НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

XXX СИМПОЗИУМ

9–13 марта 2026 года, Нижний Новгород

Тезисы докладов

Нижний Новгород
2026

Исследование формирования переходных слоёв в многослойных структурах Cu/Ti

С. С. Сахоненков[1]*, А. У. Гайсин[1], А. В. Каратаев[1], А. О. Петрова[1], В. А. Матвеев[2], Е. О. Филатова[1]

[1]Санкт-Петербургский государственый университет, ул. Ульяновская, д. 1, Петродворец, Санкт-Петербург, 198504
[2]Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, мкр. Орлова Роща, д. 1, Гатчина, Ленинградская обл., 188300
*s.sakhonenkov@spbu.ru

Многослойные покрытия на основе периодически повторяющейся пары слоёв Cu/Ti могут использоваться в качестве нейтронных недеполяризующих суперзеркал [1] в экспериментах, требующих использования одновременно высоких магнитных полей и прецизионного сохранения поляризации пучка нейтронов при прохождении нейтроновода [2]. Примером таких экспериментов может служить изучение β-распада нейтрона. В этом контексте суперзеркала на основе Cu/Ti являются альтернативой суперзеркалам на основе NiMo/Ti (NiMo – никель, с добавлением 5–20 % Mo), поскольку замена NiMo на диамагнитный Cu позволяет практически полностью нивелировать магнитные свойства слоёв и достигнуть предела деполяризации $<10^{-4}$.

Основной проблемой нейтронно-физических исследований является относительно невысокие интенсивности нейтронных потоков, даже для самых современных строящихся источников [3]. Это накладывает жёсткие требования на эффективность оптических элементов, применяемых для транспортировки, коллимации, фокусировки и монохроматизации нейтронных пучков. На эффективность нейтронных многослойных зеркал существенное влияние оказывает качество межслоевых границ. Формирование переходных слоёв вследствие взаимодействия материалов и геометрических шероховатостей приводит к снижению нейтронно-оптического контраста, нарушению интерференции и увеличению рассеяния нейронов на границах.

В данной работе представлено исследование системы Cu/Ti методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), рентгеновской рефлектометрии (РР) и рентгеновской дифракции (РД). Исследования проводились на оборудовании ресурных центров «Физические методы исследования поверхности» и «Рентгенодифракционные методы исследования» СПбГУ. Образцы синтезировались методом магнетронного распыления на оборудовании ПИЯФ и наносились на стеклянные подложки.

РФЭС применялась для исследования модельных бислойных структур, представляющих собой относительно толстый слой одного материала (~20 нм) с нанесенным на него тонким слоем другого материала (~1–3 нм). Исследование систем, в которых содержится титан, сильно осложняется его чрезвычайно высоким сродством к кислороду. Это приводит к образованию относительно протяженного TiO_2, даже в случаях, когда Ti находится под несколькими нм Cu. Вследствие этого в простых бислойных структурах не удалось обнаружить взаимодействие Cu и Ti. Чтобы предотвратить влияние окисления на формирование интерметаллидов меди и титана в межслоевой области, была синтезирована трехслойная структура Ti/Cu/Ti. В такой конфигурации ожидалось, что первый слой титана после окисления и формирования TiO_2 будет выступать в качестве пассивационного слоя и не даст окисляться нижележащим слоям. В таком случае уже удалось обнаружить химическое взаимодействие слоев с образованием соединений Cu-Ti неустановленной стехиометрии.

Многослойные структуры Cu/Ti с разной величиной периода (4 нм, 10 нм, 15 нм, 20 нм) были изучены методами РД и РР. Согласно полученным дифракционным кривым, в многослойных структурах Cu/Ti наблюдается кристаллизация слоёв меди и титана с образованием фаз ГЦК-Cu и α-Ti. Наблюдаемое преимущественное направление [100] кристаллизации зёрен в плёнках титана в многослойных структурах с периодом 10 нм и выше отличается от стандартной для ГПУ-решетки – [002]. В многослойной структуре с периодом 10 нм хорошо заметны пики, соответствующие фазам интерметаллидов $CuTi_2$ и CuTi. В многослойной стрктуре с периодом 4 нм отсутствует кристаллизация слоёв титана. В свою очередь, слой меди демонстрирует кристаллизацию с образованием интерметаллических фаз.

Согласно подгонке кривых отражения РР, в многослойных структурах с номинальным периодом 20 нм и 15 нм протяженность межслоевых областей не превышает 1,3 нм. В многослойных структурах с периодом 10 нм размер межслоевой области составляет почти 2 нм на обеих границах. При этом наблюдается уменьшение размера межслоевой области на несколько процентов от поверхности к подложке, что характерно для ростовой шероховатости, образующейся в связи с появлением нового направления текстуры. Для многослойной структуры с периодом 4 нм отсутствует ярко выраженный брегговский пик, что говорит о слабой интерференции вследствие сопоставимости размеров переходных областей с протяженностью слоев титана и меди.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-72-10107.

1. J. M. Gomez-Guzman, M. Opel, T. Veres et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. A. 1059. 2024. P. 169005.
2. D. Dubbers, H. Abele, S. Baessler et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. A. 596. 2008. P. 238–247.
3. H. Danared, M. Eshraqi and M. Jensen // Proceedings of HB-2016. 2016. P. 6–8.

