

*Н. В. Прохоренкова<sup>1</sup>, А. М. Жилкашинова<sup>1✉</sup>, А. В. Троеглазова<sup>2</sup>*

## **Вакуумные технологии нанесения радиопоглощающих покрытий**

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова,  
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
e-mail: almira\_1981@mail.ru

**Аннотация.** Радиопоглощающие покрытия (РПП) играют ключевую роль в снижении радиолокационной заметности объектов и применяются в авиации, судостроении и телекоммуникациях, а также, при решении задач защиты информации, путем создания «электрических подписей» с использованием наноструктурированных покрытий, использования тонких пленок в метках для защиты от подделки, создания электронных меток и ключей шифрования и т.д. Вакуумные методы нанесения таких покрытий обеспечивают высокую точность, однородность и адгезию, что критически важно для их эффективности. Магнетронное распыление позволяет создавать многослойные наноструктурированные покрытия с контролируемым составом (например, на основе карбидов, нитридов или оксидов металлов). Преимущества вакуумных методов нанесения РПП заключаются в возможности контроля толщины и состава покрытия на наноуровне, достижении высокой адгезии и стойкости к агрессивным средам, возможности нанесения на сложные и миниатюрные поверхности. Вакуумные технологии обеспечивают воспроизводимость и высокое качество радиопоглощающих покрытий, что делает их незаменимыми для современных стелс-решений. В данной работе рассматривается метод магнетронного напыления покрытий на основе Co, C и Cr для формирования четырехслойных структур с радиопоглощающими свойствами. В качестве подложки для нанесения покрытий использовали тонкие пластины нелегированного монокристаллического кремния (Si). Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию многослойных структур и внедрение новых композитных материалов.

**Ключевые слова:** многослойное покрытие, радиопоглощающие покрытия, магнетронное напыление, потери на отражение, адгезия

*N. V. Prohorenkova<sup>1</sup>, A. M. Zhilkashinova<sup>1✉</sup>, A. V. Troeglazova<sup>2</sup>*

## **Vacuum technologies for applying radio-absorbing coatings**

<sup>1</sup>Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk, Russian Federation  
e-mail: almira\_1981@mail.ru

**Abstract.** Radio-absorbing coatings (RAC) play a key role in reducing the radar visibility of objects, being used in aviation, shipbuilding and telecommunications, as well as in solving information security problems by creating "electrical signatures" using nanostructured coatings, using thin films in tags to protect against counterfeiting, creating electronic tags and encryption keys, etc. Vacuum methods of applying such coatings provide high accuracy, homogeneity and adhesion, which is critically important for their effectiveness. Magnetron sputtering allows creating multilayer nanostructured coatings with a controlled composition (for example, based on carbides, nitrides or metal oxides). The advantages of vacuum methods of RAC application are the ability to control the thickness and

composition of the coating at the nanolevel, achieving high adhesion and resistance to aggressive environments, the ability to apply to complex and miniature surfaces. Vacuum technologies provide reproducibility and high quality of radio-absorbing coatings, which makes them indispensable for modern stealth solutions. This paper considers the method of magnetron sputtering of coatings based on Co, C and Cr to form four-layer structures with radio-absorbing properties. Thin plates of undoped monocrystalline silicon (Si) were used as a substrate for applying the coatings. Further research can be aimed at optimizing multilayer structures and introducing new composite materials.

