

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.5>

УДК: 537.533

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ Ar и CO₂ ПРИ НАПЫЛЕНИИ ПЛЕНОК (Ba,Sr,Ca)CO₃ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ И ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА

Г.А. Жабин¹, Б.А. Логинов², А.Б. Логинов³, К.В. Шичалин⁴

¹ АО «НПП «Исток» им. Шокина»,
141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, 2а.

² Национальный исследовательский университет МИЭТ,
124498, г. Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1

³ МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1

⁴ ООО «ЭПОС – Инжиниринг»,
630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, д.1

Статья поступила в редакцию 6 марта 2025 г.

Аннотация. В работе исследовано влияние состава газовой смеси Ar+CO₂ на изменение химического состава и морфологии эмиссионных покрытий, осажденных с применением ионно-плазменного метода при температуре подложкодержателя 150-208 °С. С применением сканирующей зондовой микроскопии исследованы размер зерна и шероховатость поверхности пленки. Химический состав напыленных пленок (Ba,Sr,Ca)CO₃ исследован с использованием энергодисперсионного рентгеновского анализа. При увеличении в газовой смеси концентрации диоксида углерода зерна пленки укрупняются до 1980 нм и удлиняются, обнаруживая внутреннюю стержневую наноструктуру со средним поперечным размером нанозерен до 181 нм. Показано влияние состава газа на процесс осаждения и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных микрокатодов.

Ключевые слова: ионно-плазменное напыление, сканирующая зондовая микроскопия, морфология поверхности, эмиссионные характеристики, молекулярно-напыленный оксидный микрокатод, срок службы.

Автор для переписки: Жабин Геннадий Анатольевич, zhabingennady@yandex.ru

Введение

Тонкопленочные эффективные эмиттеры, применяемые в циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ) в настоящее время получают с применением ионно-плазменного напыления. Срок службы молекулярно-напыленных оксидных катодов (МНОК) с плотностью токоотбора $1-2 \text{ А/см}^2$ в непрерывном режиме может достигать до 10 тысяч часов и более. Оптимальная толщина эмиссионного покрытия может составлять $\approx 0,8-1,4 \text{ мкм}$. [1,2].

В работе [3] представлены результаты исследования влияния температуры мишени и давления газа при напылении эмиссионного покрытия микрокатодов на морфологию, микроструктуру и эмиссионные свойства МНОК. Используя методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) установлено, что с уменьшением давления смеси газа в диапазоне $0,13-0,08 \text{ Па}$ возрастает плотность покрытия и размер зерен, уменьшается шероховатость, что влияет на эмиссионные свойства. Микроструктура покрытия в поперечном размере имеет колонообразную микроструктуру. Размер зерен для газа $\text{Ar}+\text{CO}_2$ составил $50-58 \text{ нм}$, а напыление в смеси $\text{Xe}+\text{CO}_2$ позволило получить размер зерен 80 нм . Среднеквадратичная шероховатость при напылении с Xe составила $78-93 \text{ нм}$, а в смеси с Ar – 30 нм .

В вышеперечисленных работах процентное соотношение инертного газа в смеси $\text{Ar}+\text{CO}_2$ составляло 50% .

В работе [4] авторами показано, что в зависимости от размеров нанокристаллитов оксида бария, на их поверхности могут формироваться домены различных типов, поверхность которых обогащена скандием. Величина работы выхода доменов зависит от их типа, т.е. фактически от размера нанокристаллитов оксида бария, и может изменяться в зависимости от

технологии изготовления катода, режима его активирования и режима эксплуатации катода.

В работе [5] с применением зондовой микроскопии исследованы закономерности изменения морфологии пленок высокотемпературных металлов при прогреве в условиях открытого космоса. Показано, что пленки становятся менее рыхлыми, а мелкие зерна увеличиваются в размере. Так, пленки вольфрама со средней шероховатостью 5,8 нм, после прогрева до 400 °С имели шероховатость 4,2 нм. Средний размер зерна увеличился с 154 нм до 1356 нм.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния изменения процентного соотношения ($\text{Ar}+\text{CO}_2$) газовой смеси на морфологию поверхности МНОП и эмиссионные свойства МНОК. Поверхностные наноструктуры исследовались с применением сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ).

