

В. Д. Жакетов, Ю. В. Никитенко

Изотопно-идентифицирующая нейтронная рефлектометрия на спектрометре РЕМУР реактора ИБР-2

На импульсном реакторе ИБР-2 (ЛНФ ОИЯИ) активно проводятся исследования границ раздела в гетероструктурах с применением нейтронного рассеяния. Большой класс задач по данному направлению посвящен изучению свойств тонкопленочных гетероструктур, актуальное значение которых обусловлено развитием нанoeлектроники и спинтроники. Для решения таких задач используется рефлектометр поляризованных нейтронов РЕМУР (8-й канал реактора ИБР-2). Метод нейтронной рефлектометрии заключается в регистрации отраженного от гетероструктуры сколламированного пучка тепловых нейтронов. Нейтрон имеет собственный момент, что позволяет исследовать распределение намагниченности внутри гетероструктуры. Особенность метода нейтронной рефлектометрии — регистрация суммарной энергии взаимодей-

ствия нейтронов с элементами среды, распределенными по глубине структуры. В качестве дополнения было предложено при поглощении нейтронов различными изотопами регистрировать вторичные излучения: заряженные частицы, гамма-кванты, осколки деления ядер. Дополнительные каналы регистрации позволяют наряду с построением профиля средней (по поверхности) плотности из нейтронной рефлектометрии определить профили распределения отдельных элементов по глубине структуры.

С 2014 г. проводится модернизация рефлектометра РЕМУР, направленная на создание различных каналов регистрации вторичного излучения. Проект реализуется в коллаборации двух отделений ЛНФ: нейтронных исследований и разработок в области конденсированных сред (Ю. В. Никитенко,

V. D. Zhaketov, Yu. V. Nikitenko

Isotope-Identifying Neutron Reflectometry on the REMUR Spectrometer of the IBR-2 Reactor

At the IBR-2 pulsed reactor of FLNP JINR, studies of heterostructures interfaces are actively carried out using neutron scattering. A specific class of problems in this area is the study of the properties of thin-film heterostructures, the relevance of which is associated with the development of nanoelectronics and spintronics. To solve such problems, the REMUR reflectometer of polarized neutrons (beamline 8 of the IBR-2 reactor) is used. The method of neutron reflectometry is based on the detection of a collimated beam of thermal neutrons reflected from a heterostructure. The neutron has its own moment, which makes it possible to study the distribution of magnetization within the heterostructure. A feature of the neutron reflectometry method is the determination of the total energy of the interaction of neutrons with elements of the medium, distributed through the depth of the structure. In addition, it was proposed to detect secondary radiation during the absorption of neutrons by various isotopes: charged particles, gamma rays, nuclear fission fragments. Additional

channels make it possible, along with the determination of the average (over the surface) density profile by neutron reflectometry, to obtain the distribution profiles of individual elements across the depth of the structure.

Since 2014, the REMUR reflectometer has been undergoing modernization in order to provide various channels for detecting secondary radiation. The project is carried out in collaboration between two departments of the Frank Laboratory of Neutron Physics: Department of Neutron Investigations of Condensed Matter (Yu. Nikitenko, A. Petrenko, V. Aksenov, V. Zhaketov) and Division of Nuclear Physics (Yu. Kopach, N. Gundorin, Yu. Gledenov, K. Khramko, E. Sansarbayar). First experiments on the detection of secondary radiation from layered structures were carried out in 1998–2000. The advantage lies in the fact that the IBR-2 is a pulsed source, on which the time-of-flight method allows obtaining data for various neutron energies in one measurement. This fact reflects a significant advance in the implementation of the concept of de-