**Keywords:** multilayer coating, radio-absorbing coatings, magnetron sputtering, reflection losses, adhesion

### *Введение*

Вакуумное напыление радиопоглощающих покрытий (РПП) – это технология нанесения тонких слоев материалов, которые уменьшают отражение и рассеивание электромагнитных волн в радиочастотном диапазоне [1]. К основным сферам применения РПП относятся стелс-технологии, поглотители электромагнитных помех в электронных устройствах, антенные технологии (уменьшение паразитного излучения) [2]. Из всех существующих методов нанесения металлических, диэлектрических и композитных слоев для создания РПП используют методы магнетронного распыления, ионно-плазменного напыления, электронно-лучевого испарения и молекулярно-лучевой эпитаксии. У каждого из указанных методов есть свои преимущества и недостатки, с учетом которых и определяется область применения метода. Так, например, ионно-плазменное напыление позволяет наносить материалы с высокой температурой плавления (карбиды, нитриды) [3], электронно-лучевое испарение подходит для тугоплавких материалов (графен, углеродные наноструктуры) [4], а молекулярно-лучевая эпитаксия используется для сверхточного нанесения ультратонких слоев [5]. Метод магнетронного распыления позволяет контролировать состав и структуру покрытия, применяется для создания многослойных поглощающих структур (например, чередование проводящих и диэлектрических слоев) [6-8].

Рассмотрим подробнее методы магнетронного напыления. В качестве материалов для создания радиопоглощающих покрытий используют углеродные материалы (графен, углеродные нанотрубки, сажа), которые обеспечивают широкополосное поглощение [9-10]. Также широкое применение находят ферромагнетики (ферриты, пермаллой), такие материалы эффективны в СВЧ-диапазоне [11-12]. При создании многослойных структур используют диэлектрики с потерями (оксиды, нитриды) [13]. К перспективным направлениям исследований в данной области также можно отнести создание метаматериалов, представляющих собой искусственные структуры с отрицательным коэффициентом преломления [14], гибкие и самовосстанавливающиеся покрытия для космических аппаратов [15].

Магнетронное напыление (магнетронное распыление, англ. «Magnetron Sputtering») это один из наиболее распространенных методов вакуумного осаждения тонких пленок, широко применяемый для нанесения РПП [16]. Техноло-

гия обеспечивает высокую скорость осаждения, хорошую адгезию и контроль состава покрытия.

В качестве материалов для получения радиопоглощающих покрытий применяют металлы и сплавы: никель (Ni), железо (Fe), кобальт (Co) – ферромагнитные свойства, поглощение в СВЧ-диапазоне. Алюминий (Al), медь (Cu) – в сочетании с диэлектриками создают интерференционные структуры. Графен, углеродные нанотрубки (УНТ) – широкополосное поглощение. Ферриты (Ni-Zn, Mn-Zn) – магнитные потери в радиочастотах. SiC, TiN, ZnO – полупроводниковые поглотители [17].

В настоящее время, в связи с ростом числа производителей электронной техники, развитием искусственного интеллекта и интернета-вещей, очень актуальной становится задача защиты информации путем создания «электрических подписей» с использованием наноструктурированных покрытий, использование тонких пленок в метках для защиты от подделки, создание электронных меток и ключей шифрования и т.д. Наиболее перспективным направлением в этой области является получение многослойных структур, так как такая технология позволяет точно настраивать радиопоглощающие свойства под конкретные задачи, а сам процесс не требует дорогостоящего оборудования. Примерами таких многослойных структур радиопоглощающих покрытий являются интерференционные покрытия – чередование металл/диэлектрик (например, Al/SiO<sub>2</sub>) работает за счет деструктивной интерференции отраженных волн, или градиентные покрытия – постепенное изменение импеданса (например, от проводящего к диэлектрическому слою). Целью настоящего исследования является расчет радиопоглощающих характеристик и проектирование многослойного радиопоглощающего покрытия на основе Co-C-Cr.

