

02,05,12

## Структурные свойства сверхрешеток Nb/Dy и Nb/Ho

© В.Д. Жакетов<sup>1</sup>, Д.И. Девятериков<sup>2</sup>, М.М. Авдеев<sup>1,3</sup>, Д.А. Норов<sup>1,3</sup>, Е.Д. Колупаев<sup>1,3</sup>, М.О. Кузьменко<sup>1</sup>,  
Н.Г. Пугач<sup>4</sup>, Ю.Н. Хайдуков<sup>3</sup>, Е.А. Кравцов<sup>2,5</sup>, Ю.В. Никитенко<sup>1</sup>, В.Л. Аксенов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований,  
Дубна, Россия

<sup>2</sup> Институт физики металлов УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>4</sup> Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,  
Москва, Россия

<sup>5</sup> Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: zhaketov@nf.jinr.ru

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Рассмотрены эффекты близости в структурах с гелимагнитным упорядочением. Методом магнетронного напыления изготовлены структуры с резкими границами. С помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов получены результаты, указывающие на изменение магнитного состояния гелимагнетика под влиянием сверхпроводимости. Предложен новый тип структур с чередующимися слоями сверхпроводника и редкоземельного гелимагнетика для исследования магнитных эффектов близости. Результаты исследований с помощью рентгеновских методов и атомно-силовой микроскопии демонстрирует высокое качество полученных структур.

**Ключевые слова:** гелимагнетизм, сверхпроводимость, гетероструктуры, сверхрешетки, нейтронная рефлектометрия.

DOI: 10.21883/FTT.2023.07.55832.35H

### 1. Введение

В настоящее время активно исследуются эффекты близости на границе раздела двух сред. Особый интерес представляют двумерные низкоразмерные структуры со сверхпроводящими (S) и ферромагнитными (F) свойствами, в которых реализуется взаимодействие двух антагонистичных друг другу параметров порядка [1–3]. К проявлениям влияния ферромагнетизма на сверхпроводящие свойства S/F-гетероструктур относятся фазовые изменения сверхпроводящего параметра порядка ( $\pi$ -фазная сверхпроводимость) и спин-триплетное куперовское спаривание. Исследованию обратных эффектов близости, при которых сверхпроводимость влияет на ферромагнетизм, уделяется меньше внимания [4–6]. Такие магнитные эффекты близости ожидаются в системах, в которых температуры ферромагнитного и сверхпроводящего переходов сравнимы. Перспективными системами для изучения эффектов близости являются S/F-гетероструктуры из ниобия и редкоземельных (RE) металлов [7,8]. В первую очередь отмечается высокая прозрачность границы раздела S/F для таких систем RE/Nb, как Gd/Nb, что упрощает проникновение сверхпроводящих корреляций в F-слои. Во-вторых, редкоземельные металлы характеризуются слабым ферромагнетизмом, что сближает энергии обоих взаимодействий и облегча-

ет реализацию эффектов близости. В-третьих, некоторые редкоземельные элементы, такие как Dy и Ho, являются редкоземельными антиферромагнетиками с геликоидальной структурой, позволяющей генерировать дальнодействующую триплетную сверхпроводимость.

Геликоидальная магнитная структура формируется в объемном Dy в интервале между температурой Кюри ( $T_F = 85$  К) и температурой Нееля ( $T_N = 178$  К), в объемном Ho в интервале между  $T_F = 18$  К и  $T_N = 132$  К. В связи с влиянием размерных эффектов и эпитаксиальных напряжений в низкоразмерных гетероструктурах на основе Dy и Ho магнитная структура проявляет особенности, такие как изменение температур Кюри и Нееля и отличные значения периодов геликоид по сравнению с объемными материалами. В работах [9–12] исследовались тонкие пленки Dy(200 nm) и Ho(200 nm) и сверхрешетки [Dy(6 nm)/Ho(6 nm)]. Показано изменение температур фазовых переходов, например, уменьшение температуры Кюри в тонкой пленке Dy(200 nm). Отметим, что возможность создания спиновых вентилях на основе таких структур рассмотрена в работах [13–15]. В работе [16] исследовались трехслойные системы Ho/Nb/Ho и Dy/Nb/Dy, показано, что температура сверхпроводящего перехода отличается на 400 мК в случаях нулевого магнитного поля и наличия приложенного магнитно-