А. В. Петренко, В. Л. Аксенов, В. Д. Жакетов) и ядерной физики (Ю. Н. Копач, Н. А. Гундорин, Ю. М. Гледенов, К. Храмо, Э. Сансарбаяр). Первые эксперименты по регистрации вторичного излучения от слоистых структур были проведены в 1998–2000 гг. Большим преимуществом оказалось то, что ИБР-2 является импульсным источником, на котором, применяя метод времени пролета, можно за одно измерение получить информацию для различных значений энергии нейтронов. Данный факт отражает существенное продвижение в реализации концепции регистрации вторичного излучения на нейтронных рефлектометрах по сравнению с предыдущими работами в этом направлении: первое измерение вторичного излучения в виде гамма-квантов при отражении нейтронов от структуры, содержащей слой гадолиния, который обладает большим сечением реакции (n, γ), было проведено в 1994 г. в США на стационарном источнике нейтронов с постоянной длиной волны нейтрона. Также существенным разви-

тием является получение сигнала от образцов со слоями изотопа лития-6 в виде тритонов и альфа-частиц.

К настоящему времени основные работы по созданию метода изотопно-идентифицирующей рефлектометрии нейтронов на спектрометре РЕМУР завершены. Реализованы и протестированы каналы регистрации вторичного излучения: заряженных частиц [1], гамма-квантов и нейтронов, испытавших переворот спина [2]. На рис. 1 представлены ионизационная камера на нейтронном пучке для измерения спектров заряженных частиц и ее схема. Картина интенсивности нейтронов на детекторе и карта распределения заряженных частиц, полученных для структуры со слоями изотопа лития-6, продемонстрированы на рис. 2. Сейчас для измерений доступны несколько десятков изотопов и магнитных элементов. Продемонстрировано, что метод позволяет исследовать в слоистых структурах пространственный профиль (распределение) широкого круга изотопов и магнитных элементов с разрешением 1 нм.

Рис. 1. *a*) Ионизационная камера (1), установленная в гониометре (2) спектрометра РЕМУР; *b*) схема ионизационной камеры: 1 — пучок нейтронов; 2 — входное и выходное окна; 3 — катод; 4 — сетка; 5 — рамка сетки; 6 — коллектор (анод)

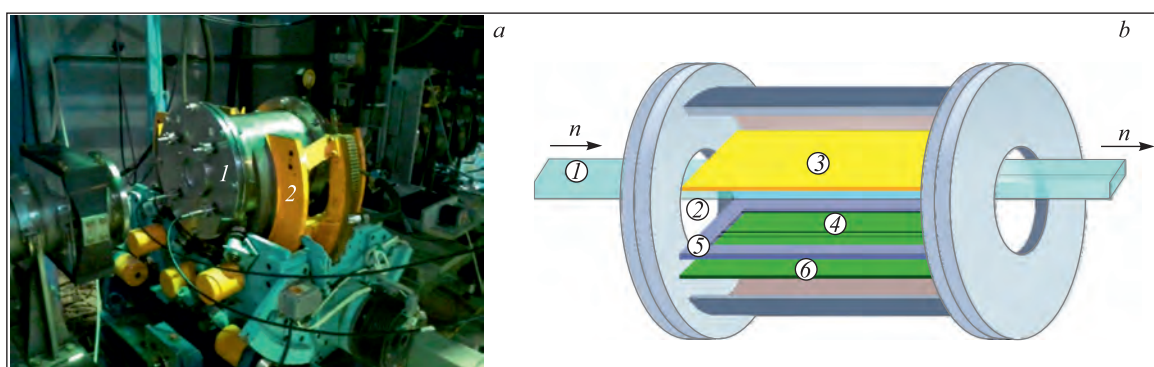


Fig. 1. *a*) Ionization chamber (1) installed in goniometer (2) of the REMUR spectrometer; *b*) schematic of the ionization chamber: 1 — neutron beam; 2 — input and output windows; 3 — cathode; 4 — grid; 5 — mesh frame; 6 — collector (anode)

tection of secondary radiation on neutron reflectometers in comparison with previous efforts in this direction: the first measurement of secondary radiation (gamma rays), when neutrons were reflected from a structure containing layers of gadolinium with a large cross section of the (n, γ) reaction, was carried out in 1994 in the USA at a steady-state neutron source with a constant neutron wavelength. Another significant achievement is that a signal was obtained from samples with layers of the lithium-6 isotope in the form of tritons and alpha particles.

