

DOI: 10.18721/JPM.13402

УДК 538.911, 539.26

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ДИФФУЗНОГО РАССЕЙЯНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛЕ НИОБАТА СТРОНЦИЯ-БАРИЯ SBN-60 В РЕЛАКСОРНОЙ ФАЗЕ

**П.Ю. Ванина¹, Н.С. Силин¹, А.А. Босак²,
Д.Ю. Чернышов¹, А.А. Набережнов³**

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Европейский центр синхротронного излучения (ESRF),
г. Гренобль, Франция;

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Температурные зависимости диффузного рассеяния синхротронного излучения в монокристалле модельного релаксора $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN-60) исследованы в интервале температур 90 – 290 К в окрестности узлов обратной решетки (332), (412) и (002) в направлениях [001], [010], [110]. Показано, что диффузное рассеяние (DS) является сильно анизотропным, а его интенсивность $I_{DS}(T, q)$ пропорциональна $q^{-\alpha}$ (q – приведенный волновой вектор). Получены температурные зависимости параметра α для указанных направлений и установлено, что микроскопическая перестройка структуры в SBN-60 продолжается при охлаждении и ниже температуры перехода в релаксорное состояние.

Ключевые слова: диффузное рассеяние, синхротронное излучение, релаксор, стронций-бариевый ниобат, кристаллическая структура

Ссылка при цитировании: Ванина П.Ю., Силин Н.С., Босак А.А., Чернышов Д.Ю., Набережнов А.А. Температурная эволюция диффузного рассеяния в монокристалле ниобата стронция-бария SBN-60 в релаксорной фазе // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 4. С. 28–38. DOI: 10.18721/JPM.13402

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

TEMPERATURE EVOLUTION OF DIFFUSE SCATTERING IN THE STRONTIUM-BARIUM NIOBATE SBN-60 SINGLE CRYSTAL IN THE RELAXOR STATE

**P.Yu. Vanina¹, N.S. Silin¹, A.A. Bosak²,
D.Yu. Chernyshov¹, A.A. Naberezhnov³**

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation;

² European Synchrotron Radiation Facility,
Grenoble, France;

³ Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation

Temperature dependences of synchrotron radiation diffuse scattering on the model relaxor single crystal $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN-60) have been studied in the temperature interval from 90 to 290 K in the vicinities of lattice points (332), (412) and (002) in the [001], [010] and [110] directions. This diffuse scattering (DS) has been shown to be strongly anisotropic with intensity $I_{DS}(T, q)$ proportional $q^{-\alpha}$

where q is a reduce wavevector. The temperature dependences of the parameter α have been obtained, and it is established, that the microscopic modification of structure in the SBN-60 continues on cooling below the temperature of transition to the relaxor state.

Keywords: diffuse scattering, synchrotron radiation, relaxor, strontium-barium niobate, crystal structure

Citation: Vanina P.Yu., Silin N.S., Bosak A.A., Chernyshov D.Yu., Naberezhnov A.A., Temperature evolution of diffuse scattering in the strontium-barium niobate SBN-60 single crystal in the relaxor state, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (4) (2020) 28–38. DOI: 10.18721/JPM.13402

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Твердые растворы ниобата стронция-бария (SBN) являются модельной одноосной сегнетоэлектрической структурой, относящейся к типу вольфрамовых бронз с частично разупорядоченной структурой. При процентном содержании стронция $50 < x < 75$ % эти растворы $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (далее SBN- x) демонстрируют ярко выраженные релаксорные свойства, причем степень этих свойств растет с увеличением концентрации стронция [1].

Основа структуры SBN- x — это два типа октаэдров NbO_6 , объединенных атомами кислорода в объемный каркас. В этом каркасе имеется три типа структурных каналов, направленных вдоль полярной оси c (вдоль направления [001]). Каналы треугольного сечения в SBN- x всегда пусты, средние каналы четырехугольного сечения (A_1) заполняются только атомами стронция, широкие пятиугольные каналы (A_2) заполнены атомами бария и стронция [2]. Особенностью кристаллической структуры таких соединений является то, что на шесть возможных позиций в каналах A_1 и A_2 приходится пять двухвалентных катионов и одна вакансия, что обуславливает статистический характер распределения катионов [2].

