

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

## **XXX СИМПОЗИУМ**

*9–13 марта 2026 года, Нижний Новгород*

### **Тезисы докладов**

Нижний Новгород  
2026

## Состав и кристаллическая структура многослойных нейтронных зеркал

А. У. Гайсин\*, С. С. Сахоненков, А. С. Конашук, Е. О. Филатова

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

\*a.gaisin@spbu.ru

Многослойные структуры на основе никеля и титана активно применяются в качестве покрытия нейтронных водов для исследовательских реакторов, поскольку обладают наибольшим нейтронно-оптическим контрастом [1, 2]. Многослойные структуры  $Ni_xMo_{1-x}/Ti$  и  $Cu/Ti$  имеют потенциальное применение в качестве недеполярирующих отражательных элементов в экспериментах с пучками поляризованных нейтронов, используемых для исследования магнитных свойств материалов [3, 4].

Низкая плотность потоков даже самых современных источников нейтронов создает запрос на высокоотражающие нейтронно-оптические элементы, в том числе суперзеркала с высоким коэффициентом  $m$  (множитель критического угла полного внешнего отражения никеля), что требует синтеза ультратонких слоев с толщинами менее 10 нм. Основная проблема многослойных структур, состоящих из нанометровых слоев, заключается в сложности создания резких границ раздела из-за твердофазных реакций на границах раздела, кристаллизации слоев и межслоевой шероховатости. Для подбора эффективного метода интерфейс-инжиниринга, сохраняющего нейтронно-оптический контраст, требуется комплексно исследовать механизмы формирования межслоевых областей и кристаллизации слоев.

В данной работе представлены исследования состава и эволюции кристаллической структуры многослойных систем  $Ni/Ti$  без и с барьерными слоями кремния,  $Ni_{0,95}Mo_{0,05}/Ti$  и  $Cu/Ti$  с разной величиной периода. Комплексный анализ фотоэлектронных и рентгенодифракционных измерений многослойных зеркал  $Ni/Ti$  с барьерными слоями и без них с периодами 4 и 10 нм позволил заключить, что в межслоевой области  $Ni/Ti$  формируются протяженные переходные слои, в основном состоящие из интерметаллической фазы  $Ni_3Ti$ . Введение сверхтонких барьерных слоев кремния на интерфейсах в значительной степени предотвращает образование интерметаллических соединений, вероятно, из-за образования силицидов титана. Кроме того, было замечено, что использование слоя  $Si$  на поверхности образца приводит к образованию оксида кремния в результате воздействия окружающей среды, который действует как пассивирующий слой и препятствует окислению слоев  $Ni$  и  $Ti$  в самом верхнем периоде многослойной структуры.

Анализ рентгеновской и электронной дифракционных картин многослойных зеркал  $Ni_{0,95}Mo_{0,05}/Ti$  с величиной периода от 4 до 20 нм выявил постепенное изменение преимущественной ориентации гексагональных кристаллитов  $\alpha-Ti$  от (002) до (100) с увеличением толщины периода, что потенциально объясняет рост волнистости слоя от подложки к поверхности с увеличением толщины периода. Установлена кристаллизация слоя  $Ni_{0,95}Mo_{0,05}$  в виде твердого раствора. Показано образование на границах раздела интерметаллических соединений  $Ni_{1-x}Ti_x$  со средней стехиометрией  $x \approx 0,5$ . Предположительно, они представляют собой смесь интерметаллидов, богатых  $Ni$  и  $Ti$ . С увеличением толщины периода обнаружена кристаллизация интерметаллидов, а также измельчение (фрагментация) зёрен интерметаллических соединений.

Установлено, что кристаллическая структура многослойных систем  $Cu/Ti$  существенно зависит от периода зеркала. При периодах более 10 нм наблюдается полная кристаллизация обоих компонентов: медь формирует ГЦК-фазу с текстурой [100], а титан –  $\alpha-Ti$  с неожиданной ориентацией [100] вместо типичной для ГПУ-решётки [002]. Одновременно в этих структурах чётко регистрируются дифракционные пики интерметаллидов  $CuTi_2$  и  $CuTi$ , свидетельствующие о глубокой межслоевой реакции.

Исследования были проведены на лабораторном модуле ЭСХА станции НАНОФЭС в НИЦ «Курчатовской институт», на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре Thermo Fisher Scientific Escalab 250 xi в ресурсном центре «Физические методы исследования поверхности» и на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Discover в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ.

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

1. Maruyama R., Yamazaki D., Ebisawa T., Soyama K. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. 600. P. 68–70.
2. Singh S., Basu S., Bhatt P., Poswal A. K. // Phys. Rev. B. 2009. 79. 195435.
3. Schebetov A. // Neutron News. 1998. V. 9, no. 3. P. 35.
4. J. M. Gomez-Guzman, M. Opel, T. Veres et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1059. 2024. P. 169005.