го поля в плоскости структуры. Обратные эффекты, связанные с изменением состояния гелимагнетика под влиянием сверхпроводимости, никогда не исследовались. Целью настоящей работы являлось впервые провести такое исследование. Первая задача работы состояла в обнаружении изменения магнитного состояния периодической структуры [Dy/Ho] напыленной на буферный слой сверхпроводящего ниобия. Данная структура была изготовлена для исследования взаимовлияния в низкоразмерной системе двух различных гелимагнетиков Dy и Ho, в работе [9] заключено, что в свехрешетках [Dy(6 nm)/Ho(6 nm)] периоды магнитных геликоид в слоях Dy и Ho превышают периоды геликоид для объемных Dy и Ho из-за размерных эффектов. В представленной работе проведен более детальный анализ низкотемпературных измерений, полученных для данной структуры, при температуре ниже  $T_c(\text{Nb})$ . Вторая задача работы состояла в предложении более оптимальных периодических структур с чередующимися сверхпроводящими и гелимагнитными слоями с необходимыми параметрами. В работе [7] исследовались периодические структуры Nb/Gd, тонкие ферромагнитные слои Gd с толщинами примерно равными и менее корреляционной длины сверхпроводимости в ферромагнетике  $\xi_F(\text{Gd}) = 4 \text{ nm}$ , находились между сверхпроводящими слоями с толщинами  $d(\text{Nb}) = 25 \text{ nm}$ . При таком подходе сверхпроводящие корреляции проникают в ферромагнитные слои. В работе заключено, что граница раздела между редкоземельным элементом и сверхпроводящим Nb характеризуется низким значением среднеквадратичной амплитуды шероховатостей не более 1 nm, отклонение толщин слоев от номинальных значений не более 10%. Данное качество структур позволило исследовать эффекты близости, наблюдался диамагнетизм периодической ферромагнитно-сверхпроводящей структуры Nb/Gd при температуре ниже сверхпроводящей критической. В рамках данной работы были изготовлены периодические структуры Nb/Dy и Nb/Ho с аналогичными толщинами, описанными в работе [7]. Задачей было определить параметры и качество полученных структур. В дальнейшей работе планируются нейтронные исследования данных систем.

Отметим также преимущество исследуемых в данной работе многослойных структур с геликоидальной/веерной намагниченностью по сравнению с многослойными структурами из чередующихся ферромагнитных слоев с неколлинеарной намагниченностью и толстыми ферромагнитными слоями (Ho и Dy) с геликоидальной намагниченностью. В первом случае недостатками является, то, что, во-первых, неколлинеарная намагниченность изменяется на длине значительно большей, чем период геликоида  $d_{he} \approx 3-4 \text{ nm}$ , что будет разрушать сверхпроводящие корреляции. Во-вторых, магнитные геликоиды существуют при магнитных полях  $H > 1.5 \text{ T}$ , в то время как неколлинеарная намагниченность переходит в коллинеарную в многослойных структурах из чередующихся ферромагнитных слоев

уже при полях в несколько сотен-тысяч Эрстед, рабочим значением поля является коэрцитивная сила. В-третьих, качество границы раздела между Nb и редкоземельными элементами выше, чем границы между Nb и металлами переходной группы [7,8]. Недостатком второго типа систем, является сложность проникновения сверхпроводящих корреляций в толстые пленки гелимагнетика и их дальнейшее разрушение обменным полем. Более оптимальными системами являются S/F/S системы, где толщина магнитного слоя менее корреляционной длины сверхпроводимости в ферромагнетике и сверхпроводящие корреляции полностью проникают в магнитные слои, зажатые сверхпроводящими слоями [17].

## 2. Низкотемпературные измерения свехрешетки [Dy(6 nm)/Ho(6 nm)]

В работе [9] с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов на рефлектометре РЕМУР реактора ИБР-2 исследовалась периодическая гетероструктура  $\text{Al}_2\text{O}_3(1\bar{1}02)/\text{Nb}(40 \text{ nm})/[\text{Dy}(6 \text{ nm})/\text{Ho}(6 \text{ nm})]_{34}/\text{Nb}(10 \text{ nm})$ . В представленной работе проведен более детальный анализ низкотемпературных измерений, полученных для данной структуры, при температуре ниже  $T_c(\text{Nb})$ . В работе [12] показано, что границы раздела в таких системах, характеризуются среднеквадратичным значением амплитуды шероховатостей, составляющим пять-шесть атомных монослоев. Отметим, что на основе работ [7,8] качественные прозрачные границы, необходимые для возникновения эффектов близости, характеризуются значением амплитуды шероховатостей не более 1.5 nm. Слой Nb на поверхности служит в качестве защиты структуры от деградации и окисления. Тонкие пленки Nb могут проявлять сверхпроводящие свойства начиная с толщин более 10 nm. Но поскольку поверхностная часть 2–3 nm полученного слоя Nb(10 nm) является окислом, не обладающим сверхпроводящими свойствами, можно заключить, что защитный слой Nb не является сверхпроводящим, поскольку толщина чистого Nb менее 10 nm.

