рис. 3. Принципиальная схема получения покрытий с использованием высокомощного импульсного магнетронного распыления

В результате экспериментальных исследований выявлено, что для управляемого формирования медь-углеродных покрытий заданной стехиометрии работа магнетрона может осуществляться в режимах, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Параметры источника питания магнетронной распылительной системы

Параметр	Величина
Напряжение разряда	500–1200В
Средний выходной ток	0,5– 2,0 А
Средняя мощность	0–5 кВт
Частота импульсов	5–15 кГц
Длительность	5–250 мкс

Оптимизация режимов испарения проводилась на основании анализа структурно-фазового и элементного состава покрытий, а также скорости осаждения и роста покрытий.

Оптимизация режимов нанесения Cu-C покрытий с преобладающим содержанием различных аллотропных модификаций углерода

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) – один из самых эффективных методов исследования химических связей, преимуществом которого является возможность анализа фазового состава композиционного покрытия без его разрушения. В настоящем исследовании был использован спектрометр комбинационного рассеяния (Senterra, Bruker). Спектры получали в результате возбуждения материала покрытий лазерным излучением с длиной волны 532 нм и мощностью 20 мВт.

Медь-углеродные покрытия формировались тремя вышеописанными методами, позволяющими реализовать различные энергетические условия (напряжение разряда, ток дуги) формирования потока медь-углеродной плазмы и временные (частота импульсов, их длительность) режимы работы испарителей.

Результаты исследования элементного состава покрытий, выполненные методом энергодисперсионного анализа, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Элементный состав Cu-C покрытий, осажденных различными методами

Осаждение из совмещенных потоков					
Ток дугового испарителя, А	Частота разрядных импульсов, Гц	Напряжение разряда, В	С, ат. %	Си, ат. %	О, ат. %
80	5	350	36	61	3
80	15	350	45	54	1
<i>Импульсное испарение композиционного медь-углеродного катода</i>					
	5	350	51	46	3
	15	350	53	45	2
<i>Магнетронное распыление композиционной медь-углеродной мишени</i>					
	5000	800	31	65	4
	15000	800	38	60	2

Как видно из данных, представленных в табл. 2, элементный состав покрытий, а именно: содержание углерода, кислорода и меди в покрытии определяется временными, частотными и энергетическими режимами работы испарителей. Стоит отметить, что максимальная концентрация меди установлена для покрытий, осажденных за счет распыления композиционной медь-углеродной мишени методом HiPIMS.

Наличие кислорода в покрытии определяется как взаимодействием между элементами распыляемой мишени с остаточным кислородом в вакуумной камере, так и последующим окислением покрытия при ее разгерметизации после окончания процесса формирования покрытия.

Для осажденных покрытий характерна толщина около 20 нм, поскольку планируется их применение на гибких печатных платах, и, следовательно, данные покрытия должны характеризоваться минимальной хрупкостью. Также стоит отметить, что в обзорных КР-спектрах всех осажденных покрытий присутствует пик в области $210\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, который является тепловым пиком кремниевой подложки.

На рис. 4 и 5 приведены спектры КР-покрытий, осажденных с использованием исследуемых методов.

В КР-спектре медь-углеродных покрытий на рис. 4 присутствуют две спектральные составляющие, которые относятся к *D*- и *G*-пикам. Пик *D* характеризует степень структурной энтропии sp^2 -фазы [9]. В зависимости от изменения положения пика *G* и отношения площадей *D*-пика и *G*-пика (I_D/I_G) можно установить относительное изменение атомов углерода с sp^2 -связей в покрытиях, осажденных при различных энергетических режимах и содержащих разную концентрацию меди. Как было показано в работах [5, 10], медь является катализатором, активирующим графитизацию алмазоподобного покрытия, что приводит к уширению КР-спектра, а также увеличению интенсивности и смещению в область высоких волновых чисел *G*-пика.