Твердые растворы типа SBN- x , особенно при $x \approx 60$ %, привлекают большое внимание, благодаря своим релаксорным, пирозлектрическим, диэлектрическим, электрооптическим и нелинейным оптическим свойствам [3 – 6]. Кроме того, было выяснено [7], что в диапазоне концентраций стронция 50 – 60 % существует ее критическое значение, выше

которого нормальные сегнетоэлектрические домены перестают существовать, а вместо них наблюдается структура, состоящая из иглоподобных нанополярных доменов.

При комнатной температуре кристалл SBN-60 имеет тетрагональную структуру со следующими параметрами решетки:

$$\begin{aligned} a &= b = 12,4566(9) \text{ \AA}, \\ c &= 7,8698(6) \text{ \AA}. \end{aligned}$$

Следует также отметить, что структура SBN-60 является модулированной, с векторами модуляции

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_1 &= 0,3075(6) (\mathbf{a}^* + \mathbf{b}^*), \\ \mathbf{q}_2 &= 0,3075(6) (\mathbf{a}^* - \mathbf{b}^*), \end{aligned}$$

где \mathbf{a}^* , \mathbf{b}^* — векторы обратного пространства.

Наиболее адекватно кристаллическая структура монокристалла SBN-61 (близкого по концентрации) была решена в работе [8] как несоизмерная структура в пятимерном пространстве в рамках суперпространственной группы

$$P4bm (pp1/2, p-p1/2).$$

Модуляция структуры впервые наблюдалась в работе [9], и было показано [8], что она связана с коллективным искажением кислородных октаэдров и случайным заселением $4c$ -позиций в структуре SBN ионами стронция и бария. Для монокристалла SBN-60 (он близок по структуре и свойствам к SBN-61, допированному церием) была также исследована критическая динамика. Было уста-

новлено [10 – 12], что при охлаждении из высокотемпературной параэлектрической фазы, по мере приближения к температуре перехода в релаксорное состояние, вблизи узлов обратной решетки типа (00L) наблюдается поперечное диффузное рассеяние (DS) на сегнетоэлектрических флуктуациях, интенсивность которого увеличивается при понижении температуры; при этом корреляционная длина r_c возрастает. В области перехода DS состоит из двух компонент, одна из которых хорошо описывается лоренцианом

$$G_1 \sim 1/(\kappa^2 + q^2),$$

а вторая – квадратированным лоренцианом

$$G_2 \sim 1/(\kappa^2 + q^2)^2.$$

Здесь κ – обратная корреляционная длина ($r_c \sim 1/\kappa$), q – приведенный волновой вектор.

Следует отметить, что интенсивность второй компоненты резко возрастает при прохождении через температуру перехода. Была получена зависимость корреляционной длины $r_c(T)$ от температуры и показано, что ниже 340 К этот параметр «замерзает» и остается практически постоянным вплоть до 290 К [10]. Приложение внешнего электрического поля приводит к подавлению обеих компонент диффузного рассеяния, и в первую очередь, компоненты, описываемой функцией G_2 [10, 13].

Что касается особенностей кристаллической структуры SBN-60 (и ее температурной эволюции) при охлаждении в релаксорной фазе, то этот вопрос в настоящее время малоизучен: есть только результаты, указывающие на существование двух различных вкладов в диффузное рассеяние [14]. Оба типа рассеяния являются существенно анизотропными: первый наблюдается в окрестности сверхструктурных отражений и вероятно связан с рассеянием на волнах смещений в системе кислородных октаэдров, а второй – с наличием локальных областей скоррелированных смещений ионов стронция и бария в пятиугольных каналах SBN-60.

В данной работе представлены первые результаты исследования температурной эволюции DS при охлаждении от комнатной температуры до 90 К.