### *Методы и материалы*

В качестве подложки для нанесения покрытий использовали тонкие пластины нелегированного монокристаллического кремния (Si) толщиной 20 мкм (для минимизации влияния подложки на электромагнитные свойства покрытия) с кристаллографической ориентацией (100). Использование данного вида кремния в качестве подложки позволяет избегать «паразитных» проводящих путей, которые могут исказить результаты исследований радиопоглощения. Создание покрытий Co-Cr-C осуществлялось методом магнетронного распыления на приборе ЭПОС PVD-440 в режиме постоянного тока в инертной среде аргона путем распыления ферромагнитных Co, Cr мишеней и мишени C на кремниевую подложку. Толщина слоев регулировалась временем напыления. Подложка из пористого кремния помещалась в геометрическом фокусе магнетронов на расстоянии 15 см. Перед напылением подложка очищалась источником ионов Ar<sup>+</sup> с ускоряющим напряжением 3,5 кВ в течение 30 мин. Концентрация составляющих элементов в покрытии регулировалась мощностью, подводимой к мишеням Co/C/Cr.

Толщину покрытия определяли методом сканирующей электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL -2200

FS (JEOL, Япония) с приставкой энергодисперсионного анализа (EDX) INCA ENERGY (Oxford Instruments, Великобритания). Ускоряющее напряжение до 30 кВ; разрешение до 3 нм; приборное увеличение до  $\times 300\,000$ . Образцы проб помещались в форму диаметром 30 мм, заливались эпоксидным наполнителем и сушились. Определение толщины покрытия осуществлялись на поперечном срезе, для пробоподготовки поперечного среза использовали метод механического среза под углом алмазным резакom с последующим полированием дисками с уменьшающейся зернистостью (0,5 мкм, 0,05 мкм). После механической подготовки проходила ультразвуковая очистка в изопропиловом спирте с последующей сушкой и ионным травлением  $\text{Ar}^+$  в магнетроне для улучшения качества поверхности среза.

Микротвердость синтезированной керамики определяли по методу Виккерса с использованием микротвердомера DuraScan-20 (EMCO TEST, Австрия), испытательная нагрузка 0,2; 0,5 и 1,0 кН, выдержка при максимальной нагрузке – 5 с.

Усилие сцепления покрытия с подложкой оценивали по авторской методике, основанной на требованиях ГОСТ 24409-80 «Материалы керамические электротехнические» с использованием универсальной электромеханической испытательной машины РКМ 10.2/10.2 svo.

Анализ микроструктуры экспериментальных образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа The Thermo Scientific Phenom XL G2 Desktop SEM. Максимальное увеличение  $\times 100\,000$ ; разрешение 14 нм; ускоряющее напряжение 5, 10, 15 кВ, детектор обратно рассеянных электронов, ЭДС-приставка.

### ***Результаты исследования и их обсуждение***

Радиопоглощающее покрытие Co-C-Cr (кобальт-углерод-хром) – это тип покрытия, который относится к «магнитодиэлектрическим композитам», сочетающим ферромагнитные (Co, Cr) и диэлектрические (углерод) компоненты. Он эффективно поглощает электромагнитные волны за счет магнитных потерь (Co) и диэлектрических потерь (углерод), а хром (Cr) улучшает адгезию и коррозионную стойкость. В табл. 1 приведены основные свойства применяемых при создании многослойного покрытия химических элементов.

*Таблица 1*

**Компоненты многослойного покрытия и их роль**

| № | Компонент    | Тип материала              | Роль в покрытии                                                                                                                                                |
|---|--------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Кобальт (Co) | Ферромагнетик              | Обеспечивает магнитные потери (гистерезис, резонансное поглощение).                                                                                            |
| 2 | Углерод (C)  | Диэлектрик / полупроводник | Дает диэлектрические потери (поляризационные механизмы). Может быть в виде аморфного углерода (a-C), графена/нанотрубок, карбидов ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ). |
| 3 | Хром (Cr)    | Металл-связка              | Улучшает адгезию к подложке, предотвращает окисление кобальта.                                                                                                 |

В результате эксперимента получено четырехслойное покрытие Co-C-Cr-Co, с толщиной слоев около 1 мкм, рис. 1. На рисунке представлена структура и фазовый состав четырехслойного покрытия, включающего последовательные слои Co-C-Cr-Co. На рис. 1а представлено изображение BF-TEM, которое демонстрирует четкую многослойную структуру, состоящую из четырех контрастных слоев, каждый толщиной около 1 мкм. Границы между слоями четко выражены, что свидетельствует о стабильности осаждения и отсутствии значительной межслойной диффузии.