To date, the main work on the development of the method of isotope-identifying neutron reflectometry on the REMUR spectrometer has been completed. The channels for detection of secondary radiation were implemented and tested: charged particles [1], gamma rays and neutrons that scatter with a spin flip [2]. In Fig. 1, a photo of ioniza-

tion chamber on neutron beam for measuring the spectra of charged particles and its scheme are shown. In Fig. 2, the pattern of neutron intensity on the detector and the distribution map of charged particles obtained for the structure with layers of the lithium-6 isotope are given. At the moment, several tens of isotopes and magnetic elements are available for measurements. It has been demonstrated that the method makes it possible to study the spatial profile (distribution) of a wide range of isotopes and magnetic elements in layered structures with a resolution of 1 nm.

The possibilities of using the method are as follows. At present, studies of the so-called proximity effects at interfaces between two solid media are of significant interest. In particular, this applies to the interface between a superconductor and a ferromagnet [3]. Due to the mutual influence of ferromagnetism and superconductivity, as

Если говорить о возможностях применения метода, то в настоящее время актуальным является изучение явлений близости, возникающих на границе раздела двух сред, например на границе между сверхпроводником и ферромагнетиком [3]. За счет взаимного влияния ферромагнетизма и сверхпроводимости, обусловленного конечными значениями длин когерентности, происходит существенная модификация магнитных и сверхпроводящих свойств. Это проявляется, в частности, в изменении пространственного распределения намагниченности. Для определения пространственного магнитного профиля используют метод рефлектометрии поляризованных нейтронов с наклонной осью поляризации, позволяющий определить энергию потенциального взаимодействия нейтрона со средой. Стандартный подход не дает возможности установить, с какими элементами связаны изменения потенциала взаимодействия, в частности, магнитного профиля.

Для определения профиля потенциала взаимодействия нейтрона с отдельными элементами необходимо регистрировать вторичное излучение элементов.

В качестве примера приведем изучение эффектов близости в многослойных структурах со слоями сверхпроводников (ниобия и ванадия) и со слоями ферромагнетика (гадолиния), от которого одновременно регистрировались гамма-кванты. Гадолиний является ферромагнетиком с относительно низкой температурой Кюри, что делает его привлекательным для данных исследований. Обнаружено изменение магнитной структуры под влиянием сверхпроводимости на уровне 4–10%, что объясняется недавно предсказанным электромагнитным эффектом близости [4]. Эффект наблюдался в подслоях сверхпроводников (ниобия и ванадия) толщиной примерно 10 нм. В качестве вторичного излучения предполагается в дальнейшем регистрировать осколки деления ядер, что позволит про-

Рис. 2. *a*) Картина распределения интенсивности нейтронов на детекторе в плоскости $N_z N_t$: 1 — преломленный пучок; 2 — отраженный пучок; *b*) карта распределения интенсивности счета тритонов (1) и альфа-частиц (2) в ионизационной камере в зависимости от амплитуд сигналов (номера канала) с анода (N_{Aa}) и катода (N_{Ac})