Нейтронные измерения периодической структуры [Dy(6 nm)/Ho(6 nm)]<sub>34</sub> проводились на времяпролетном рефлектометре поляризованных нейтронов РЕМУР расположенном на восьмом канале реактора ИБР-2 [18]. Измерения проводились при угле скольжения нейтронного пучка на образце  $\theta = 19.1 \text{ mrad}$ , в диапазоне длин волн нейтронов  $\lambda_n = 1-10 \text{ \AA}$ . На рис. 1 показана зависимость пропорциональной магнитному моменту разности коэффициентов зеркального отражения нейтронов  $S = R_+ - R_-$ . Данные приведены для Брэгговского пика первого порядка, полученного на периоде свехрешетки. Образец охлаждался в магнитном поле  $H = 1 \text{ kOe}$ , измерение проводилось в этом же поле. Видно, что с уменьшением температуры  $S$  возрастает, что указывает на то, что гелимагнитное упорядочение трансформируется в веерное, поскольку возрастает коллинеарная компонента

намагниченности. Но при  $T = 1.5 \text{ K} < T_c(\text{Nb})$  наблюдается обратное поведение, т.е. уменьшение  $S$ , что указывает на восстановление гелимагнитной фазы из веерной. Данное поведение связано с тем, что гелимагнитная фаза является энергетически более выгодной для существования сверхпроводящих корреляций. Интегральное макроскопическое значение магнитной индукции в гелимагнетике равно нулю, в то время как для магнетика с веерным магнитным упорядочением данное значение отлично от нуля. Очевидно, что для сверхпроводящих корреляций более выгоден первый случай, в связи с чем и происходит подстройка магнитного упорядочения в магнитных слоях. Данный механизм аналогичен описанному в работах [2,3,19,20], где сделан вывод, что одним из проявлений влияния сверхпроводника, контактирующего с ферромагнетиком, является образование в ферромагнетике особой доменной структуры (криптоферромагнитного состояния), в которой размер доменов  $d$  составляет порядка сверхпроводящей корреляционной длины в ферромагнетике  $\xi_F \approx 1-10 \text{ nm}$ . Стоит отметить, что наблюдаемый эффект достаточно большой, что указывает на его дальнее действие, характерное при образовании спин-триплетных корреляций. Синглетные и триплетные корреляции в сверхпроводнике изменяются на длине сверхпроводящей когерентности, что составляет около  $\xi \approx 12 \text{ nm}$  в Nb. В спиральный магнетик дальнедействующие корреляции проникают на длину, определяемую длиной дальнедействующих корреляций, обратно пропорциональной значению температуры, и периодом магнитной спирали, что следует из решения характеристического уравнения для волновых векторов решений уравнений Узалея в „грязном“ случае. Оценим глубину проникновения сверхпроводящих корреляций в магнитные слои. Из рис. 1 видно, что магнитный момент структуры  $M \sim S$  уменьшается на  $\approx 20\%$  при переходе от  $T = 10 \text{ K}$  к  $T = 1.5 \text{ K}$ . Предположим, что воздействие сверхпроводимости соответственно происходит только на  $20\%$  от толщины всей магнитной структуры  $20\% \cdot 2 \cdot 6 \cdot 34 \approx 80 \text{ nm}$ . На основе работ [9-11] примем значение периода магнитного геликоида равным  $\approx 3 \text{ nm}$ . Тогда воздействие дальнедействующих сверхпроводящих корреляций происходит на глубину равную  $80/3 \approx 27$  периодам магнитной спирали. Стоит отметить, что другими механизмами, объясняющими данное явление, могут быть: мейснеровская экранировка полей рассеяния сверхпроводником, магнитоэлектронное взаимодействие с вихрями в сверхпроводнике, экранировка намагниченности наведенной в многослойной структуре сверхпроводимостью. Требуется дополнительные экспериментальные измерения и их анализ. Небольшое смещение по  $Q$  зависимостей, представленных на рис. 1, связано с точностью установления угла скольжения нейтронного пучка. Можно заключить, что при  $T > 10 \text{ K}$  при охлаждении структуры гелимагнитное упорядочение трансформируется в веерное, поскольку возрастает коллинеарная компонента намагниченности, что соответствует переходу в ферромагнитное состоя-