На рис. 1б показана STEM-EDS карта распределения элементов, которая отображает пространственное распределение основных элементов: Co, Cr и C. Видна строгая локализация каждого элемента в соответствующем слое, что подтверждает успешное формирование целевых композиций без значительного перемешивания.

На рис. 1в показан рентгенофазовый анализ и наличие дифракционных пиков, соответствующих кристаллическим фазам Co и Cr, что указывает на нанокристаллическое состояние металлических слоев. Также не наблюдаются пики оксидов или других соединений, что подтверждает чистоту покрытия и отсутствие заметного окисления. Пик кремния соответствует материалу подложки, представляющей собой кремниевую пластину.

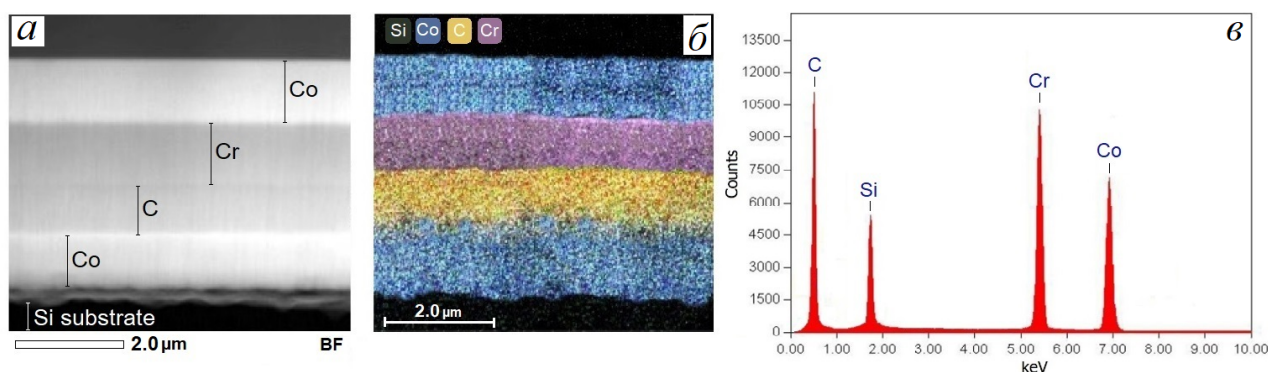


Рис. 1. Структура четырехслойного покрытия Co-C-Cr-Co

СЭМ исследование поверхностных слоев, после каждого цикла напыления покрытия указывает на наличие его нанокompозитной структуры. На рис. 2 приведено типичное изображение микроструктуры покрытия, которое имеет идентичный характер для всех компонентов слоев.

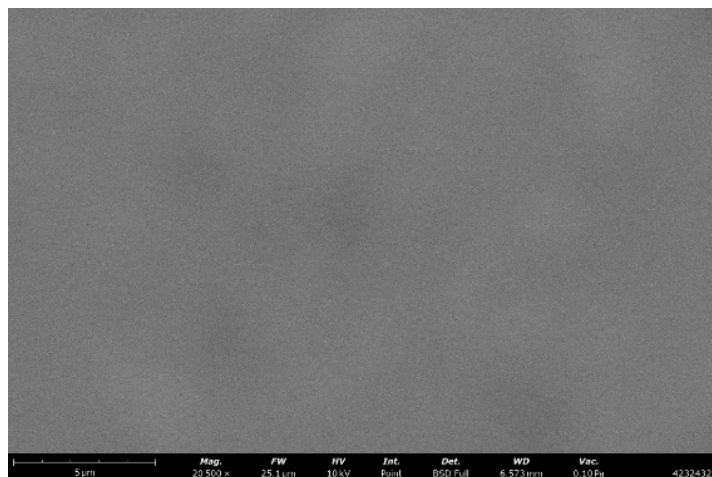


Рис. 2. СЭМ изображение микроструктуры поверхности покрытия Co

Из рис. 2 следует, что микрокристаллиты, формирующиеся в процессе вакуумного напыления, имеют размеры менее 100 нм. Структура представляет собой упорядоченные кристаллические решетки.

