

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

## **XXX СИМПОЗИУМ**

*9–13 марта 2026 года, Нижний Новгород*

### **Тезисы докладов**

Нижний Новгород  
2026

# Влияние азотирования на формирование межфазной границы слоев в NiMo/C многослойных зеркалах

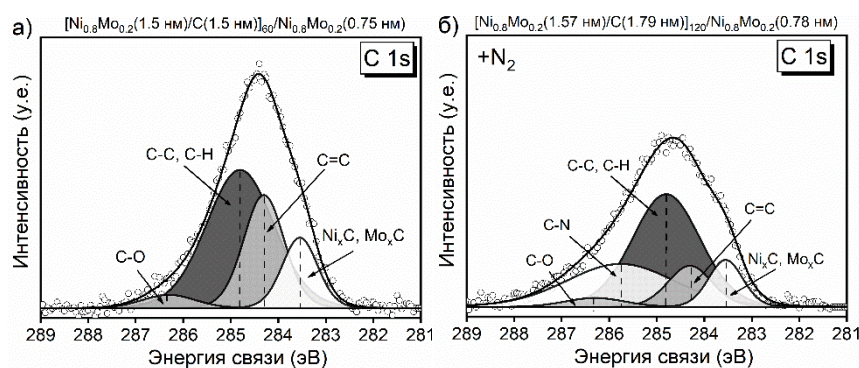
А. О. Петрова<sup>1\*</sup>, А. У. Гайсин<sup>1</sup>, К. В. Дуров<sup>2</sup>, В. Н. Полковников<sup>2</sup>, Е. О. Филатова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, 199034

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087  
\*ani\_petrova@mail.ru

В настоящее время для фокусировки и коллимации рентгеновских пучков широко применяются гёбелевские зеркала на основе градиентных многослойных структур, позволяющие на порядок увеличить эффективность отбора излучения рентгеновских трубок. В данный момент повсеместно используется система W/Si, которая демонстрирует высокое отражение на линии Cu K $\alpha$ , однако она подвержена квазибрегговскому рассеянию линии Cu K $\beta$ , что искажает результаты дифрактометрии. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование фильтра из никеля, который способен подавлять нежелательное излучение Cu K $\beta$ , однако это уменьшает интенсивность полезного сигнала и усложняет оптическую схему. Перспективной альтернативой являются многослойные зеркала на основе никеля. Однако магнитные свойства чистого Ni осложняют технологический процесс магнетронного напыления. Решением становится использование сплава Ni<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub>/C [1], который сохраняет рентгенооптические характеристики никеля, но подавляет его магнитные свойства [2], что делает системы NiMo/C технологически перспективными для создания эффективных рентгеновских зеркал. Для структурного совершенствования исследуемых зеркал используется метод реактивного распыления в среде активного газа – например, азота. Согласно исследованиям, проведенным в работе [3], добавление азота в камеру при проходе над углеродной мишенью позволяет повысить отражательные характеристики зеркал Ni<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub>/C.

В работе проведено исследование состава межслоевых областей многослойных структур Ni<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub>/C, осажденных в том числе с применением азотирования. Анализ фотоэлектронных спектров (рис. 1) свидетельствует о формировании карбидов металлов на границе слоев, а также о наличии аморфного и графитоподобного углерода в слое. Распыление углерода в атмосфере азота приводит к формированию в спектре компоненты, соответствующей C-N связи. Относительная интенсивность компонент, соответствующих карбиду никеля и карбиду молибдена, при азотировании уменьшается, что свидетельствует о препятствовании перемешивания слоев Ni<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub> и углерода. Исследования многослойных структур с разным периодом, проведенные методом дифракции рентгеновских лучей, указывают на то, что слой Ni<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub> в азотированных структурах имеет больший размер кристаллитов, чем в образцах, синтезированных в отсутствие азота. Этот эффект косвенно подтверждает уменьшение диффузионного взаимодействия между металлом и углеродом на границах слоев: в отсутствие интенсивного формирования карбидов кристаллиты металлического слоя могут более свободно расти, что приводит к их укрупнению.



**Рис. 1.** Экспериментальные и аппроксимированные фотоэлектронные спектры C 1s линии: а – многослойной структуры [Ni<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub> (1,5 нм)/C (1,5 нм)]<sub>60</sub>/ Ni<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub> (0,75 нм) и б – азотированной многослойной структуры [Ni<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub> (1,57 нм)/C (1,79 нм)]<sub>120</sub>/ Ni<sub>0,8</sub>Mo<sub>0,2</sub> (0,78 нм)

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

1. Дуров К. В., Полковников В. Н., Чхало Н. И., Ахсаханян А. А., Малышев И. В. Многослойные структуры на основе Ni для зеркал гёбелевского типа. Журнал технической физики. 2024. 94(8). 1280–1287.
2. Kovács-Mezei R., Th. Krist and Zs. Révay. Non-magnetic supermirrors produced at Mirrotron Ltd. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 586.1 (2008): 51–54.
3. Дуров К. В., Ахсаханян А. Д., Малышев И. В., Полковников В. Н., Чхало Н. И. Многослойные структуры NiMo/C, изготовленные методом реактивного магнетронного распыления // ЖТФ. 95:9 (2025). 1808–1816.

<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., Гольшиев 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