1. Методика экспериментов

Мишени $(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca})\text{CO}_3$ для ионно-плазменного напыления изготавливали методом пульверизации из карбоната марки КТА-1-6-сп [6]. Соотношение активных элементов ЩЗМ в ней составляло 47:45:8, толщина покрытия мишеней 132 мкм. Напыление проводилось на автоматизированной установке вакуумного ионно-плазменного напыления «ПРНТ 0143», Россия. Геометрические размеры, принцип работы и основные электрические параметры рабочей камеры данной установки и описанной в работах [2,3] одинаковы.

Турбомолекулярный насос имел скорость откачки 700 л/с. Предельный уровень вакуума – $6 \cdot 10^{-7}$ Па. Измерение давления проводилось форвакуумным вакуумметром «МТР4D-KF16» и широкодиапазонным вакуумметром «МТМ 9D» с датчиком Пирани. Система подачи газов осуществлялась двумя каналами через регуляторы расхода газа РРГ-10. Выходы с каждого канала газонапуска объединены позволили создавать в рабочей камере газовую смесь заданной пропорции. В качестве рабочего газа использовалась смесь $\text{Ar}+\text{CO}_2$. Эксперименты проводились для двух случаев. В первом процентное соотношение Ar/CO_2 составило 55/45, во втором – 45/55. Пленка осаждалась с

мишени после полного разложения карбонатов в течение 90 минут на горизонтально расположенные на подложкодержателе чистые полированные образцы Si (111) («свидетели») размером 4х6 мм и вращающиеся микрокатоды косвенного накала с керном из сплава WRe-20. Шероховатость поверхности кремния составляла 2 нм.

Для исследований микрорельефа использовался «Микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000» (№46918 в Гос.реестре средств измерений РФ), изготовитель АО «Завод ПРОТОН», г. Зеленоград (www.microscopy.su). Кадры топографии поверхности получены в режиме АСМ. В качестве зондов использованы кантилеверы с радиусом закругления острия 10 нм марки «CSG-01» (Швейцария). Достигаемое разрешение – до 4 нм по латеральным размерам рельефа и до 0,02 нм по высотам рельефа.

Химический состав напыленных образцов исследовался на сканирующем электронном микроскопе «JEOL 6700F», с приставкой энергодисперсионного анализа (ЭДА) «Bruker Quantax 200» с ускоряющим напряжением 15 кэВ, током 1 нА.

Были выбраны 2 режима (способа) напыления с постоянным давлением Р смеси газов равным 0,15 Па. Методики разложения карбонатов, входа в режим напыления и проведения процесса осаждения в течение 3 часов были одинаковы. Главное отличие в режимах заключалось в составе смеси газов. Напряжение разряда составляло 810-820 В, ток разряда был равен 205-220 мА, напряжение накала мишени 25 В. Температура подложкодержателя составляла 150-208 °С. Во время осаждения покрытий были получены партии №1 и №2 экспериментальных образцов покрытия и микрокатодов. Отбор тока с микрокатодов происходил в отпаянном приборе на стенде термоэмиссионной тренировки в непрерывном режиме с подачей на подогреватель катода тока накала, а на анод ускоряющего напряжения.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рисунке 1 приведены результаты анализа изображений и исследование шероховатости покрытий, сделанные с использованием CMM-2000. На рис. 1,а,б представлены 2D (а) кадр образца 1 размером 4х4 мкм и его 3D-изображение (б). Разброс высот по кадру составил около 348 нм. На рис. 1,в,г представлены 2D (в) кадр образца 2 размером 4х4 мкм и его 3D-изображение. Разброс высот по кадру равен около 556 нм.