Механизмами поглощения электромагнитных волн в таком покрытии являются магнитные потери (Co) и его гистерезисные потери в переменном магнитном поле. Известно о проявлении ферромагнитного резонанса на частотах 2–18 ГГц для наночастиц Co [18]. Углерод (C) вносит диэлектрические и поляризационные потери (электронная и ионная поляризация). При наличии графитовых кластеров возникает проводимость аморфного углерода. В многослойных структурах происходит гашение отраженной волны.

Проведена оценка механических и эксплуатационных свойств полученного многослойного покрытия Co-C-Cr-Co. Результаты измерения микротвердости по диагонали подложки указывают на значение 8 – 10 ГПа, что является отличным показателем.

Для определения прочности сцепления покрытия с подложкой на поверхность покрытия припаивали серебряные штырьки, паяные образцы закрепляли в приспособлении на разрывной машине и при помощи захвата прикладывали нагрузку на вывод до его отрыва. Значение прочности сцепления покрытия с подложкой определяли по значению показаний динамометра разрывной машины, при котором произошел отрыв вывода от покрытия. Также, помимо прочности сцепления покрытия с подложкой, производили оценку характера отрыва, для этого к покрытию припаивали никелевую пластину толщиной 0,1 мм и при помощи пинцета отрывали ее от поверхности подложки, как показано на рис. 3.

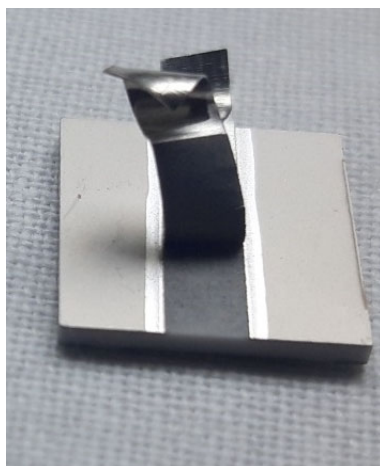


Рис. 3. Фотография металлизированной подложки и припаянного никелевого вывода в процессе его отрыва от подложки

По результатам измерения прочности сцепления покрытия с подложкой, адгезия составляет  $> 50$  МПа, по-видимому такое высокое значение адгезии достигается за счет присутствия хрома.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента отражения  $S_{11}$  в логарифмической шкале (LogMag) от частоты в диапазоне 8,2 – 12,4 ГГц. Коэффициент  $S_{11}$  (LogMag) выражается в децибелах (dB) и показывает уровень отражения сигнала. При этом, чем ниже значение, тем меньше отражение и лучше поглощение электромагнитной энергии. Если  $S_{11} > -3$  дБ, то отражается более 50% энергии, а если  $S_{11} < -10$  дБ, то поглощается более 90% энергии, что является хорошим показателем. График для четырехслойного покрытия Co-C-Cr-Co демонстрирует следующие минимумы коэффициента отражения (наилучшее поглощение): 8,4 ГГц, что говорит о том, что около 70% энергии поглощается покрытием; следующий минимум при 9,6 ГГц соответствует поглощению около 75%; около 10,5 ГГц соответствует поглощению 80%; последний наблюдаемый минимум около 11,8 ГГц говорит о достаточно хорошем поглощении.

При этом наблюдаются максимумы коэффициента отражения (низкий уровень поглощения) в диапазонах 8,2-8,5 ГГц и 9-9,2 ГГц, выше  $-3$  дБ, что говорит о том, что более 50% энергии отражается обратно. График данного четырехслойного покрытия демонстрирует узкополосное поглощение, так как коэффициент  $S_{11}$  достигает значительных минимумов только в отдельных точках. Между этими частотами поглощение ухудшается ( $S_{11}$  повышается), что говорит о недостаточном согласовании слоев и резонансном характере работы покрытия.