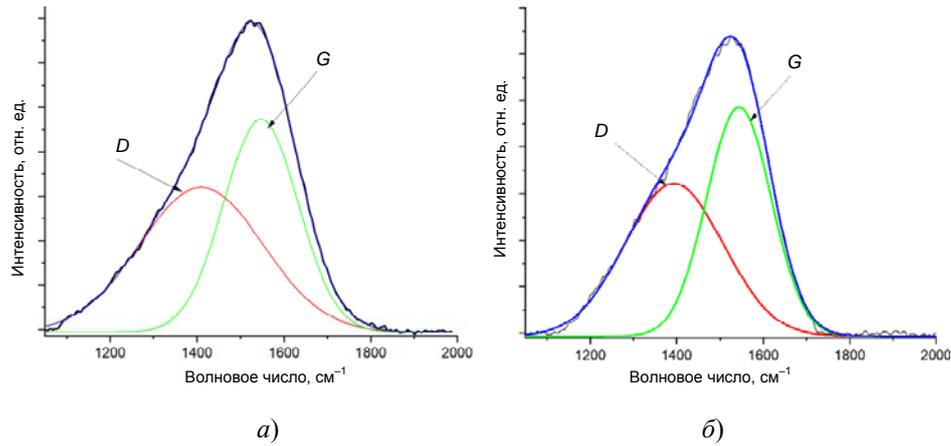


Рис. 4. КР-спектры медь-углеродных покрытий, осажденных из совмещенных потоков импульсной углеродной плазмы и потока меди, генерируемой дуговым разрядом постоянного тока: *a* – КР-спектр в диапазоне от 1000 до 2000 см^{-1} для а-С : Си покрытия, осажденного при частоте 5 Гц и токе дуги 80 А; *б* – КР-спектр в диапазоне от 1000 до 2000 см^{-1} для а-С : Си покрытия, осажденного при частоте 5 Гц и токе дуги 80 А

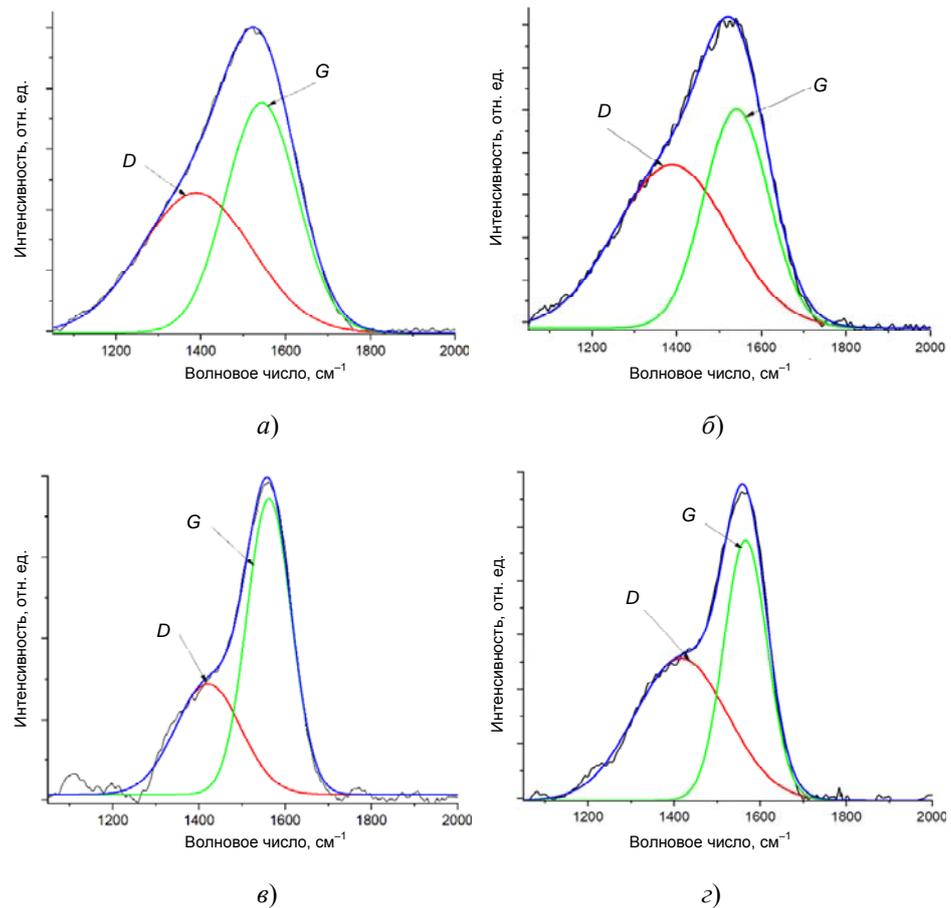


Рис. 5. КР-спектры медь-углеродных покрытий, осажденных путем импульсного испарения композиционного графит-медного катода и магнетронного испарения: *a* – КР-спектр в диапазоне от 1000 до 2000 см^{-1} для а-С : Си покрытия, осажденного при частоте 5 Гц; *б* – КР-спектр в диапазоне от 1000 до 2000 см^{-1} для а-С : Си покрытия, осажденного при частоте 15 Гц; *в* – КР-спектр в диапазоне от 1000 до 2000 см^{-1} для а-С : Си покрытия, полученного магнетронным испарением при частоте 5 кГц; *г* – КР спектр в диапазоне от 1000 до 2000 см^{-1} для а-С : Си покрытия, осажденного магнетронным испарением при частоте 15 кГц

Внешний вид КР-спектров, очевидно, определяется параметрами метода формирования покрытий, энергетическими режимами работы испарителя и концентрацией меди в объеме углеродного слоя.

