

на Si(111) // Физика и техника полупроводников, 2021. Т. 55, №. 8. С.625-628.

4. Кавеев А.К. и др. Оптимизация буферного диэлектрического слоя для создания малодефектных эпитаксиальных пленок топологического изолятора  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  с  $x \geq 0.4$  // Физика и техника полупроводников, 2022. Т. 56, №. 7. С.642-645.

## ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОЧАСТИЦЫ

Аль-Камали М.Ф.С.Х.

НИИ «Техническая керамика и наноматериалы», ГГТУ им. П.О. Сухого, Гомель, Беларусь

marwan\_ye2@gstu.by

Современные исследования сосредоточены на разработке наноструктурированных покрытий для плазмонного поглощения, используемых в солнечной энергетике, электронике и катализе. Развиваются методы импульсного лазерного и электронно-лучевого испарения для работы с малыми мишенями. Ключевым требованием является высокая однородность исходной мишени, что достигается с помощью чистых компонентов и аэросила в качестве матрицы-носителя.

В данной работе используются компоненты химической чистоты не ниже марки «осч» и аэросил в качестве матрицы-носителя для легирующих добавок, что обеспечивает молекулярную однородность. Для получения порошков  $SiO_2:CuO$  применялся золь-гель метод с аэросилом А-380  $SiO_2$  (чистый; по ГОСТ 14922-77) и азотнокислой медью  $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$  (чистой, по ГОСТ 4163-68). В работах [1,2] подробно описаны технологии и механизмы получения микропорошков и их последующее преобразование в таблетированные мишени для ионного распыления.

Из этих полученных мишеней, методом ионно-лучевого распыления, формировали тонкие пленки  $SiO_2:CuO$ . Установка включает вакуумный пост и двухлучевой ионный источник для ионной очистки подложек и распыления материала. Перед началом процесса камера откачивается до  $10^{-3}$  Па, затем выполняется ионная очистка подложек с газом Ar. Мишень  $SiO_2:CuO$  очищается от загрязнений, после чего распыление осуществляется ионами  $Ar^+$  с энергией 1300 эВ. Нанесение слоев происходит в смеси газов Ar/ $O_2$  с изменяемым содержанием кислорода (0%, 50% и 100%) при контролируемом расходе. Режимы распыления включают напряжение 5 кВ и ток 200 мА. После нанесения пленки ее толщина определяется с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08, а результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1. Расход газов и режим нанесения плёнок в вакууме для формирования покрытий типа  $SiO_2:CuO$  и их геометрическая толщина

Состав мишень	Тип и концентрация распыленного газа	Количество газа мл/минут	Время распыления, мин.	Показатель преломления, $n$	Толщина, нм		
					ПОИ-8	Эллипс-ометр	СЭМ
$SiO_2:CuO$ (1Si : 0,40Cu)	100 % Ar .	Ar=21	5	1,657	61,2	45,16	89,3
	50% Ar , 50% $O_2$	Ar=11, $O_2$ =14	18	1,618	55,2	72,08	95,2
	100% $O_2$	$O_2$ =32	32	1,620	50,6	99,10	101

Исследование наноструктурированных пленок  $SiO_2:CuO$  с помощью метода EDX подтвердило соответствие концентрации ионов меди заданному уровню. Морфология пленок демонстрирует однородность с легкой «зернистостью» из-за пористости мишеней. СЭМ-изображения показывают плотную структуру пленки толщиной около 100 нм, что согласуется с данными интерферометрического профилометра ПОИ-08 (таблица 1). Рентгенофазовый анализ указывает на восстановление меди до  $Cu^{2+}$  в аргонной атмосфере, замедляемое кислородом, что приводит к окислению ионов при его увеличении. Можно предположить, что в инертной среде при ионно-плазменном напылении ионы  $Cu^{2+}$  захватывают электроны и переходят в состояние  $Cu^+$  (кривая 2, рисунок 2). С увеличением содержания кислорода процесс восстановления ионов меди компенсируется их окислением (кривая 3, рисунок 2). Подобный механизм восстановления ионов титана описан в работе [2].

Для проверки соответствия концентрации ионов меди в пленке и мишени был выполнен анализ EDX. Результаты, представленные на рисунке 3, показывают два пика для меди, что может указывать на различия в валентности ионов меди в пленке.

