

# Ферромагнитно-сверхпроводящие слоистые квазикристаллы

В. Д. Жакетов<sup>1,2,3,\*</sup>, С. Е. Богуславский<sup>3</sup>, Д. И. Девятериков<sup>4</sup>, Заки А. Заки<sup>5</sup>,  
Маха М. Абделахди<sup>6</sup>, Д. А. Норов<sup>3</sup>, Е. А. Кравцов<sup>4,7</sup>, В. Л. Аксенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Институтский переулок, 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Московская обл., 141980

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991

<sup>4</sup>Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 18, Москва, 620108

<sup>5</sup>TH-PPM Group, Physics Department, Faculty of Science, Beni-Suef University, Beni-Suef, Egypt, 62521

<sup>6</sup>Cairo University, 1 Gamaa Street, Giza, Egypt, 12613

<sup>7</sup>Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002

\*zhaketov.vd@mipt.ru

Предложено исследовать слоистые квазикристаллы из чередующихся сверхпроводящих и ферромагнитных слоев, оптимальные для исследования с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов. Данные системы позволят изучать нетривиальные сильнокоррелированные явления, такие как фрактальная сверхпроводимость и дальний магнитный порядок в квазипериодической системе, а также их сосуществование.

## Введение

Квазикристалл – твердое тело, структура которого характеризуется наличием дальнего порядка, но не является периодической, т. е. описывается симметрией, запрещенной в классической кристаллографии [1]. При этом для квазикристаллов наряду с обычными кристаллами характерна дискретная дифракционная картина. Геометрической абстракцией описывающей квазикристаллы является мозаика Пенроуза. На данный момент широко известно множество материалов, обладающих квазикристаллическостью, как искусственно синтезированных, так и натуральных. Отметим, что возможно создание искусственных слоистых систем, обладающих квазикристаллическостью в направлении перпендикулярном плоскости структуры (рис. 1).

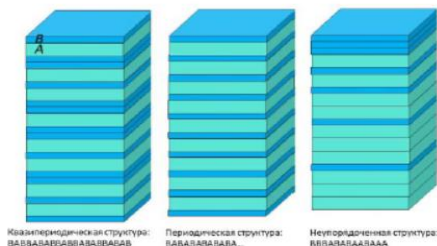


Рис. 1. Квазипериодическая структура, полученная для члена ряда Фибоначчи  $S_7$ ; периодическая структура; неупорядоченная структура, полученная с помощью генератора случайных чисел

Для рефлектометрической картины будут наблюдаться дифракционные пики, несмотря на аперидичность системы, что связано с наличием скрытого дальнего порядка, который можно продемонстрировать с помощью преобразования Фурье:

$$F(\mathbf{k}) = \lim_{N \rightarrow \infty} N^{-1} \sum_{\mathbf{z}_n} \exp(i\mathbf{kz}_n), \quad (1)$$

где  $N$  – количество слоев,  $\mathbf{z}_n$  – пространственное положение слоев,  $\mathbf{k}$  – волновой вектор. Можно сформулировать следующие итерационные правила для построения аперидической слоистой структуры:  $A \rightarrow B$ ,  $B \rightarrow BA$ , где  $A$  – это слой первого типа,  $B$  – слой второго типа [2]. Если стартовым элементом будет  $B$ , тогда итерационно можно получить сле-

дующие члены ряда Фибоначчи:  $S_1 = B$ ,  $S_2 = BA$ ,  $S_3 = BAB$ ,  $S_4 = BABBA$ ,  $S_5 = BABBBABAB$ ,  $S_6 = BABBBABABBBABBA$  и т. д. Исследование подобных систем представляет интерес, во-первых, с точки зрения нейтронной и рентгеновской оптики. Так, в работе [2] продемонстрирована возможность усиления сигнала фотолюминесценции для квазипериодической слоистой системы. Данный подход актуален для развития, например, методики регистрации вторичного излучения в рефлектометрии поляризованных нейтронов [3].

## Применение слоистых квазикристаллов

С другой стороны, являются интригующими сверхпроводящие и магнитные свойства квазикристаллов. В работе [4] описывается наблюдение сверхпроводящего перехода в объемном квазикристалле Al-Zn-Mg при температуре  $T_c < 0,05$  К. Таким образом авторы показали возможность существования сверхпроводящих корреляций в квазипериодических системах, а данный вид сверхпроводимости назвали «фрактальным». Говоря о магнитном поведении в ряде квазикристаллов, наблюдалось состояние спинового стекла, но в работе [5] показано, что в квазикристаллах Au-Ga-Gd и Au-Ga-Tb возможен «экзотический» дальний магнитный порядок. При этом характерные температуры Кюри для данных материалов относительно низкие,  $T_{Curie} < 25$  К. Описанные материалы имеют сложную химическую и электронную структуры, а для исследования сверхпроводящих и магнитных эффектов предпочтительнее более простые системы. Так в работах [6, 7] было показано, что когерентный магнитный сверхпроводник можно реализовать чередованием слоев сверхпроводящего Nb и магнитных редкоземельных металлов Gd, Dy или Ho. Данные модельные системы проще для изготовления и исследований, чем, например, сложно упорядоченные урановые ферромагнитные сверхпроводники [8]. Поэтому в данной работе предлагается создать слоистые квазикристаллы из чередующихся сверхпроводящих и ферромагнитных слоев типа Nb/Gd. Данные модельные системы просты для изготовления и исследований, но позволят изучать нетривиальные явления, такие как фрактальная сверхпроводимость и дальний магнитный порядок в квазипериодической

системе, а также их сосуществование. Отметим, что прежде в слоистых квазипериодических структурах исследовался только электронный перенос для различных полупроводников [9]; авторами работы сделан вывод, что различного типа квазипериодичность сверхрешетки Фибоначчи влияет на электронный спектр.