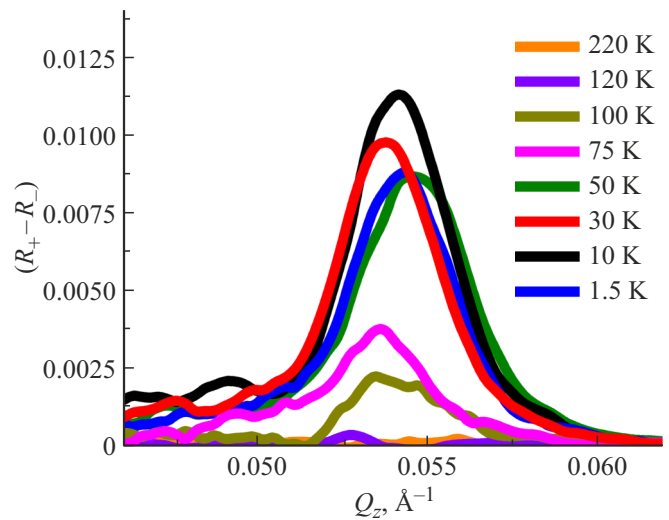


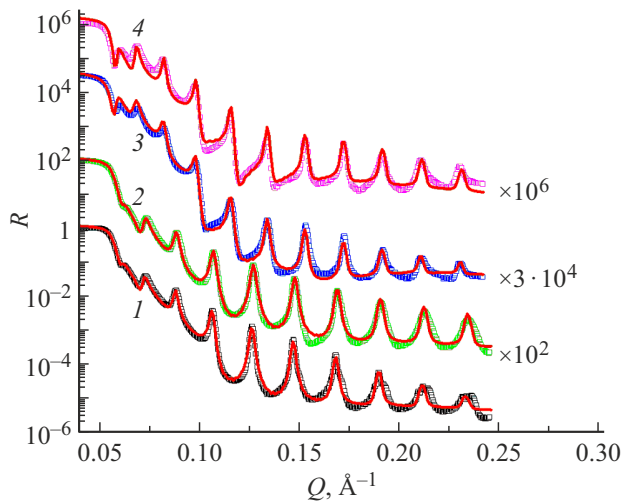
Рис. 1. Разность коэффициентов зеркального отражения нейтронов, полученная при различных значениях температуры в магнитном поле  $H = 1 \text{ kOe}$ .

ние для объемных Dy и Ho, при  $T = 1.5 \text{ K} < T_c(\text{Nb})$  изменение магнитного состояния связано с влиянием сверхпроводимости.

### 3. Структурные свойства сверхрешеток $[\text{Nb}(25 \text{ nm})/\text{Dy}(d_F)]$ и $[\text{Nb}(25 \text{ nm})/\text{Ho}(d_F)]$