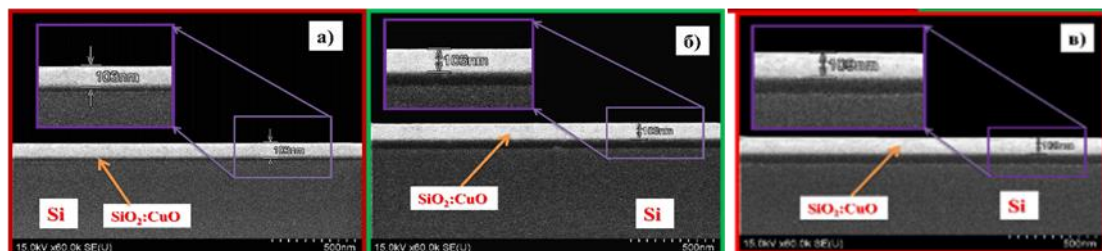


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности скола тонкой пленки, нанесенной методом ионно-лучевого распыления мишени состава  $\text{SiO}_2:\text{CuO}$  на подложке из полированного кремния при различном составе рабочего газа: а – Ar 100%, б – 50%Ar и 50% $\text{O}_2$ , в – 100% $\text{O}_2$

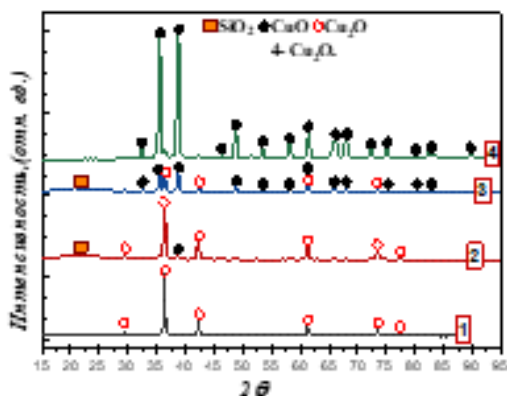


Рис. 2. РФА-спектры плёнок состава  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  (молярное отношение Si : Cu = 1 : 0,40);  
1 –  $\text{Cu}_2\text{O}$ ; 2 – плёнка  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  сформированная в атмосфере 100% аргона; 3 – плёнки  $\text{SiO}_2:\text{CuO}$  сформированная в атмосфере 50% аргона и 50% кислорода; 4 –  $\text{CuO}$

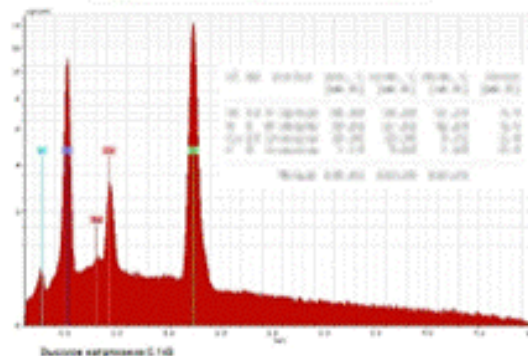


Рис. 3. EDX пленки  $\text{SiO}_2 : \text{CuO}$  (1 : 0,40) сформированной в атмосфере 100% Ar

Полученные наноструктурированные пленки  $\text{SiO}_2:\text{CuO}$  демонстрируют высокую однородность и соответствие заданным химическим свойствам. Эффективность методов золь-гель синтеза и ионно-лучевого распыления подтверждена экспериментальными данными, что открывает перспективы для их применения в различных областях, таких как электроника и оптика. Подходы к контролю условий синтеза и нанесения позволили достичь желаемых характеристик пленок, что является основой для дальнейших исследований в этой области.

1. Аль-Камали М. Ф. С. Х. и др. Мишени  $\text{SiO}_2:\text{CuO}$  ( $\text{Cu}^0$ ) для нанесения тонких пленок ионно-лучевого распыления, полученные золь-гель методом // Докл. нац. акад. наук Беларуси. 2022. Т. 66, № 3. С. 348–355.

2. Аль-Камали М. Ф. С. Х. и др. Формирование композиционных покрытий ионно-лучевым распылением мишеней на основе микропорошков пирогенного кремнезёма, содержащих соединения меди // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. 2022. Т. 12, № 2. С. 14–23.

*Работа выполнена в рамках задания 2.2.6 ГПНИ «Конвергенция-2025» (подпрограмма «Микромир, плазма и Вселенная»), финансируемого из средств республиканского бюджета по государственным программам научных исследований на 2021–2025 гг. в Республике Беларусь.*

*Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору Бойко А.А. за помощь в проведении исследований и интерпретации полученных результатов.*

## СИНТЕЗ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БИС[3-(ТРИМЕТОКСИСИЛИЛ)ПРОПИЛ]АМИНОМ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ

Артемяева В.А.<sup>1,2</sup>, Евдокимова Е.Н.<sup>2</sup>, Голубева Н.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС, Санкт-Петербург, Россия  
veranikaartemeva@gmail.com

В настоящее время активно разрабатываются различные гидрофобные покрытия для защиты поверхности металлов от коррозии и биообрастания. Так как гидрофобные покрытия имеют низкое сродство к воде, они препятствуют образованию бионаростов на поверхности металлических конструкций. Одним из способов повышения гидрофобности является введение в состав покрытий