Механизм поглощения электромагнитных волн в покрытии Co-C-Cr-Co происходит за счет комбинации «магнитных», «диэлектрических» и «резистивных потерь», а также интерференционных эффектов. Рассмотрим каждый механизм детально.

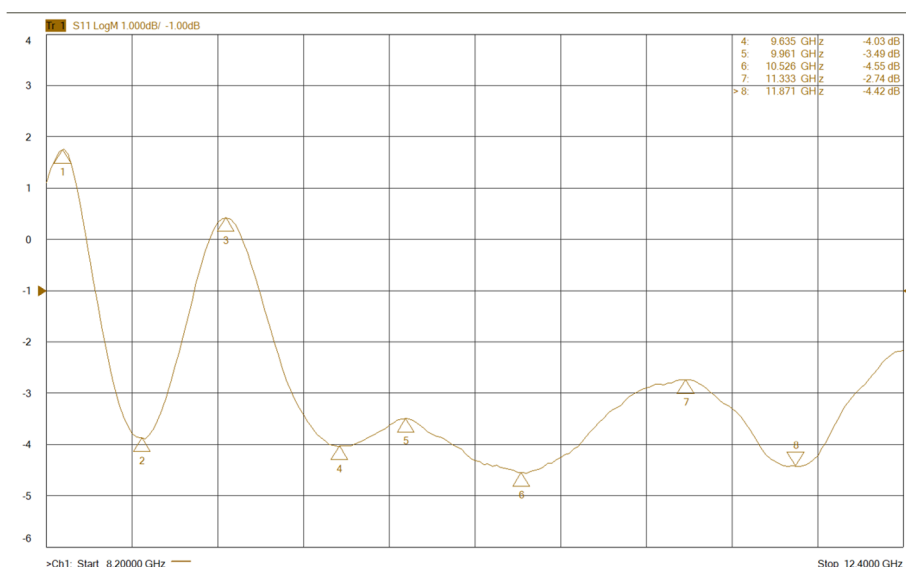


Рис. 4. Потери на отражение (S11 LogMag) четырехслойного покрытия Co-C-Cr-Co

Магнитные потери (доминирующий вклад кобальта). Кобальт (Co) – ферромагнетик с высокой коэрцитивной силой. При воздействии переменного магнитного поля его домены перемагничиваются, но с запаздыванием (гистерезис). Энергетические потери оцениваются работой, затрачиваемой на перемагничивание, которая преобразуется в тепло:

$$W_{\text{ГИСТ}} = \int \mu_0 H dM$$

где ( $M$ ) – намагниченность,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

В зависимости от частоты в диапазоне 8 – 12 ГГц гистерезисные потери максимальны из-за высокой скорости изменения поля.

Наблюдаемые пики возникают, возможно, по причине ферромагнитного резонанса при условии, когда резонансная частота внешнего поля совпадает с частотой прецессии спинов в Co:

$$f_{\text{рез}} = \gamma \cdot H_{\text{эфф}}$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $H_{\text{эфф}}$  – эффективное поле (включает анизотропию и размагничивающие поля). Для наночастиц Co резонанс наблюдается в диапазоне 8 – 12 ГГц.

Углерод, в свою очередь, вносит вклад в диэлектрические потери, происходит электронная поляризация – смещение электронных облаков в углеродных кластерах ( $sp^2$ -гибридизация) под действием поля  $E(t)$ . При наличии связей C-Cr или C-Co, где легкие ионы углерода смещаются относительно тяжелых металлов, возможно возникновение ионной поляризации. В аморфном углероде (a-C) есть дипольные моменты, которые переориентируются с запаздыванием:

$$\tan \delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

где  $\varepsilon''$  – мнимая часть диэлектрической проницаемости. Если углерод содержит графитовые домены, также возникают джоулевы потери, а при содержании углерода  $>15\%$  могут образовываться проводящие пути, усиливая поглощение.