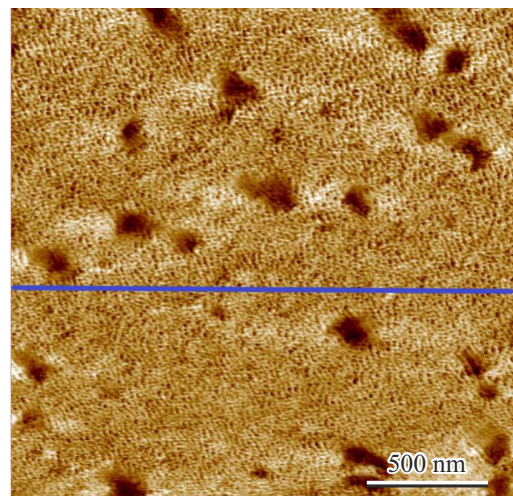
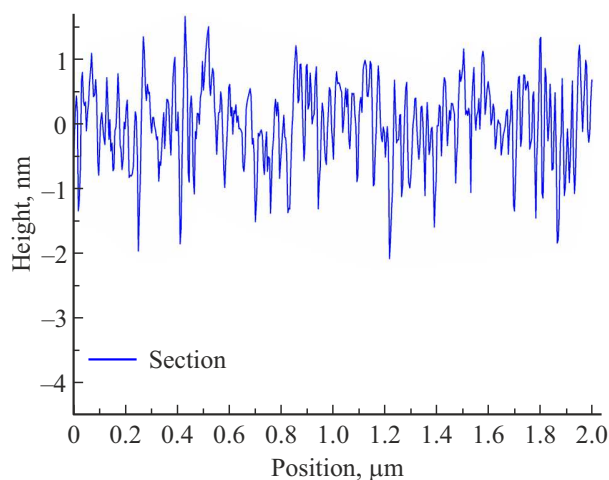
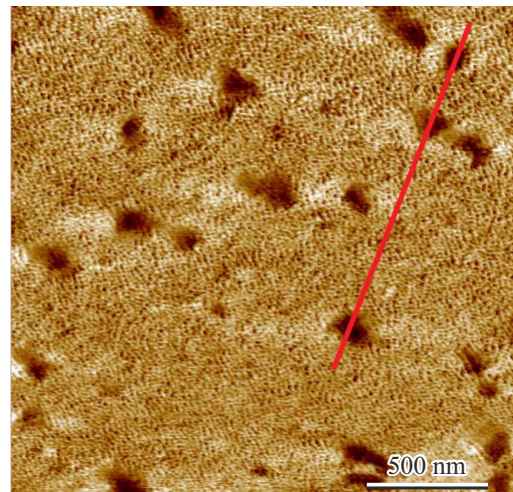
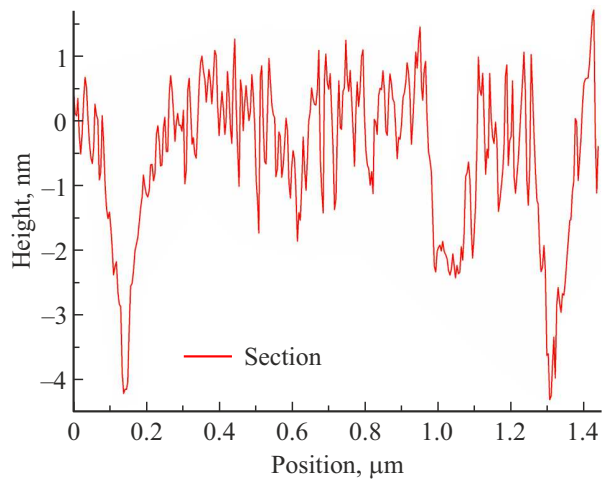
В описанной в разд. 2 системе сверхпроводящим является только буферный слой Nb(40 nm). Были изготовлены более оптимальные системы для исследования влияния сверхпроводимости на гелимагнитное упорядочение. Структуры представляют из себя сверхрешетки с чередующимися F и S слоями:  $\text{Al}_2\text{O}_3(1\bar{1}02)/[\text{Nb}(25 \text{ nm})/\text{RE}(d_F)]_{12}/\text{Nb}(5 \text{ nm})$ , где RE = Dy, Ho,  $d_f = 2, 4, 6 \text{ nm}$ , таким образом изготовлены структуры с толщиной магнитных слоев как меньше, так и больше периода магнитного геликоида  $d_h \sim 3-4 \text{ nm}$ . Структуры были изготовлены с помощью магнетронного напыления на установке ULVAC-MPS-4000-C6 в ИФМ УрО РАН по аналогичной процедуре, описанной в работе [9]. В качестве подложки использовался монокристалл  $(1\bar{1}02)\text{Al}_2\text{O}_3$ . Для защиты структуры от окисления сверху структуры был напылен слой Nb(5 nm). Проведена аттестация данных структур.

Структуры  $[\text{Nb}(25 \text{ nm})/\text{RE}(d_F)]_{12}$  были исследованы на рентгеновском дифрактометре EMPYRIAN (Malvern PANalytical) в геометрии  $\theta-2\theta$  с использованием излучения  $\text{CuK}\alpha$  с длиной волны  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ . Характеризация периодических гетероструктур проводилась посредством получения кривых зеркального отражения, после чего подбиралась модель многослойной системы с целью определения профиля плотности длины рассеяния (ПДР). Угол падения варьировался от 0.12