Для покрытий, осажденных из совмещенных потоков, наблюдается уменьшение отношения интенсивностей I_D / I_G и сдвиг G -пика в сторону более низкого волнового числа с ростом частоты работы генератора при токе дуги 80 А. Такое поведение параметров КР-спектра может быть связано с уменьшением атомов углерода с sp^2 -гибридизированными связями. Следует отметить, что для данных покрытий наблюдается рост концентрации меди в объеме и снижение количества углерода, которое и приводит к уменьшению количества sp^2 -гибридизированных атомов углерода, участвующих в формировании КР-сигнала. Для других покрытий происходит незначительное смещение положения центра G пика в область более высоких волновых чисел и рост значений I_D / I_G отношения, что может определяться уменьшением размера L_a графитового кластера, вызванным изменением энергии осаждаемых ионов углерода и процессами взаимодействия между атомами меди и углерода в плазменном потоке. Это приводит к тому, что изменяется энергетический спектр ионов углерода.

При этом можно предположить, что смещение G -пика в сторону более низкого волнового числа сопровождается уменьшением sp^2 -связей, что косвенно указывает на рост концентрации атомов углерода в состоянии с sp^3 -гибридизацией связей. Также установлено уменьшение размера графитового кластера с ростом частоты генератора углеродной плазмы при распылении композиционной медь-графитовой мишени, достигая минимального размера 2,5 нм при частоте работы генератора 15 Гц.

Заключение

Выделены особенности формирования фазового состава Cu-C покрытий, осажденных при различных энергетических условиях и временных режимах. Показана зависимость элементного состава покрытий, а именно: концентрации меди от способа и параметров генерации плазменных потоков. С использованием спектроскопии комбинационного рассеивания проанализирована структура покрытий и установлено изменение размера углеродных кластеров в объеме медь-углеродного слоя. Определено, что минимальные размеры кластера, слияние которых формирует углеродные частицы, свойственны покрытиям, осажденным методом импульсного испарения композиционного медь-углеродного катода, с размером кластера, равным 2,5 нм. Максимальные размеры углеродных кластеров характерны для метода высокоимпульсного магнетронного распыления при частоте 5 кГц и составляют 7,8 нм.

Анализ параметров спектров комбинационного рассеивания позволил выявить изменение структуры и фазового состава покрытий. Показано, что при осаждении покрытий из совмещенных потоков медь-углеродной плазмы, при высокой частоте работы генератора и при осаждении покрытий из импульсных потоков углеродной плазмы (частота – 5 Гц), формируемой испарением композиционного медь-углеродного катода, образуются покрытия с высоким содержанием sp^3 -гибридизированных атомов углерода. При высокой частоте работы генератора углеродной плазмы и больших значениях тока дугового испарителя в покрытии преобладает sp^2 -графитоподобная компонента углеродного слоя. Метод HiPIMS является эффективным способом создания графитоподобной матрицы с содержанием sp^3 -кластеров углерода. Стоит отметить, что с использованием КР-спектроскопии возможно выполнить только качественный анализ изменения структуры покрытий. Количественное исследование относительных концентраций sp^1 -, sp^2 - и sp^3 -гибридизированных атомов углерода будет выполнено с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Материалы статьи подготовлены при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т24КИ-012 от 01.03.2024 г).