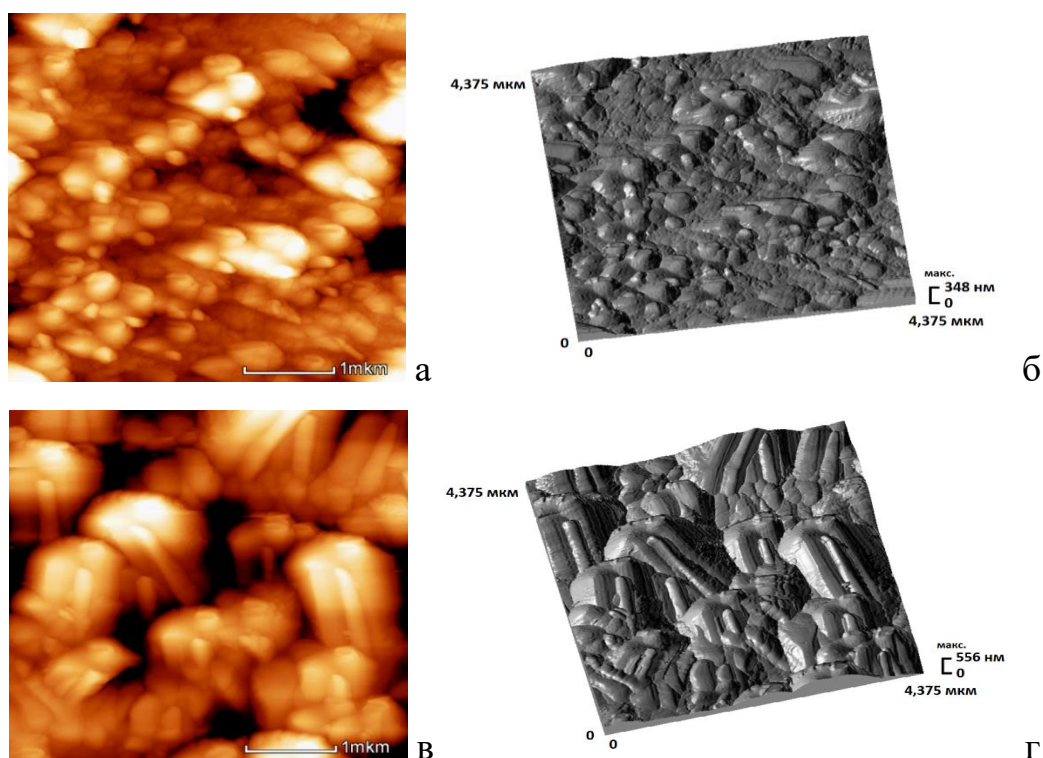


Рис. 1. Полученные на микроскопе CMM-2000, 2D и 3D изображения морфологии поверхности покрытия осажденного в смеси (Ar/CO₂) на подложках Si при разном составе газа: а,б – 55/45; в,г – 45/55.

На рис. 2,а, представлена кривая шероховатости образца 1 по кадру. Анализ кадра на параметры шероховатости показал среднюю шероховатость $R_a = 22,8$ нм, средний размер зерна $S_m = 1000$ нм, средний размер субзерна (нанозерен из которых состоит зерно) $S = 83,5$ нм.

На рис. 2,б, представлена кривая шероховатости образца 2. Среднюю шероховатость $R_a = 77$ нм, средний размер зерна $S_m = 1,98$ мкм, средний размер субзерна $S = 181$ нм.