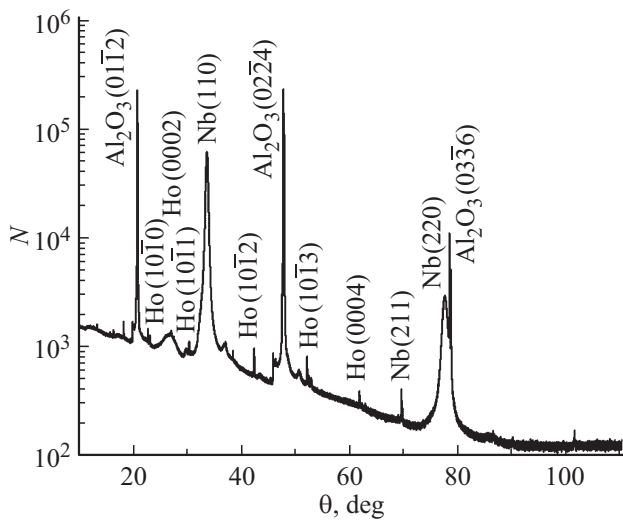


**Рис. 2.** Коэффициент зеркального отражения рентгеновских лучей для структур: 1 —  $[\text{Nb}(25 \text{ nm})/\text{Dy}(2 \text{ nm})]_{12}$ , 2 —  $[\text{Nb}(25 \text{ nm})/\text{Ho}(2 \text{ nm})]_{12}$ , 3 —  $[\text{Nb}(25 \text{ nm})/\text{Dy}(6 \text{ nm})]_{12}$ , 4 —  $[\text{Nb}(25 \text{ nm})/\text{Ho}(6 \text{ nm})]_{12}$ . Точками показаны экспериментальные зависимости, красным — теоретический расчет.

до  $1.75^\circ$ , что соответствовало диапазону векторов рассеяния  $q_z = 0.017\text{--}0.25 \text{ \AA}^{-1}$ . На рис. 2 показаны зависимости коэффициента зеркального отражения рентгеновских лучей для образцов как с различными редкоземельными элементами в качестве F-слоя, так и с различными толщинами самого F-слоя. Рефлектометрические кривые обрабатывались в рамках формализма Парратта с использованием пакета Motofit для программного обеспечения IGOR PRO [21]. Из обработки данных получено, что толщины слоев Nb отличаются не более чем на 1 nm относительно номинального значения, а расчетная ПДР для Nb крайне близка к табличному значению ( $64 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}^{-2}$ ). Для слоев Dy или Ho толщины также близки к номинальным значениям, однако расчетная ПДР этих слоев заметно выше табличной ( $50.1 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}^{-2}$  и  $46.5 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}^{-2}$  соответственно), что может свидетельствовать о наличии достаточно толстых промежуточных слоев в случае  $d_F = 6 \text{ nm}$ , а в случае  $d_F = 2 \text{ nm}$  об отсутствии чистого F-слоя. Межслойные границы характеризуются среднеквадратической амплитудой шероховатостей для всех слоев не более



**Рис. 3.** Линейные высотные профили поверхностного слоя Nb участка, содержащего поры (верхний срез), и гладкого участка (нижний срез).



**Рис. 4.** Рентгенограмма для структуры  $[\text{Nb}(25 \text{ nm})/\text{Ho}(4 \text{ nm})]_{12}$ , полученная в геометрии  $\theta-2\theta$ , дифракционные пики проиндексированы.

$R_q \sim 1.5 \text{ nm}$ , однако нужно отметить, что для поверхностного слоя Nb шероховатость велика для всех образцов и составляет  $2.5-3 \text{ nm}$ . Таким образом показана высокая повторяемость бислоев Dy/Nb и Ho/Nb по глубине структуры, при этом реальная толщина слоев отличается не более чем на 5% от номинальных значений. Данные демонстрируют однородность этих систем на уровне структур Nb/Gd [7].

Методом атомно-силовой микроскопии был проведен анализ поверхностного слоя Nb (5 nm) с целью проверки качества и сопоставления с данными рентгеновской рефлектометрии. Анализ рельефа поверхности проводился при помощи атомно-силового микроскопа (ACM) — NTEGRA (NM MDT Spectrum Instruments) — в полуконтактном („теппинг“) режиме. В качестве зонда использовался кантелевер HA\_HR (Si зонд,  $R < 10 \text{ nm}$ ,  $k = 34 \text{ N/m}$ ,  $\nu = 380 \text{ kHz}$ ). Изображения получены в качестве  $512 \times 512$ , линейная скорость сканирования составляла  $0.2-0.3 \text{ Hz}$  для каждой строки, область сканирования составляла  $2 \times 2 \mu\text{m}$ . Получен высотный профиль поверхности слоя Nb, представляющий из себя поверхность с большим числом сквозных пор, а также „рябью“, характерной для слоев Nb [22]. Последующая обработка изображений поверхности показала, что данные поры со средним размером  $89 \text{ nm}$  пронизывают слой Nb, а их характерная глубина составляет  $5.2 \text{ nm}$ , что соответствует толщине самого слоя (рис. 3). Среднеквадратичная шероховатость поверхности без пор составляет  $S_q = 0.65 \text{ nm}$ , что меньше значений в случае модельных рефлектометрических кривых. Таким образом, большая эффективная шероховатость слоя Nb в методе рефлектометрии связана с наличием большого числа пор на поверхности.