### Нейтронные расчеты

На рис. 2 показаны расчеты коэффициента отражения нейтронов для слоистой квазипериодической структуры типа Gd(2 нм)/Nb(25 нм), аналогичная периодическая система исследовалась в работе [7]. Показаны расчетные зависимости для различных порядков Фибоначчи. Толщина ферромагнитного слоя равна половине корреляционной длины сверхпроводимости в гадолинии:  $d(\text{Gd}) = 0,5 \cdot \xi_F(\text{Gd}) = 0,5 \times 4 \text{ нм} = 2 \text{ нм}$ . Угол скольжения нейтронного пучка на образце 5 мрад. Магнитная индукция в данном расчете принималась равной нулю. В расчетах полагалось, что структура напылена на подложку сапфира.

Видно, что коэффициент отражения нейтронов перестает изменяться, начиная с порядка Фибоначчи  $F_{10}$ .

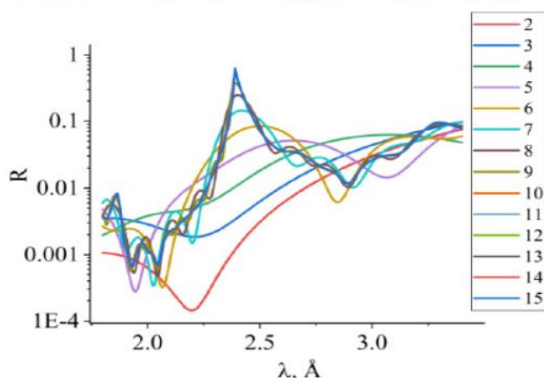


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения нейтронов от длины волны нейтрона для слоистой квазипериодической структуры типа Gd (2 нм)/Nb (25 нм), для различных порядков Фибоначчи  $F_N$

На рис. 3 показаны коэффициенты отражения нейтронов для квазипериодической, периодической и неупорядоченной слоистых структур. Расчет приведен для слоистой структуры типа Gd (2 нм)/Nb (25 нм). Приведен расчет для квазипериодической структуры порядка Фибоначчи  $F_9$ , для данной структуры характерно 34 слоя Gd, что является оптимальным значением при напылении структуры. При расчетах учитывалось, чтобы суммарная толщина гадолиния и ниобия была одинаковой для всех трех типов структур. Показано, что для неупорядоченной структуры не наблюдается эквидистантных пиков, при этом видны характерные брэгговские пики для периодической структуры. Для квазипериодической структуры

наблюдаются более явно выраженные «квази-брэгговские» пики.

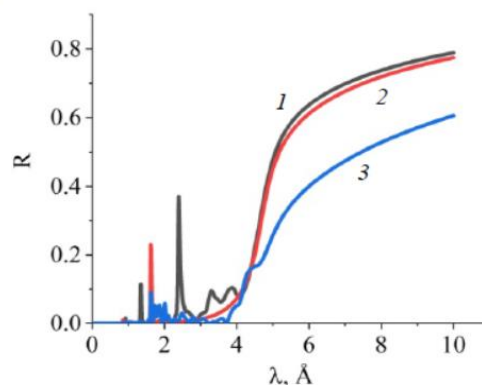


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения нейтронов от длины волны для квазипериодической (1), периодической (2) и неупорядоченной (3) слоистой структуры

### Выводы

В данной работе предлагается создать слоистые квазикристаллы из чередующихся сверхпроводящих и ферромагнитных слоев типа Nb/Gd, оптимальные для исследования с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов. Данные системы позволят изучать нетривиальные сильнокоррелированные явления, такие как фрактальная сверхпроводимость и дальний магнитный порядок в квазипериодической системе, а также их сосуществование. Проведены нейтронные расчеты, показано, что коэффициент отражения нейтронов перестает изменяться, начиная с порядка Фибоначчи  $F_{10}$ . Для квазипериодической структуры наблюдаются более явно выраженные «квази-брэгговские» пики.

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-72-00116.

### Литература

1. Ю. Х. Векилов и др. // УФН. 2010. Т. 180, №6.
2. Z. Vally Vardeny, et al. // Nature Photonics. 2013. V. 7. P. 177–187.
3. В. Л. Аксёнов и др. // ЭЧАЯ. 2023. Т. 54, вып. 4. С. 898–935.
4. K. Kamiya, et al. // Nature Communications. 2018. V. 9. P. 154.
5. Ryuji Tamura, et al. // J. Am. Chem. Soc. 2021. V. 143. P. 19938–19944.
6. V. D. Zhaketov, et al. // Physics of the Solid State. 2023. V. 65, no. 7.
7. Yu. N. Khaydukov, et al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. P. 140503(R).
8. Dai Aoki, et al. // Journal of the Physical Society of Japan. 2019. V. 88. P. 022001.
9. M. Dimu, et al. // Physical Review B. 1997. V. 56, no. 4. P. 1987–1995.