

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

XXX СИМПОЗИУМ

9–13 марта 2026 года, Нижний Новгород

Тезисы докладов

Нижний Новгород
2026

Исследование состава межслоевых областей многослойных наноструктур Cr/C

А. О. Петрова^{1*}, А. У. Гайсин¹, Р. А. Шапошников², В. Н. Полковников², Е. О. Филатова¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, 199034

²Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087
*ani_petrova@mail.ru

«Углеродное окно», лежащее в интервале от 4,4 нм до 6,6 нм, представляет особый интерес, поскольку в этом диапазоне длин волн углеродосодержащие материалы, такие как различные биологические объекты, полимеры, нанотрубки и др., наиболее прозрачны для мягкого рентгеновского излучения. Развитие рентгеновской микроскопии «углеродного окна» тесно связано с созданием высокоотражающих покрытий на основе многослойных интерференционных структур. В этих зеркалах углерод рассматривается в качестве материала разделителя с минимальным поглощением рентгеновского излучения на К-крае. Теоретически коэффициент отражения рентгеновских зеркал нормального падения в диапазоне «окна прозрачности углерода» может достигать 60 %. Однако максимальный полученный экспериментально коэффициент отражения для подобных зеркал составляет 15,4 % [1]. Как известно, основными причинами низких коэффициентов отражения многослойных интерференционных наноструктур являются переходные слои, обусловленные ростовой шероховатостью и образованием дополнительных соединений на границе слоёв. Для исследования механизма формирования соединений и подбора оптимальных методов интерфейс-инжиниринга требуется исследовать протяженность и состав скрытых межслоевых областей.

В работе методом фотоэлектронной спектроскопии проведено исследование состава многослойных наноструктур Cr/C с различными значениями периода d и разным соотношением толщин слоёв γ . Фотоэлектронные спектры линий Cr 2p_{3/2} и C 1s всех исследуемых многослойных структур свидетельствуют о формировании на границе слоёв карбида хрома (рис. 1). Однако даже в многослойной структуре с наименьшим периодом $d = 0,4$ нм не наблюдается полного перемешивания слоёв, и большая часть сигнала соответствует не взаимодействовавшим атомам хрома и углерода. Поверхностный слой углерода толщиной 0,7 нм в зеркалах с периодом 1,4 нм препятствует окислению нижележащих слоёв хрома. Дифракционный анализ структуры системы демонстрирует аморфность слоёв в зеркалах с периодом 2,7 нм и менее. Кристаллизация слоёв хрома наблюдается только в многослойных структурах с периодом $d = 4$ нм и $\gamma = 0,5$.

Теоретический анализ энергий взаимодействия химических соединений, которые образуются при разных методах интерфейс-инжиниринга, в том числе с использованием барьерных слоёв и азотирования, указывает на то, что использование Cr₂O₃ в качестве слоя поглотителя является наиболее эффективным способом препятствия взаимодействию хрома и углерода без потери отражения.

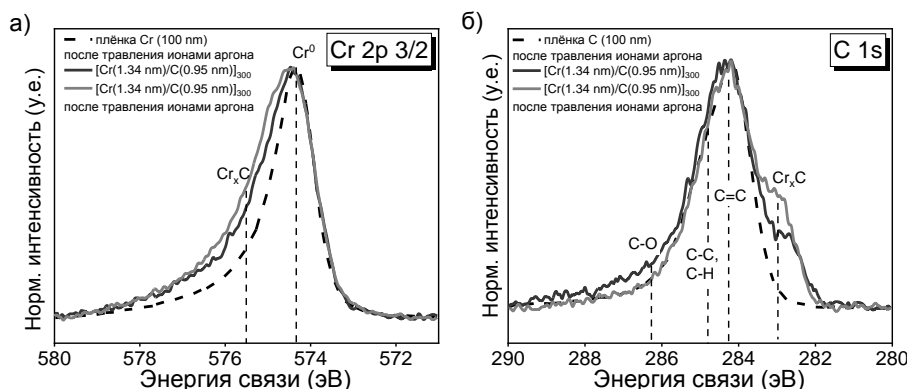


Рис. 1. Фотоэлектронные спектры Cr 2p_{3/2} линии плёнки Cr (100 нм) и многослойной структуры [Cr(1,38 нм)/C(0,95нм)]₃₀₀ до и после травления поверхности ионами аргона (а); б – фотоэлектронные спектры C 1s линии плёнки C (100 нм) и многослойной структуры [Cr(1,38 нм)/C(0,95нм)]₃₀₀ до и после травления поверхности ионами аргона

Исследования были проведены на лабораторном модуле ЭСХА станции НАНОФЭС в НИЦ «Курчатовский институт» и на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Discover в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ. Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 19-72-20125-П.

1. Андреев С. С., Барышева М. М., Вайнер Ю. А., Гайкович П. К., Парьев Д. Е., Пестов А. Е., ... & Чхало Н. И. Многослойные рентгеновские зеркала для спектральной области «окна прозрачности углерода» 4,4–4,5 нм // Кристаллография. 2013. 58(3). 497.