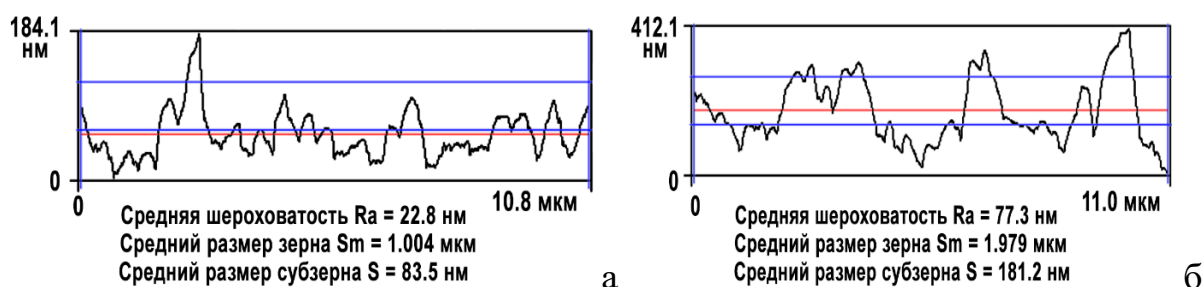


Рис. 2. Шероховатость поверхности пленки, осажденной в смеси (Ag/CO_2) на подложках Si при разном составе газа: а – 55/45; б – 45/55.

На рис. 3а показан график профиля сечения кадра образца 1. Измеренная по нему полуширина одного из зерен (при высоте около 60 нм) оказалась около 92 нм.

На рис. 3б представлен график профиля сечения кадра образца 2. Полуширина одного из зерен (при высоте около 69,8 нм) составила около 126 нм.

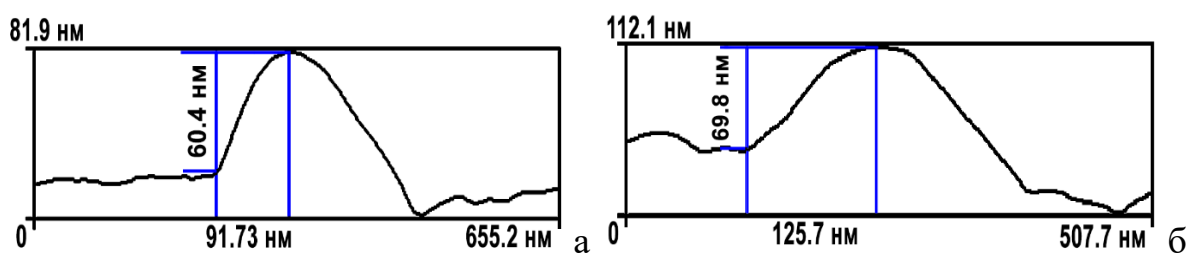


Рис. 3. Профили сечения кадров образцов 1(а) и 2(б) и измеренные по ним полуширины зерен.

Гранулометрический анализ образца 1 (рис. 4) показал, что частицы имеют диаметры примерно от 35 нм до 560 нм с медианным значением около 167 нм. Гранулометрический анализ образца 2 показал, что диаметры частиц примерно от 40 нм до 985 нм с медианным значением около 220 нм.

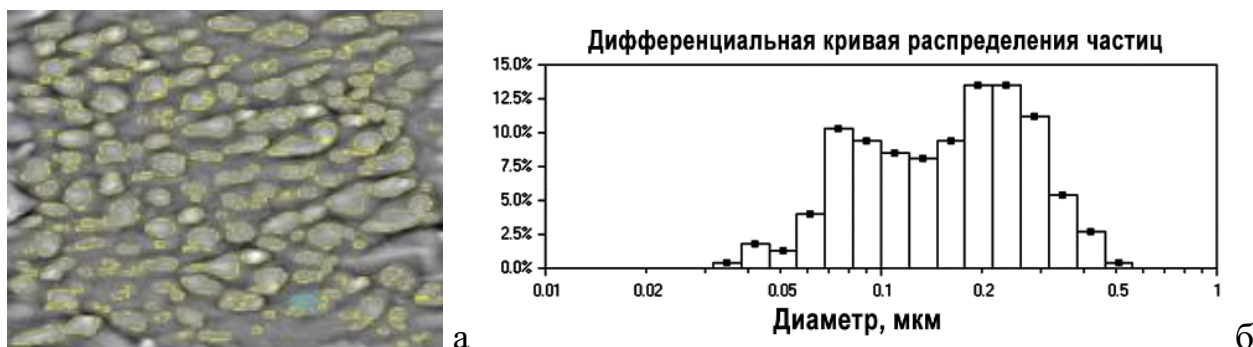


Рис. 4. Исследование гранулометрического состава образца 1.