Рентгеновские дифракционные измерения проводились в геометрии  $\theta-2\theta$ , угол падения варьировался

от  $10$  до  $110^\circ$ . На рис. 4 представлена рентгенограмма для структуры  $d_F(\text{Ho}) = 4 \text{ nm}$ . Проиндексированные дифракционные пики аналогичны результатам, представленным в работе [10]. Поэтому по аналогии сделано заключение, что параметры кристаллической решетки Nb, Ho, Dy соответствуют объемным кристаллам. Ориентация кристаллической структуры слоев Dy, Ho соответствует направлению оси геликоида в направлении, перпендикулярном плоскости структуры.

#### 4. Заключение

Продемонстрирована возможность управления магнитным упорядочением гелимагнетика с помощью сверхпроводимости. Показано, что в периодической структуре Dy/Ho, напыленной на сверхпроводящий буфер Nb, всеорное магнитное упорядочение трансформируется в гелимагнитное при температуре ниже  $T_c(\text{Nb})$ . Предложены и изготовлены структуры с чередующимися слоями сверхпроводника и редкоземельного гелимагнетика, предназначенные для исследования магнитных эффектов близости. Рентгеноструктурные и микроскопические исследования выявили высокое качество структур, что соответствует необходимым для исследований требованиям. Толщины слоев отличаются не более чем на 5% относительно номинального значения, среднеквадратичная амплитуда шероховатостей составила не более  $1.5 \text{ nm}$ , межслойные границы можно характеризовать, как границы с высокой степенью гладкости. Высокое качество полученных структур позволит исследовать влияние сверхпроводимости на гелимагнитное упорядочение, в частности на период геликоида.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-72-00116. Синтез образцов выполнен в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема „Спин“ № АААА-А18-118020290104-2). Также работа выполнена при финансовой поддержке научного фонда НИУ ВШЭ и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-1353.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] S. Mironov, A.S. Mel'nikov, A. Buzdin. Appl. Phys. Lett. **113**, 022601 (2018).
- [2] A.I. Buzdin. Rev. Mod. Phys. **77**, 3, 935 (2005).
- [3] P.W. Anderson, H. Suhl. Phys. Rev. **116**, 898 (1959).
- [4] Yu.V. Nikitenko, V.D. Zhaketov. Phys. Part. Nucl. **53**, 6, 1089 (2022).