<i>Бакина К. А., Петрова О. В., Некипелов С. В., Скандаков Р. Н., Рутковский В. О., Третьякова У. С., Степучев Е. А., Сивков В. Н.</i> XPS- и NEXAFS-характеризация поверхности гибридных нанокомпозитов на основе MWCNTs, модифицированных карбидами молибдена и вольфрама .....	523
<i>Бушуев В. А.</i> Принцип причинности и соотношения типа Крамерса – Кронига для амплитудных коэффициентов френелевского и дифракционного отражения нейтронов .....	524
<i>Вепрева П. П., Паульс В., Глушков Е. И.</i> Нейросетевой анализ интерференционных картин .....	525
<i>Вишняков Е. А.</i> Особенности инжекции электронов в процессе лазерно-плазменного кильватерного ускорения .....	526
<i>Гайкович К. П., Малышев И. В., Реунов Д. Г.</i> Метод нанотомографии для рентгеновского x345 микроскопа .....	527
<i>Гайсин А. У., Сахоненков С. С., Конашук А. С., Филатова Е. О.</i> Состав и кристаллическая структура многослойных нейтронных зеркал .....	528
<i>Гарахин С. А., Морозов С. С., Девятайкин И. С., Михайленко М. С., Шапошников Р. А., Забродин И. Г., Малышев И. В., Зорина М. В., Чхало Н. И.</i> Рефлектометр с лазерно-плазменным источником для аттестации оптики в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазонах .....	529
<i>Глушков Е. И., Паульс В., Чхало Н. И.</i> Учет систематических ошибок измерений методом сдвига на интерферометре Физо .....	530
<i>Горай Л. И., Мохов Д. В., Березовская Т. Н., Шубина К. Ю., Прасолов Н. Д., Пирогов Е. В., Буравлёв А. Д.</i> Изготовление и характеристика рентгеновской 1,2-мкм Au-решётки с блеском для работы в классической и конической дифракции .....	531
<i>Гусева В. Е., Нечай А. Н., Перекалов А. А., Забродин И. Г., Чхало Н. И.</i> Применение зондовой методики для лазерно-плазменных исследований с газоструйной мишенью .....	532
<i>Девятайкин И. С., Гарахин С. А., Морозов С. С., Чхало Н. И.</i> Твердотельный лазерно-плазменный источник нового поколения для прецизионной рефлектометрии .....	533
<i>Дуров К. В., Полковников В. Н., Ахсаханян А. А., Торопов М. Н., Чхало Н. И.</i> Многослойные рентгеновские зеркала для рентгеноспектрального флуоресцентного анализа .....	534
<i>Загайнов Н. В., Паульс В.</i> Аналитическое обоснование метода восстановления аберраций волнового фронта .....	535
<i>Загайнов Н. В., Гарахин С. А., Морозов С. С., Полковников В. Н., Чхало Н. И., Шапошников Р. А.</i> Определение констант плёнок Ru, Ta, TaN по данным лабораторной рефлектометрии .....	536
<i>Захарова В. А., Паульс В., Вепрева П. П.</i> Стандартизация процесса изготовления оптических деталей в ИФМ РАН .....	537
<i>Звонков Г. А., Шапошников Р. А., Полковников В. Н., Чхало Н. И., Гарахин С. А.</i> Учёт аппаратной функции в измерении коэффициента отражения многослойных рентгеновских зеркал .....	538
<i>Зорина М. В., Артюхов А. И., Вепрев П. А., Дуров К. В., Полковников В. Н.</i> Проект установки для ионно-пучкового формирования и напыления крупногабаритных рентгеновских и нейтронных зеркал .....	539
<i>Казанцев Ф. П., Мезенцев Н. А., Шкаруба В. А.</i> Оптимизация магнитной структуры сверхпроводящего ондулятора для ЦКП «СКИФ» .....	540
<i>Каратаев А. В., Гайсин А. У., Филатова Е. О.</i> Многослойные рентгеновские зеркала для диапазона «окна прозрачности воды»: $\text{Cr/V}$ и $\text{Cr/Ti}$ .....	541
<i>Кириченко А. С., Кузин С. В., Перцов А. А., Золотов Д. А., Васильев А. Л., Артёмов В. В., Лобода И. П., Рева А. А., Богачёв С. А.</i> Эффективность регистрации рентгеновского излучения с помощью коммерческих кремниевых матриц .....	542
<i>Кискин М. А., Ямбулатов Д. С., Самулионис А. С., Бушуев В. А.</i> Дизайн негативных резистов на основе молекулярных комплексов металлов для нанолитографии .....	543
<i>Клоков А. Ю., Фролов Н. Ю., Шарков А. И., Рагозин Е. Н.</i> Диагностика сверхрешёток Mo/Si методом пикосекундной акустики .....	544
<i>Колесников А. О., Рагозин Е. Н., Фирсов Ан. А., Шатохин А. Н.</i> Отражательная зонная пластинка: инструмент характеристики лазерно-плазменного источника мягкого рентгеновского излучения .....	545
<i>Линкова Т. М.</i> Моделирование аргоновой защитной атмосферы в источниках ЭУФ-излучения .....	546