Литература

1. Наноконпозиционные покрытия и технологии в микроэлектронике / В. А. Емельянов, А. В. Рогачев, Н. Н. Федосенко, Д. Г. Пилипцов ; НАН Беларуси, Объед. ин-т машиностроения. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 450 с.
2. Структура и твердость композиционных материалов медь-углерод / Т. В. Ларионова, Н. В. Маркина, Н. В. Петров [и др.] // Вестник Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого. – 2012. – № 68. – С. 15–19.
3. Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы / Д. Г. Пилипцов, А. С. Руденков, П. А. Лучников [и др.] ; под ред. А. В. Рогачева. – М. : Радиотехника, 2020. – 283 с.
4. Influences of pulse frequency on structure and mechanical properties of DLC films synthesized by pulsed cathodic arc evaporation / Ye Bing, Xiaohong Jiang, Bing Zhou [et al.] // *Appl. Mechanics a. Materials*. – 2014. – Vol. 670–671. – P. 560–564.
5. Свойства и структура вакуумных покрытий типа АПП/Сu/АПП и Сu/АПП/Сu / Е. А. Кулеш, Н. Н. Федосенко, Д. Г. Пилипцов, А. С. Руденков // Материалы Юбилейн. науч.-практ. конф. посвящ. 85-летию ГГУ им. Ф. Скорины, Гомель, 17 июня 2015 г. : в 4 ч. / Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины ; под ред. О. М. Демиденко. – Гомель, 2015. – Ч. 4. – С. 42–44.
6. Anders, A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering / A. Anders // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 205. – P. 1–9.
7. High power impulse magnetron sputtering discharge / J. Gudmundsson, N. Brenning, D. Lundin, U. Helmersson // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 2012. – Vol. 30 (3). – P. 030801.
8. Plasma dynamics in a highly ionized pulsed magnetron discharge / J. Alami, J. T. Gudmundsson, J. Bohlmark [et al.] // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2005. – Vol. 14 (3). – P. 525–531.
9. Wada, N. «Diamond-like» 3-fold coordinated amorphous carbon / N. Wada, P. J. Gaczi, S. A. Solin // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1980. – Vol. 35-36. – P. 543–548.
10. Structure and optical properties of Cu-DLC composite films deposited by cathode arc with double-excitation source / Bing Zhou, Zhubo Liu, D. G. Piliptsov [et al.] // *Diamond and Related Materials*. – 2016. – Vol. 69. – P. 191–197.

References

1. Emelyanov V. A., Rogachev A. V., Fedosenko N. N., Piliptsov D. G. *Nanocomposite Coatings and technologies in microelectronics*. Ob"edinennyi institut mashinostroeniya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 450 p. (in Russian).
2. Larionova T. V., Markina N. V., Petrov N. V., Shapovalov O. S., Afanasyev A. A., Koltsova T. S. Structure and hardness of copper-carbon composite materials. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yaroslava Mudrogo*, 2012, no. 68, pp. 15–19 (in Russian).
3. Piliptsov D. G., Rudenkov A. S., Luchnikov P. A., Rogachev A. V., Jiang Xiao Hong, Zhou Bing. *Composite Carbon Coatings Precipitated from Pulsed Cathode Plasma*. Ed. Rogachev A. V. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2020. 283 p. (in Russian).
4. Bing Ye., Jiang Xiaohong, Zhou Bing, Piliptsov D. G., Rogachev A. V. Influences of pulse frequency on structure and mechanical properties of DLC films synthesized by pulsed cathodic arc evaporation. *Appl. Mechanics a. Materials*, 2014, vol. 670–671, pp. 560–564.
5. Kulesh E. A., Fedosenko N. N., Piliptsov D. G., Rudenkov A. S. Properties and structure of vacuum coatings of the APP/Cu/APP and Cu/APP/Cu type. Ed. O. M. Demidenko. *Materialy Yubilein.*

- nauch.-prakt. konf. posvyashch. 85-letiyu GGU im. F. Skoriny.* [Jubilee materials. scientific-practical. conf. 85th anniversary of GSU named after F. Skorina]. Gomel', Gomel'skii gosudarstvennyi universitet imeni Frantsiska Skoriny, 2015, pp. 42–44 (in Russian).
6. Anders A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, pp. 1–9.
 7. Gudmundsson J., Brenning N., Lundin D., Helmersson U. High power impulse magnetron sputtering discharge. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2012, vol. 30 (3), P. 030801.
 8. Alami J., Gudmundsson J. T., Bohlmark J., Birch J., Helmersson U. Plasma dynamics in a highly ionized pulsed magnetron discharge. *Plasma Sources Science and Technology*, 2005, vol. 14 (3), pp. 525–531.
 9. Wada N., Gaczi P. J., Solin S. A. «Diamond-like» 3-fold coordinated amorphous carbon. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1980, vol. 35–36, pp. 543–548.
 10. Zhou Bing, Liu Zhubo, Piliptsov D. G., Shengwang Yu, Zhifeng Wang, Rogachev A. V., Rudenkov A. S., Balmakou A. Structure and optical properties of Cu-DLC composite films deposited by cathode arc with double-excitation source. *Diamond and Related Materials*, 2016, vol. 69, pp. 191–197.

Поступила 13.02.2025 г.