Экспериментальная часть

Измерения проводились на линии ID29 источника синхротронного излучения в Европейском центре синхротронного излучения (ESRF). Длина волны падающего излучения составляла $\lambda = 0,7749 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda/\lambda \approx 2 \cdot 10^{-4}$. Образцы представляли собой игольчатые кристаллы толщиной примерно 100 мкм.

Двумерные распределения интенсивности рассеяния рентгеновского излучения были получены при помощи пиксельного детектора PILATUS6M [15]. Уточнение матрицы ориентаций и предварительная реконструкция обратного пространства были проведены с использованием пакета программного обеспечения CrysAlis [16]. Измерения проводились при охлаждении в интервале температур от 290 до 90 К, стабильность поддержания температуры во время измерений была не хуже 1,5 К.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследования температурной эволюции DS проводились в окрестности узлов обратной решетки (002), (412) и (332) в трех направлениях: [001], [010] и [110], для получения информации о возможной анизотропии диффузного рассеяния.

При подгонке зависимость интенсивности I от приведенного волнового вектора q аппроксимировалась следующим выражением:

$$I(q) = I_{DS}(q) + I_{Br}(q) + I_{bkg}(q). \quad (1)$$

Первое слагаемое соответствует диффузному рассеянию DS, которое при достаточно больших значениях q ($q > \kappa$) можно аппроксимировать зависимостью $I_{DS}(q) \sim q^{-\alpha}$. Второе слагаемое $I_{Br}(q)$ описывает брэгговский вклад, а третье $I_{bkg}(q)$ – линейный вклад фона в суммарное рассеяние.

Упругий пик описывался гауссианом, из

подгонки определялось точное положение q_c максимума. Фон аппроксимировался линейной функцией, параметры определялись из усреднения по 10 – 14 точкам, которые выбирались слева и справа от q_c при больших значениях q , когда вклад упругого пика становился пренебрежимо малым, как и вклад от DS. При $|q| < 0,09$, во всех случаях интенсивный брэгговский пик не позволял надежно выделить более слабое DS, а при $|q| > 0,35$ диффузное рассеяние уже было не отличить от фона.

Рассмотрим поведение температурных зависимостей интенсивности DS в монокристалле SBN-60 в направлении [001]. На рис. 1 хорошо видно, что интенсивность DS в этом направлении при всех значениях q практически не зависит от температуры.

Далее, для этого направления были построены зависимости интенсивностей DS от q во всей исследованной температурной области в дважды логарифмическом масштабе (рис. 2). На приведенных графиках хорошо видно, что для всех зависимостей $I_{DS}(q)$ выполняется соотношение $I_{DS}(q) \sim q^{-\alpha}$. Коэффициенты α , соответствующие наклонам полученных прямых, приведены в таблице.

Здесь следует отметить, что для всех исследованных узлов обратной решетки эти параметры практически остаются неизменными во всем исследованном температурном интервале. Другими словами, в направлении [001] диффузное рассеяние не изменяется при охлаждении.