Проведено исследование состава образцов 1 и 2 на СЭМ с энергодисперсионной приставкой «JEOL EDS System». Данные по химическому составу помещены в таблицы 1 и 2. Образец 1, напыленный при соотношении газов в смеси Ar/CO₂ 55/45 показал меньшую концентрацию Ba, чем образец 2, с постоянным соотношением 45/55. Соотношение масс.% элементов Ba/O в первом образце составило 1,18, а во втором – 1,33. Соотношение Ba/C в образце 1 равно 3,8, во втором – 4,37. Соотношение Ba/Sr в образце 1 составило 1,46; в образце 2 – 1,75.

Таблица 1. Химический состав МНОП на образце 1.

Элемент	Масс. %	Масс. норм. %	Атом %	Абс. Погреш. %	Отн. Погреш. %
C	9,72	9,34	24,25	1,42	14,62
O	31,07	29,86	58,21	3,68	11,84
Ca	1,14	1,09	0,85	0,06	5,61
Sr	25,20	24,22	8,62	1,04	4,14
Ba	36,94	35,50	8,06	1,09	2,90

Таблица 2. Химический состав МНОП на образце 2.

Элемент	Масс. %	Масс. Норм. %	Атом. %	Абс.Погреш. %	Отн.Погреш. %
C	8,68	8,87	23,64	1,28	14,74
O	28,55	29,17	58,38	3,39	11,87
Ca	1,05	1,07	0,85	0,06	5,82
Sr	21,68	22,15	8,09	0,90	4,16
Ba	37,93	38,75	9,04	1,12	2,96

Микрокатоды с осажденным покрытием при разных режимах напыления установили в катодно-подогревательный узел макета ЦЗУ. На откачном посту в вакууме не хуже $1,1 \cdot 10^{-8}$ мм рт.ст. происходило разложение карбонатов эмиссионного покрытия путем термической диссоциации и формирование окислов. Характеристики сняты в режиме ускоряющего напряжения на аноде 22 В, на управляющем электроде 5 В. На рис. 5 показаны эмиссионные характеристики микрокатодов, напыленных по режиму 1 и 2 и кривые долговечности.

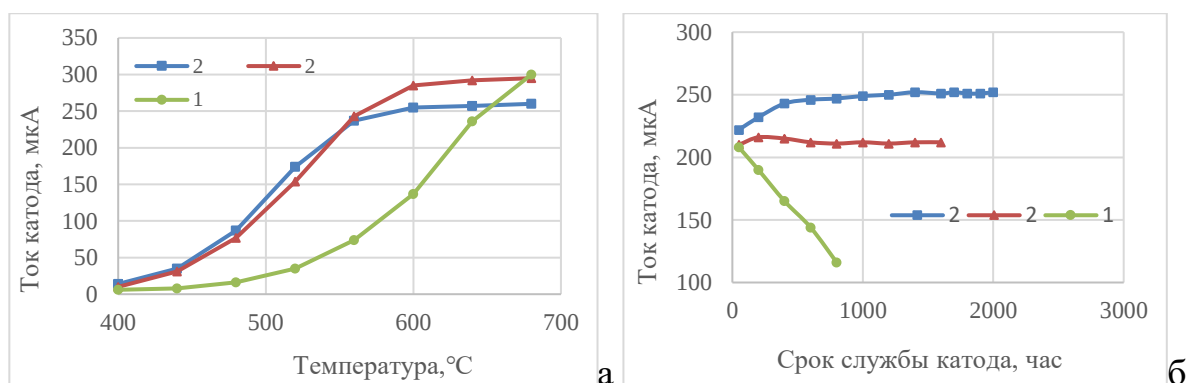


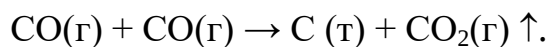
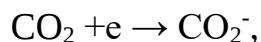
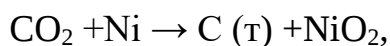
Рис. 5. Эмиссионные характеристики: а-сравнение характеристик МНОК, напыленных по режиму 1 и 2; б-кривые долговечности микрокатодов, напыленных по режиму 1 и 2.