Присутствие Cr предотвращает окисление Co и формирует карбиды ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), которые повышают твердость. Cr имеет промежуточное волновое сопротивление между Co и C, снижая отражение от границы раздела.

Так как наше покрытие состоит из чередующихся слоев Co-Cr-C и Co, то происходит деструктивная интерференция, т.е. волны, отраженные от разных границ, гасят друг друга, при условии минимума отражения:

$$2d\sqrt{\varepsilon\mu} = \frac{\lambda}{2},$$

где  $d$  – толщина слоя;  $\lambda$  – длина волны.

При многократном отражении электромагнитная волна затухает при прохождении через слои с разным  $\varepsilon$  и  $\mu$ . В диапазоне низких частот, до 9 ГГц, доминирующим механизмом являются гистерезисные потери Co, в многослойном покрытии происходит перемагничивание крупных доменов. С увеличением частоты электромагнитного поля до 12 ГГц наступает ферромагнитный резонанс Co и поляризация углерода C, в многослойном покрытии происходит резонанс наночастиц Co и дипольная релаксация, что, в целом, приводит к резонансному характеру работы покрытия в исследуемом диапазоне частот.

### ***Заключение***

Полученное четырехслойное покрытие Co-C-Cr-Co характеризуется многослойной структурой с четким разделением по составу и комбинированным структурно-фазовым состоянием. Металлические слои (Cr и Co) находятся в нанокристаллическом состоянии с возможной текстурой в поверхностных участках. Межфазные границы – четкие и стабильные, без признаков диффузии и образования интерметаллических фаз. Создана структура с чередованием аморфных и кристаллических фаз, резкие границы между слоями усиливают рассеяние и поглощение электромагнитных волн. По результатам исследования, вакуумные методы нанесения таких покрытий обеспечивают высокую точность, однородность и адгезию на уровне 50 МПа, что критически важно для их эффективности.

Исследование поглощающих характеристик четырехслойного покрытия Co-C-Cr-Co демонстрирует следующие минимумы коэффициента отражения (наилучшее поглощение): 8,4 ГГц, что говорит о том, что около 70% энергии поглощается покрытием; следующий минимум при 9,6 ГГц соответствует поглощению около 75%; около 10,5 ГГц соответствует поглощению 80%; наблюдаемый минимум около 11,8 ГГц говорит о достаточно хорошем поглощении. Таким

образом, при проектировании радиопоглощающих многослойных покрытий ключевую роль играют магнитные потери  $S_o$  (гистерезис), диэлектрические потери  $S$  (поляризация и проводимость), синергия  $Sr$  (импедансное согласование и защита от окисления).

Согласно проведенным исследованиям, данные материалы можно применять в системах, где необходимо подавлять отражение на определенных частотах (например, в многодиапазонных радиочастотных экранах или устройствах подавления помех), для решения задач защиты информации, путем создания «электрических подписей» с использованием наноструктурированных покрытий, при создании электронных меток и ключей шифрования и т.д.

По результатам исследования выявлено, что для получения эффективных радиопоглощающих покрытий такого рода ключевое значение имеют: подбор состава и структуры, обеспечивающей электромагнитные потери; контроль фазового состояния и морфологии; оптимизация толщины и архитектуры слоев. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят создавать более легкие, тонкие и эффективные материалы для радиопоглощения в широком частотном диапазоне.