По аналогичной процедуре были получены температурные зависимости интенсивно-

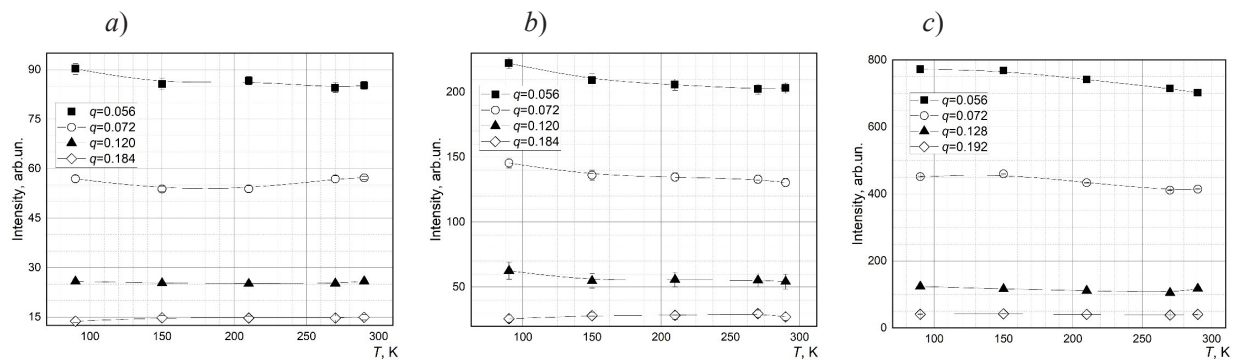


Рис. 1. Температурные зависимости интенсивностей диффузного рассеяния синхротронного излучения $I_{DS}(q, T)$ в SBN-60 при различных значениях q в направлении [001] вблизи узлов (332) (a), (412) (b), (002) (c).

Кривые на рисунках – результат процедуры сглаживания

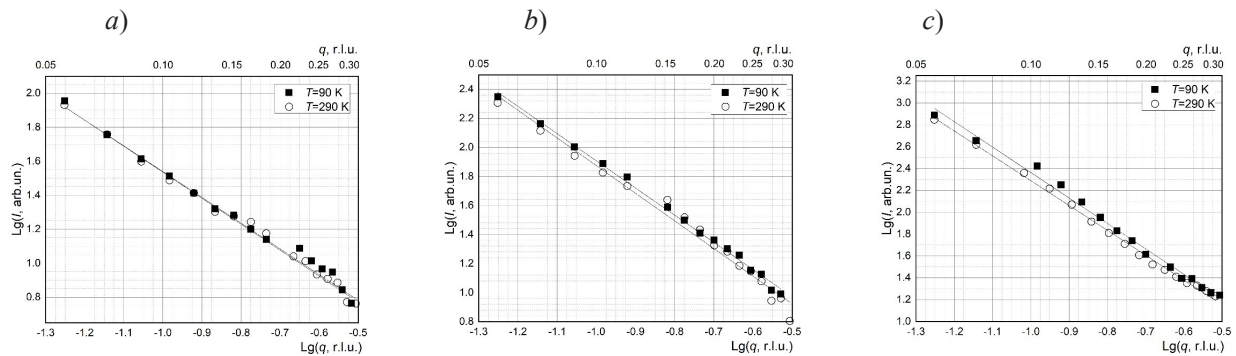


Рис. 2. Зависимости интенсивности DS от приведенного волнового вектора (в дважды логарифмическом масштабе) в SBN-60 при температурах 90 и 290 K в направлении [001] для узлов (332) (a), (412) (b), (002) (c).

Значения q указаны в r.l.u. (reduced lattice unit). Линии на рисунках – результат подгонки

стей DS рентгеновского излучения $I_{DS}(q, T)$ в SBN-60, полученные в направлениях [010] и $[1\bar{1}0]$ для значений приведенного волнового вектора в интервале $0,112 < |q| < 0,288$ в температурной области от 90 до 290 К (рис. 3). Из данных на рис. 3 видно, что для всех исследованных узлов при малых значениях q интенсивность диффузного рассеяния $I_{DS}(q, T)$ растет при охлаждении.

Далее, были построены зависимости интенсивностей диффузного рассеяния от приведенного волнового вектора q , в дважды логарифмическом масштабе для всего интервала температур 90 – 290 К (см. в таблице). На рис. 4 для сравнения приведены зависимости $I_{DS}(q)$ при температурах 290 и 90 К. Хорошо видно, что и в этих случаях хорошо выполняется линейный характер полученных зависимостей, т. е. вблизи этих узлов наблюдается степенная зависимость интенсивности DS: $I_{DS}(q) \sim q^{-\alpha}$. Отметим, что при охлаждении параметры α , характеризующие наклон кривых, существенно возрастают и достигают следующих значений: для узла (332) – 3,52 и 3,48 в направлениях [010] и $[1\bar{1}0]$ соответственно; для узла (412) – 3,32 и 3,18, а для узла (002) – 3,20 и 2,76 при $T = 90$ К (см. таблицу).