Петрова Д. В., Гусева В. Е., Перекалов А. А., Нечай А. Н., Чхало Н. И., Федотов И. А., Скороходов Е. В. Разработка резистов для электронно-лучевой и рентгеновской литографии 568

Петрова О. В., Бакина К. А., Некипелов С. В., Скандаков Р. Н., Рутковский В. О., Третьякова У. С., Степучев Е. А., Сивков В. Н. Распределение сил осцилляторов рентгеновских переходов в области NEXAFS C1s-края поглощения фуллеритов C_{60} и C_{70} 569

Плешков Р. С., Полковников В. Н., Савченков П. С. Исследование многослойных периодических систем Ni/Ti с прослойками Si для применения их в нейтронных неполяризующих суперзеркалах с m = 3 и m = 5 570

Полковников В. Н., Дуров К. В., Смертин Р. М., Шапошников Р. А., Чхало Н. И. Нитридизация как метод улучшения отражательных характеристик рентгеновских зеркал 571

Аржанов А. И., Шульга В. В., Шелковников А. С., Алексашин К. Е., Колесников А. О., Логачев М. Д., Шатохин А. Н., Вишняков Е. А., Рагозин Е. Н., Наумов А. В. Изготовление VLS-решетки с экспоненциальным изменением частоты линий методом электронно-лучевой нанолитографии 572

Реунов Д. Г., Ахсахалян А. А., Ахсахалян А. Д., Дуров К. В., Чхало Н. И. Параболические цилиндрические зеркала Гебеля с многослойным покрытием $Ni_{0,2}Mo_{0,8}/C$ 573

Рутковский В. О., Некипелов С. В., Сивков Д. В., Скандаков Р. Н., Петрова О. В., Бакина К. А., Третьякова У. С., Степучев Е. А., Сивков В. Н. Определение спектральных зависимостей оптических констант Ni в области резонансного фотопоглощения методом Крамерса – Кронига с использованием кусочно-лоран-полиномиальной аппроксимации 574

Сахоненков С. С., Гайсин А. У., Каратаев А. В., Петрова А. О., Матвеев В. А., Филатова Е. О. Исследование формирования переходных слоёв в многослойных структурах Cu/Ti 575

Седов А. А., Мезенцев Н. А., Ракшун Я. В., Сафронов А. Н., Хомяков Ю. В., Чернов В. А., Шкаруба В. А. Разработка сверхпроводящих спиральных ондуляторов для ЦКП «СКИФ» 576

Сивков В. Н., Некипелов С. В., Петрова О. В., Скандаков Р. Н., Бакина К. А., Сивков Д. В., Рутковский В. О., Третьякова У. С., Объедков А. М., Каверин Б. С., Вилков И. В. Характеризация нанокомпозитов на основе графитизированных биоматериалов, покрытых соединениями меди 577

Скандаков Р. Н., Объедков А. М., Сивков В. Н. Баротермическая модификация фуллеритов C_{60} и C_{70} в атмосфере аргона 578

Смертин Р. М., Полковников В. Н., Реунов Д. Г., Чхало Н. И. Влияние кремниевых прослоек на структурные и отражательные характеристики Cr/Be многослойных зеркал 579

Татарский Д. А., Жакетов В. Д. Самоподобие в антиферромагнитных сверхрешётках CoCr на основе секвенции Фибоначчи 580

Тюленев П. В., Дуров К. В., Нежданов А. В., Полковников В. Н., Чхало Н. И., Шапошников Р. А. Изучение фазового состава пленок углерода в многослойных структурах NiMo/C и Cr/C методом комбинационного рассеяния света 581

Фещенко Р. М., Митрофанов А. В. Преобразование рентгеновского излучения полимерными трековыми мембранами с полыми биконическими порами 582

Филатова Е. О. Интерфейс-инжиниринг ультратонких многослойных рентгеновских зеркал 583

Франк А. И. Эффект ускорения и принцип эквивалентности 584

Хомяков Ю. В., Ракшун Я. В., Чернов В. А., Шацкий А. Ф., Дарьин Ф. А., Дарьин А. В., Ращенко С. В. Рентгенооптическая схема станции «РФА-Геология» ЦКП «СКИФ» 585

Чернышев А. К., Михайленко М. С., Пестов А. Е., Артюхов А. И., Оськин И. Д., Торопов М. Н., Малышев И. В., Морозов С. С., Гарахин С. А., Чхало Н. И. Изготовление рентгенооптического элемента в форме сегмента тороида для стенда спектральных измерений на основе лазерно-плазменного источника, 4–50 нм 586

Дедкова А. А., Чернышев А. К. Применение методов цифровой обработки изображений для устранения локальных дифракционных артефактов на картах ионно-пучковой обработки рентгенооптических элементов 587

Чертовских А. А., Паульс В. Численное моделирование зеркальной рентгеновской оптики 588

Чхало Н. И., Загайнов Н. В., Плешков Р. С., Полковников В. Н., Реунов Д. Г., Смертин Р. М. Изготовление и изучение волноводных структур на основе бериллия для жесткого рентгеновского излучения 589