### *Благодарности*

Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № AP19680101.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров В., Николайчук Г., Яковлев С., Луцев Л. «Исследование радиопоглощающих свойств материалов на основе наноструктур». Компоненты и технологии № 12.– 2008. С. 141 – 146.
2. Казанцева, Н. Е. Перспективные материалы для поглотителей волн сверхвысокочастотного диапазона / Н. Е. Казанцева, Н. Г. Рывкина, И. А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 2. – С. 196–209.
3. Дринберг А.С. «Влияние электромагнитного излучения на различные материалы и покрытия (обзор)» Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). № 38(64).– 2017. С. 19-24.
4. Иванов А., Смирнов Б. «Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование». Промышленные нанотехнологии. НаноИндустрия.– №6.– 36. 2012.– С. 28 – 34.
5. Шенгуров В.Г., Денисов С.А., Чалков В.Ю. (сост.) Молекулярно-лучевая эпитаксия кремния и кремний-германия: Учебно-методический комплекс.– ННГУ 2010. – С. 37 – 43.
6. Mattox, D. M. «Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing». Elsevier. – 2010. – 15p.
7. Wang, L. et al. «Magnetron sputtered graphene-based composites for microwave absorption» // Carbon. – 2021. – Vol.7. – P 1-24.
8. US Patent 9.874.567 – «Multilayer radar-absorbing coating deposited by magnetron sputtering».
9. Liu X. et al. «Broadband microwave absorption of Fe/C nanocapsules» // J. Appl. Phys. – 2010. Vol. 95. – Ed.2. – P. 23114.
10. Lutsev L. V., Kazantseva N. E., Tchmutin I. A., Ryvkina N. G., Kalinin Y. E., Sitnikoff A. V. Dielectric and magnetic losses of microwave electromagnetic radiation in granular structures with ferromagnetic nanoparticles // J. Phys.: Condensed Matter. – 2003. Vol. 15. No. 22. – P. 3665–3681.

11. Луцев Л. В. Спиновые возбуждения в гранулированных структурах с ферромагнитными наночастицами // ФТ. – 2002. – № 44 (1) . – С. 97 – 105.
12. Lutsev L. V., Yakovlev S. V., Siklitsky V. I., Zvonareva T. K. Microwave properties of amorphous carbon structures with ferromagnetic Co nanoparticles // Abstracts of Invited Lectures & Contributed Papers, 6th Biennial International Workshop «Fullerenes and Atomic Clusters», IWFAC'2003, St. Petersburg, June 30, July 4. –2003. – P. 1 – 6.
13. Николайчук Г. А., Яковлев С. В., Луцев Л. В., Петров В. В. Цветкова Е. А., Мороз О. Ю., Наквасина Е. Ю., Трифонов С. А. Широкополосные многослойные поглощающие покрытия на основе напыленных структур гидрогенизированного углерода с магнитными наночастицами 3d-металлов // 18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. Том 2. Севастополь, Украина. – 2008. – С. 147 – 150.
14. Басков К.М. Метаматериал с повышенной механической прочностью и диэлектрической проницаемостью близкой к единице // Журнал радиоэлектроники. – 2013. № 9. – С. 30 – 37.
15. Meng Y., Zhang Z., Wang X., Hou X., Wang T., Guo X., Liu X., Tian M., Qu L., Wang L., Zhang X. «Flexible, superhydrophobic, and self-cleaning rGO/LDH/PPy-modified fabric for full X-band electromagnetic wave absorption». Composites Part B: Engineering. – Vol. 282.1 . – 2024. – P 111572.
16. Петров В. В, Николайчук Г. А., Яковлев С. В., Луцев Л. В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение // Компоненты и технологии. – 2008. – № 10. – С. 147 – 150.
17. Латыпова А. Ф. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов / А. Ф. Латыпова, Ю. Е. Калинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. № 6. – С. 70–76.
18. Моргунов Р.Б., Дмитриев А.И., Джардималиева Г.И., Помогайло А.Д., Розенберг А.С. и др. «Ферромагнитный резонанс кобальтовых наночастиц в полимерной оболочке». ФТТ. – 2007. – Т.49, вып. 8. – С. 1436 – 1441.

© Н. В. Прохоренкова, А. М. Жилкашинова, А. В. Троеглазова, 2025