Таким образом, анализ полученных данных указывает на существование двух вкла-

дов в диффузное рассеяние:

DS-1, который вдоль направлений [010] и $[1\bar{1}0]$ возрастает при понижении температуры, причем при этом растет и параметр α ;

DS-2, который практически не зависит от температуры вдоль направления [001], равно, как и параметр α , во всем исследованном интервале 90 – 290 К, однако в окрестности разных узлов обратной решетки значения параметра α различаются.

Следует подчеркнуть, что полученные температурные зависимости интенсивностей DS-1 и DS-2 позволяют утверждать, что ни один из типов рассеяния не является термодиффузным (TDS – Thermal Diffuse Scattering), интенсивность которого должна увеличиваться при повышении температуры [17].

Как уже упоминалось ранее, в работе [10] было показано, что при охлаждении из параэлектрической фазы, помимо обычного для критического рассеяния вклада, описываемого лоренцианом G_1 , появляется дополнительный вклад от квадрированного лоренциана G_2 , причем этот вклад увеличивается при переходе в релаксорную фазу. Это приводит к тому, что суммарное диффузное рассеяние описывается суперпозицией функций G_1 и G_2 , а при достаточно больших значениях q ($q > \kappa$) коэффициент α в законе рассеяния $q^{-\alpha}$, наблюдаемом в

Таблица
Значения параметра α для прямых $\lg(I_{DS}) = -\alpha \lg(q) + b$, полученные при разных температурах для разных направлений и узлов решетки в кристалле SBN-60 (см. рис. 2)

Узел обратной решетки	Направление в кристалле	Значение параметра α				
		90 К	150 К	210 К	270 К	290 К
(332)	[001]	1,53(11)	1,49(2)	1,52(5)	1,51(4)	1,51(3)
	[010]	3,52(10)	3,47(9)	3,45(7)	3,18(4)	2,89(10)
	$[1\bar{1}0]$	3,48(6)	3,49(4)	3,50(5)	3,36(5)	2,87(5)
(412)	[001]	1,87(3)	1,81(4)	1,86(6)	1,81(5)	1,85(6)
	[010]	3,32(5)	3,23(6)	3,22(6)	3,04(4)	2,80(5)
	$[1\bar{1}0]$	3,18(5)	3,25(5)	3,27(5)	3,24(6)	2,83(5)
(002)	[001]	2,33(5)	2,33(4)	2,31(4)	2,27(4)	2,27(3)
	[010]	3,20(5)	3,15(5)	3,11(5)	2,87(5)	2,57(3)
	$[1\bar{1}0]$	2,76(1)	2,68(2)	2,57(2)	2,24(4)	1,92(4)