Из рис. 5а следует, что МНОК, напыленный при концентрации газа CO_2 в смеси равной 45 % имеют более высокую температуру в рабочей точке ($\approx 700^\circ\text{C}$), чем катоды при соотношении газов Ar/CO_2 равном 45/55 ($600\text{--}620^\circ\text{C}$), а значит у первого катода меньший срок службы. При температуре 560°C ток микрокатада 1 составил 74 мкА, в то время как у других равен 243 мкА. Долговечность МНОК, изготовленных вторым способом в настоящее время составляет 2000 и 1600 часов (рис. 5б). Другие микрокатоды, напыленные первым способом показали также падение тока и короткий срок работы.

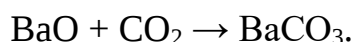
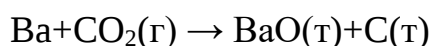
В процессе распыления мишени перенос атомов от нее к подложке происходит за счет образования направленного потока частиц, рассеяния на атомах рабочего газа и диффузионного движения атомов на подложку. В результате бомбардировки мишени ионами газа, они проникают в структуру ее материала, где возникают упругие столкновения атомов и ионов, обмен энергией и импульсом между ними, что способствует преодолению сил связи атомов мишени.

В процессе разложения карбонатов ($800\text{--}850^\circ\text{C}$) и последующего распыления стехиометрический состав поверхности мишени изменяется, что влияет на осаждаемую пленку.

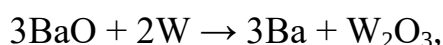
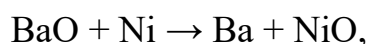
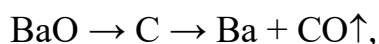
При ионно-плазменном распылении горячей карбонатной мишени на никелевом керне в рабочей камере возможны следующие реакции:



Захват распыляемыми частицами ЩЗМ молекул CO_2 ведет к образованию кластеров и карбонизации напыляемой пленки по типу реакций:



Таким образом, диоксид углерода является источником атомарного углерода, который обнаружен в осажденном покрытии. Нанопримеси Ni и C поступающие в покрытие в ходе ионно-плазменного распыления мишени способствуют генерации свободного Ba в микрокатоде. Такую же активирующую функцию выполняют атомы W при контакте BaO с керном вольфрамениевого катода. Реакции разложения карбонатов [7] ЩЗМ в напыленном покрытии при термоактивировании МНОК имеют вид:



Повышение давления рабочего газа при напылении МНОП приводит к уменьшению скорости доставки компонентов мишени и скорости роста пленки. Температура мишени и подложкодержателя при формировании пленок также влияет на состав и эмиссионные характеристики МНОК [3].

При сильных источниках осаждаемого вещества преобладающим механизмом массопереноса является поверхностная диффузия, а при слабых массоперенос осуществляется диффузией атомов через газовую фазу. Изменяя давление газа в процессе осаждения многокомпонентной пленки можно по-разному влиять на длину термализации атомов различных масс, плотность потока и скорость их доставки [8].

Торнтон [9,10] выделил три основные типа структур. При низких температурах подложки, до 600 °С пленка состоит из колонн, разделенных порами. Интенсивная бомбардировка энергичными ионами подавляет рост пор между колоннами, они являются плотными колончатными. При более высоких энергиях частиц покрытия имеют более высокую плотность и состоят из кристаллических зерен с равными размерами. Позднее модель была дополнена и разделена на 5 зон в зависимости от условий напыления и гомологической температуры [11].

При напылении по 1 режиму происходит бомбардировка ионами с большой энергией $\approx 110-130$ эВ и увеличивает подвижность адсорбированных атомов мишени на подложке, снижая затеняющий эффект колончатой структуры, что приводит к уплотнению пленок и уменьшению размеров кристаллитов Ва.