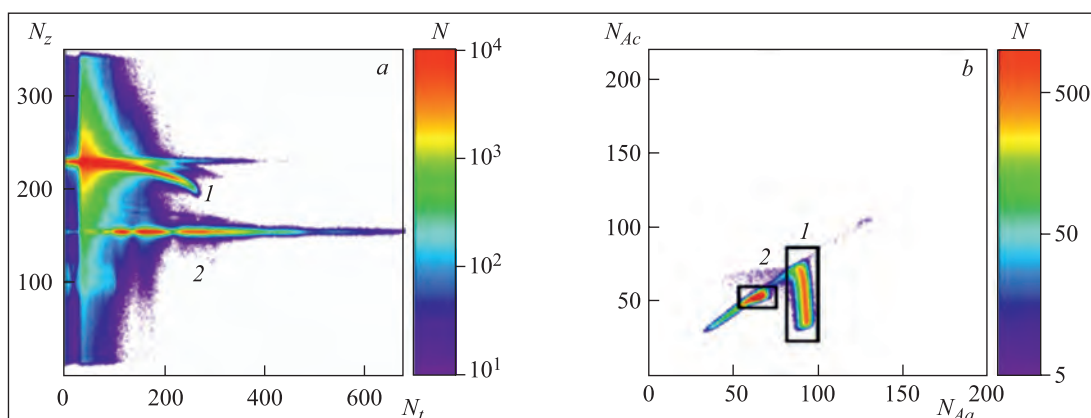


Fig. 2. *a*) 2D neutron intensity distribution on the detector in the $N_z N_t$ plane: 1 — refracted beam; 2 — reflected beam; *b*) 2D intensity distribution for tritons (1) and alpha particles (2) in the ionization chamber depending on the signal amplitudes (channel number) from the anode (N_{Aa}) and cathode (N_{Ac})

a consequence of the finite values of coherence lengths, there is a significant modification of the magnetic and superconducting properties in some near-boundary vicinity. This manifests itself, in particular, in a change in the spatial distribution of magnetization. To determine the spatial magnetic profile, the method of polarized neutron reflectometry with an inclined axis of polarization is used, which makes it possible to determine the energy of the potential interaction of neutrons with the medium. The standard approach does not allow us to determine which elements are related to changes in the interaction potential and, in particular, in the magnetic profile. To determine the profile of the interaction potential of neutrons with individual elements, it is necessary to detect the secondary radiation produced by the elements.

As an example, let us consider the study of proximity effects in multilayer structures with the layers of superconductors (niobium and vanadium) and the layers of ferromagnetic gadolinium, from which gamma rays were simultaneously detected. Gadolinium is a ferromagnet with a relatively low Curie temperature, which is attractive for such kind of studies. A change in the magnetic structure under the influence of superconductivity at the level of 4–10% was found, which is due to the recently predicted electromagnetic proximity effect [4]. The effect was observed in sublayers of superconductors (niobium and vanadium) approximately 10 nm thick. In the future, it is planned to detect nuclear fission fragments as secondary radiation, which will make it possible to study isotopes of actinides. The range of possible studies is extremely wide,

водить исследования изотопов из актинидного ряда элементов. Диапазон возможных исследований крайне широк, поскольку многие изотопы представляют собой источники гамма-квантов, а также являются источниками заряженных частиц при взаимодействии с нейтронами. Дальнейшее развитие экспериментальной техники позволит не только расширить круг изотопов за счет роста светосилы спектрометра и уменьшения фона гамма-квантов и быстрых нейтронов, но и увеличить пространственное разрешение до атомного уровня. Применение метода изотопно-идентифицирующей рефлектометрии значительно увеличивает возможности исследования многослойных магнитных гетероструктур.

Список литературы

1. Zhaketov V.D. *et al.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. P. 478–487.
2. Zhaketov V.D. *et al.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2021. V. 15. P. 549–562.
3. Khaydukov Yu. N. *et al.* // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 140503.
4. Mironov S. *et al.* // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 113. P. 022601.

since many isotopes are sources of gamma rays, as well as sources of charged particles when interacting with neutrons. Further development of the experimental technique will allow us both to expand the range of isotopes by increasing the luminosity of the spectrometer and reducing the background of gamma rays and fast neutrons, and to increase the spatial resolution to the atomic level. The application of the isotope-identifying reflectometry method significantly expands the possibilities for studying multilayer magnetic heterostructures.

References

1. Zhaketov V.D. *et al.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. P. 478–487.
2. Zhaketov V.D. *et al.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2021. V. 15. P. 549–562.
3. Khaydukov Yu. N. *et al.* // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 140503.
4. Mironov S. *et al.* // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 113. P. 022601.