- [5] В.Д. Жакетов, Ю.В. Никитенко, Ю.Н. Хайдуков, О.В. Скрыбина, А. Чик, М.М. Борисов, Э.Х. Мухамеджанов, С.Н. Вдовичев, Е.И. Литвиненко, А.В. Петренко, А.В. Чураков. *ЖЭТФ* **156**, 2, 310 (2019). [V.D. Zhaketov, Yu.V. Nikitenko, Yu.N. Khaidukov, O.V. Skryabina, A. Csik, M.M. Borisov, E.Kh. Mukhamedzhanov, S.N. Vdovichev, E.I. Litvinenko, A.V. Petrenko, A.V. Churakov. *J. Exp. Theor. Phys.* **129**, 2, 258 (2019)].
- [6] В.Д. Жакетов, Ю.В. Никитенко, Ф. Раду, А.В. Петренко, А. Csik, М.М. Борисов, Э.Х. Мухамеджанов, В.Л. Аксенов. *ЖЭТФ* **151**, 1, 132 (2017). [V.D. Zhaketov, Yu.V. Nikitenko, F. Radu, A.V. Petrenko, A. Csik, M.M. Borisov, E.Kh. Mukhamedzhanov, V.L. Aksenov. *J. Exp. Theor. Phys.* **124**, 1, 114 (2017)].
- [7] Yu.N. Khaydukov, E.A. Kravtsov, V.D. Zhaketov, V.V. Proglyado, G. Kim, Yu.V. Nikitenko, T. Keller, V.V. Ustinov, V.L. Aksenov, B. Keimer. *Phys. Rev. B* **99**, 140503(R) (2019).
- [8] Yu.N. Khaydukov, A.S. Vasenko, E.A. Kravtsov, V.V. Proglyado, V.D. Zhaketov, A. Csik, Yu.V. Nikitenko, A.V. Petrenko, T. Keller, A.A. Golubov, M.Yu. Kupriyanov, V.V. Ustinov, V.L. Aksenov, B. Keimer. *Phys. Rev. B* **97**, 144511 (2018).
- [9] Д.И. Девятериков, Е.А. Кравцов, В.В. Проглядо, В.Д. Жакетов, Ю.В. Никитенко. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* **10**, 24 (2022). [D.I. Devyaterikov, E.A. Kravtsov, V.V. Proglyado, V.D. Zhaketov, Yu.V. Nikitenko. *J. Surf. Investigation* **16**, 5, 839 (2022)].
- [10] Д.И. Девятериков, В.В. Проглядо, В.Д. Жакетов, Ю.В. Никитенко, О.А. Кондратьев, Э.М. Пашаев, И.А. Субботин, В.И. Зверев, Е.А. Кравцов, В.В. Устинов. *ФММ* **122**, 5, 499 (2021). [D.I. Devyaterikov, V.V. Proglyado, V.D. Zhaketov, E.A. Kravtsov, V.V. Ustinov. *Phys. Met. Metallogr.* **122**, 5, 465 (2021)].
- [11] Д.И. Девятериков, Е.А. Кравцов, В.В. Проглядо, В.Д. Жакетов, Ю.В. Никитенко. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* **6**, 3 (2021). [D.I. Devyaterikov, E.A. Kravtsov, V.V. Proglyado, V.D. Zhaketov, Yu.V. Nikitenko. *J. Surf. Investigation* **15**, 3, 542 (2021)].
- [12] Д.И. Девятериков, В.О. Васьковский, В.Д. Жакетов, Е.А. Кравцов, М.В. Макарова, В.В. Проглядо, Е.А. Степанова, В.В. Устинов. *ФММ* **121**, 12, 1229 (2020). [D.I. Devyaterikov, V.O. Vas'kovsky, V.D. Zhaketov, E.A. Kravtsov, M.V. Makarova, V.V. Proglyado, E.A. Stepanova, V.V. Ustinov. *Phys. Met. Metallogr.* **121**, 12, 1127 (2020)].
- [13] N.G. Pugach, M.O. Safonchik, V.I. Belotelov, T. Ziman, T. Champel. *Phys. Rev. Appl.* **18**, 5, 054002 (2022).
- [14] V.O. Yagovtsev, N.A. Gusev, N.G. Pugach, M. Eschrig. *Supercond. Sci. Technol.* **34**, 025003 (2021).
- [15] N.G. Pugach, M. Safonchik, T. Champel, M.E. Zhitomirsky, E. Lähderanta, M. Eschrig, C. Lacroix. *Appl. Phys. Lett.* **111**, 162601 (2017).
- [16] Yu, Gu, Gábor B. Halász, J.W.A. Robinson, M.G. Blamire. *Phys. Rev. Lett.* **115**, 067201 (2015).
- [17] N. Klenov, Yu. Khaydukov, S. Bakurskiy, R. Morari, I. Soloviev, V. Boian, T. Keller, M. Kupriyanov, A. Sidorenko, B. Keimer. *Beilstein J. Nanotechnol.* **10**, 833–839 (2019).
- [18] V.L. Aksenov, K.N. Jernenkov, S.V. Kozhevnikov, H. Lauter, V. Lauter-Pasyuk, Yu.V. Nikitenko, A.V. Petrenko. *Communication of the JINR*, D13-2004-47 (2004).
- [19] А.И. Буздин, Л.Н. Булаевский. *ЖЭТФ* **94**, 256 (1988).
- [20] F.S. Bergeret, K.B. Efetov, A.I. Larkin. *Phys. Rev. B* **62**, 11872 (2000).
- [21] A. Nelson. *J. Appl. Cryst.* **39**, 273 (2006).
- [22] L.R. Nivedita, A. Haubert, A.K. Battu, C.V. Ramana. *Nanomaterials (Basel)* **10**, 7, 1287 (2020).

*Редактор Ю.Э. Кутяев*