Увеличение концентрации молекул CO_2 в режиме 2, из-за процессов диффузионного воздействия реактивного газа, с одной стороны, несколько уменьшило энергию осаждающихся частиц. Однако ее достаточно, чтобы адсорбционные атомы на подложке, захватывая большее количество атомов кислорода и углерода приобрели способность объединяться в зародыши, преодолевая барьер поверхностной диффузии и сформировали кластеры, что привело к укрупнению зерен пленки.

В работе [12] показано, что повышение скорости осаждения и концентрации атомов бария в кристаллитах оксида бария, легированного микропримесями Ni, за счет увеличения мощности разряда при напылении эмиссионных покрытий на МНОК позволило увеличить эмиссионную способность микрокатодов на пассивных и активных металлических кернах.

Полученные экспериментальные данные показали, что при осаждении эмиссионных покрытий в смеси газов, где концентрация диоксида углерода 45 % синтезируются плотные пленки с размером субзерна 83,5 нм и шероховатостью $R_a = 22,8$ нм.

Повышение концентрации газа CO_2 с 45 до 55 % при реактивном напылении привело к росту размера субзерен до 181 нм и повышению шероховатости до $R_a = 77$ нм.

Анализ эмиссионных свойств МНОК показал, что микрокатоды из партии №2 обладают лучшей эмиссионной стабильностью тока, меньшей рабочей температурой и большим прогнозируемым сроком службы.

При отборе тока в режиме насыщения у поверхности молекулярно-напыленного катода с большей шероховатостью должен сильнее проявляться эффект Шоттки, выражающийся в уменьшение работы выхода электронов под действием внешнего ускоряющего электрического поля. Увеличение размера нанозерен с 83,5 до 181 нм и шероховатости поверхности с 22,8 до 77 нм, увеличивает эффективную поверхность катода и приводит к концентрации поля на выступах и увеличению тока эмиссии. При проведении исследования в обеих партиях МНОП пор размером более 10 нм не обнаружено. Представляется, что плотность покрытия, напыленного по 1 способу может составлять 4 г/см^3 и более, что может затруднять диффузионные процессы. В структурах с более крупными субзернами при температурном активировании микрокатодов в вакууме разложение карбонатов МНОП и удаление из слоя молекул кислорода и CO_2 проходит с меньшей энергией активации и большей скоростью. Поэтому улучшение эмиссионных свойств микрокатодов напыленных по 2 способу можно объяснить следующим образом. Более полное удаление из покрытия ионов кислорода способствует эффективному образованию донорных уровней в нанокристаллитах оксида бария [4], легированного нанопримесями ЦЗМ и атомами С, Ni и W. В результате работа выхода электронов с поверхности пленки может понизиться до 1,3-1,34 эВ [12].

Следует отметить различную температурную зависимость испарения и диффузии атомов Ва. В более плотном, беспористом покрытии, напыленном по 1 режиму при низкой рабочей температуре МНОК (600°C) испарение и миграция атомов бария будут преобладать над процессами его диффузии и в этом случае подпитка поверхности катода активным Ва из более нижних слоев

будет ограничена. Поэтому на кривой 1 на рис. 5а, в низкотемпературной области характеристики ток микрокатода низкий и только при значительном повышении температуры он растет из-за увеличения скорости диффузии и генерации свободного Ва.

Заключение

С применением сканирующей зондовой микроскопии исследованы напыленные на Si (111) пленки $(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca})\text{CO}_3$ толщиной 2,7 мкм с поверхностными наноструктурами различных размеров, варьирующихся по высоте от 348 до 556 нм. Формы зерен и субзерен имеют вид от круглых и удлиненных каплеобразных при режиме 1 до стержнеобразных с внутренними наностержнями (режим 2). Полиморфизм свидетельствует о способности к кластеризации и росту зерен в зависимости от состава смеси газа и температуры мишени и подложки.