<i>Мальшиев И. В., Реунов Д. Г., Чернышев А. К., Торопов М. Н., Пестов А. Е., Смертин Р. М., Полковников В. Н., Чхало Н. И., Гольишев С. А., Лаврушкина С. В., Казаков Е. П.</i> Результаты измерений на ЭУФ-микроскопе 345 крат и прогресс в создании МР-микроскопа 130 крат	547
<i>Матюхин Н. Д., Губарев В. М., Степанов Л. В., Кривокрыотов М. С.</i> Лазерно-индуцированная плазма лития как источник излучения экстремального ультрафиолетового диапазона с высокой степенью монохроматичности для задач инспекции.....	548
<i>Минеев С. М., Дуров К. В., Полковников В. Н.</i> Методика обеспечения заданного распределения толщин тонкоплёночных покрытий при магнетронном напылении.....	549
<i>Михайленко М. С., Зорина М. В., Пестов А. Е., Чернышев А. К., Оськин И. Д., Чхало Н. И.</i> Восстановление функции спектральной плотности мощности поверхностей элементов рентгеновской оптики	550
<i>Михайленко М. С., Зорина М. В., Пестов А. Е., Чернышев А. К., Оськин И. Д., Чхало Н. И.</i> Изучение энергетической зависимости шероховатости поверхности монокристаллического кремния (001) под воздействием ускоренных ионов криптона.....	551
<i>Михайленко М. С., Назаров А. А., Пестов А. Е., Юнин П. А., Шаблов Ю. С., Роцин Б. С., Волков Ю. О.</i> Молекулярно-динамическое моделирование внедрения ионов Ag при распылении плавленого кварца.....	552
<i>Морозов С. С., Гарахин С. А., Зорина М. В., Уласевич Б. А., Чхало Н. И., Реунов Д. Г., Знаменский М. Ю.</i> Компактный VLS-спектрограф для исследования спектров источников излучения мягкого рентгеновского диапазона.....	553
<i>Мохов Д. В., Березовская Т. Н., Шубина К. Ю., Прасолов Н. Д., Пирогов Е. В., Горай Л. И., Буравлёв А. Д.</i> Изготовление металлических копий дифракционных решеток с блеском для рентгеновского диапазона	554
<i>Мурзина А. В., Артюков И. А., Виноградов А. В., Попов Н. Л.</i> Об оптимизации алгоритмов восстановления фазы в исследованиях методом CDI.....	555
<i>Некипелов С. В., Жук Н. А., Сивков В. Н.</i> Рентгеноспектральные исследования мультиэлементных высокоэнтропийных танталатов/ниобатов висмута, допированных атомами 3d-металлов	556
<i>Нечай А. Н., Гусева В. Е., Чхало Н. И.</i> Исследования лазерной плазмы, получаемой при использовании кластерных мишеней	557
<i>Оськин И. Д., Михайленко М. С., Пестов А. Е., Чернышев А. К., Забродин И. Г., Дмитриев Д. С., Чхало Н. И.</i> Разработка компактного масс-спектрометра для контроля ионно-пучковой коррекции формы поверхности оптических элементов	558
<i>Панкратов И. О., Паульс В.</i> Численное моделирование интерферометра на рабочей длине волны с использованием программного пакета WaveOpticsPropagation	559
<i>Паульс В.</i> О вычислении аберраций высокого порядка в системах с асферическими зеркалами.....	560
<i>Перекалов А. А., Нечай А. Н., Чхало Н. И., Гусева В. Е.</i> Измерение конверсионной эффективности ЛПИ для ЭУФ-литографии на длине волны 11,2 нм с различными соплами	561
<i>Гусева В. Е., Лучин В. И., Нечай А. Н., Перекалов А. А., Чхало Н. И.</i> Исследование динамики поглощения лазерного излучения газоструйной мишенью Хе	562
<i>Пестов А. Е., Михайленко М. С., Нечай А. Н., Лопатин А. Я., Перекалов А. А., Захарина М. Ю., Арсеньева К. В., Конев А. Н., Батенькин М. А., Пискунов А. В.</i> Исследование топологии поверхности плёнок олово-оксидных соединений, проэкспонированных ЭУФ-излучением с длиной волны 13,55 нм.....	563
<i>Пестов А. Е., Ахсаляян А. А., Зорина М. В., Михайленко М. С., Чернышев А. К., Чхало Н. И., Полковников В. Н., Антюшин Е. С., Мальшиев И. В., Глушков Е. И., Петраков Е. В., Артюхов А. И.</i> Методика создания крупногабаритных рентгеновских зеркал скользящего падения на подложках из монокристаллического кремния	564
<i>Пестов А. Е., Ахсаляян А. А., Зорина М. В., Михайленко М. С., Чернышев А. К., Чхало Н. И., Юнин П. А., Гордеев С. К.</i> Оптическая обработка поверхности подложек рентгеновских зеркал из АКК «Скелетон» с технологическим покрытием из поликристаллического кремния.....	565
<i>Петрова А. О., Гайсин А. У., Дуров К. В., Полковников В. Н., Филатова Е. О.</i> Влияние азотирования на формирование межфазной границы слоев в NiMo/C многослойных зеркалах	566
<i>Петрова А. О., Гайсин А. У., Шапошников Р. А., Полковников В. Н., Филатова Е. О.</i> Исследование состава межслоевых областей многослойных наноструктур Cr/C.....	567