Проведенные исследования показали, что пленки, осажденные по режиму 1 более плотные с зернами до 1000 нм. Средняя шероховатость составила 22,8 нм, размер нанозерен – 83,5 нм.

При увеличении в газовой смеси концентрации диоксида углерода зерна пленки укрупняются до 1980 нм и удлиняются, обнаруживая внутреннюю стержневую наноструктуру со средним поперечным размером нанозерен до 181 нм. Поверхность пленки стала более рыхлой, шероховатость возросла до 77 нм. Разнообразие форм и размеров зерен свидетельствует о том, что некоторые наноструктуры являются промежуточными к формированию более крупных. МНОК, напыленные по режиму 2 имеют рабочие температуры 600-620 °С, стабильные эмиссионные свойства, а долговечность одного из них на данный момент составила более 2000 часов.

Хорошие эмиссионные свойства МНОК при втором способе напыления связаны с повышенным содержанием атомов Ва и созданием в синтезируемом покрытии оптимальной наноструктуры, позволяющей при проведении термо- и токового активирования и разложения карбонатов ЩЗМ в высоком вакууме

эффективно удалять молекулы O и CO₂. Образующиеся при этом вакансии кислорода в кристаллитах оксида бария, легированного нанопримесями, влияют на донорные уровни, ответственные за эмиссию в микрокатоде и понижение его работы выхода.

Литература

1. Лобанов В.М. и др. Полевая электронная спектроскопия молекулярно-напыленного оксидного термокатада // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.8>.
2. Жабин Г.А., Иваненко И.П. Долговечность молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройства // Прикладная физика. – 2020. – №. 6. – С. 73 – 79.
3. Жабин Г.А. и др. Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2020. – №. 1. – С. 46-55.
4. Капустин В. И. и др. Теория термоэлектронной эмиссии скандатных катодов // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – №. 1. – С. 161-170. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.01.48679.165-195>
5. Логинов Б.А. и др. Наблюдение изменения морфологии пленок высокотемпературных металлов в сканирующем зондовом микроскопе при прогреве в условиях открытого космоса // Наноиндустрия. – 2024. – Т. 17. – № 2. – С. 90-97. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.2.90.97>
6. Капустин В.И. и др. Технология синтеза и электронная структура тройных карбонатов бария-стронция-кальция для катодов СВЧ-приборов // Российский технологический журнал. – 2022. 10(6). – С. 60-69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-60-69>
7. Лобанов В.М. и др. Особенности эмиссии и полевая электронная спектроскопия оксидного термокатада // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.6>

8. Тумаркин А.В., Разумов С.В., Вольпяс В.А. и др. Термостабильные сегнетоэлектрические конденсаторы на основе градиентных пленок титаната бария-стронция // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – Вып. 10. – С.1585–1591. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.10.45005.2168>
9. Thornton J.A. Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings // Journal of Vacuum Science & Technology. – 1974. – V. 11. – № 4. – PP. 666 – 670. <https://doi.org/10.1116/1.1312732>
10. Thornton J.A. The microstructure of sputter- deposited coatings // Journal of Vacuum Science & Technology.A. – 1986, 4(6). – P.P. 3059 – 3065. <https://doi.org/10.1116/1.573628>
11. Mahieu S., Ghekiere P., Depla D., De Gryse R. Biaxial alignment in sputter deposited thin films // Thin solid films. – 2006, 515. – P.P. 1229 – 1249. <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2006.06.027>
12. Жабин Г.А., Пелипец О.В., Шарапов Н.А. Влияние условий магнетронного распыления при осаждении покрытий (BaSrCa)CO₃ на термоэлектронную эмиссию пленочных микрокатодов // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50. – № 11. С. 38-41. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.11.57909.19827>

Для цитирования:

Жабин Г.А., Логинов Б.А., Логинов А.Б., Шичалин К.В. Влияние состава газовой смеси Ar и CO₂ при напылении пленок (Ba,Sr,Ca)CO₃ на шероховатость поверхности и эмиссионные свойства // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.5>