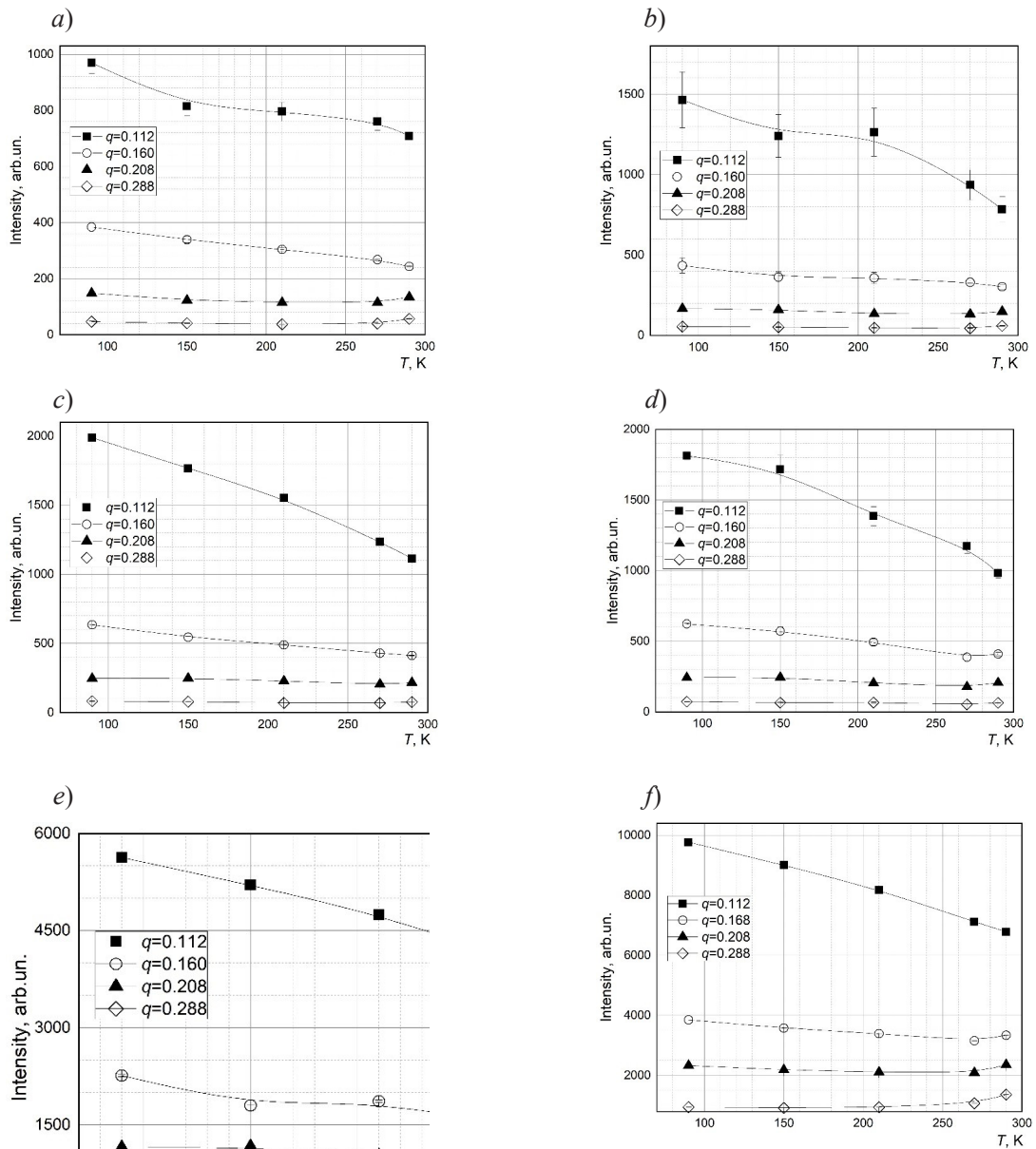


Рис. 3. Температурные зависимости интенсивностей DS $I_{DS}(q, T)$ в монокристалле SBN-60 при различных значениях q вблизи узла (332) в направлениях $[010]$ (a), $[1\bar{1}0]$ (b), вблизи узла (412) в направлении $[010]$ (c), $[1\bar{1}0]$ (d) и вблизи узла (002) в направлениях $[010]$ (e), $[1\bar{1}0]$ (f).

Кривые на рисунках – результат процедуры сглаживания

эксперименте, становится больше двух. Этот же эффект мы наблюдаем и в данном случае для DS-1 при понижении температуры, причем рост величины α при охлаждении свидетельствует об увеличении вклада G_2 в DS-1. В некоем смысле подобное поведение параметра α наблюдалось в работе [18] для монокристалла KTaO_3 , допированного литием (1,6 % Li), ниже T_C (температура фазового перехода составляла около 35 К).

В прямом пространстве функции G_1 соответствует (в изотропном трехмерном случае) корреляционная функция вида

$$C_1 = \exp(-kr)/r,$$

характеризуемая наличием «обрезающего» множителя $1/r$, т. е. такой коррелятор характерен для областей локального упорядочения (корреляции) с достаточно резкими границами.

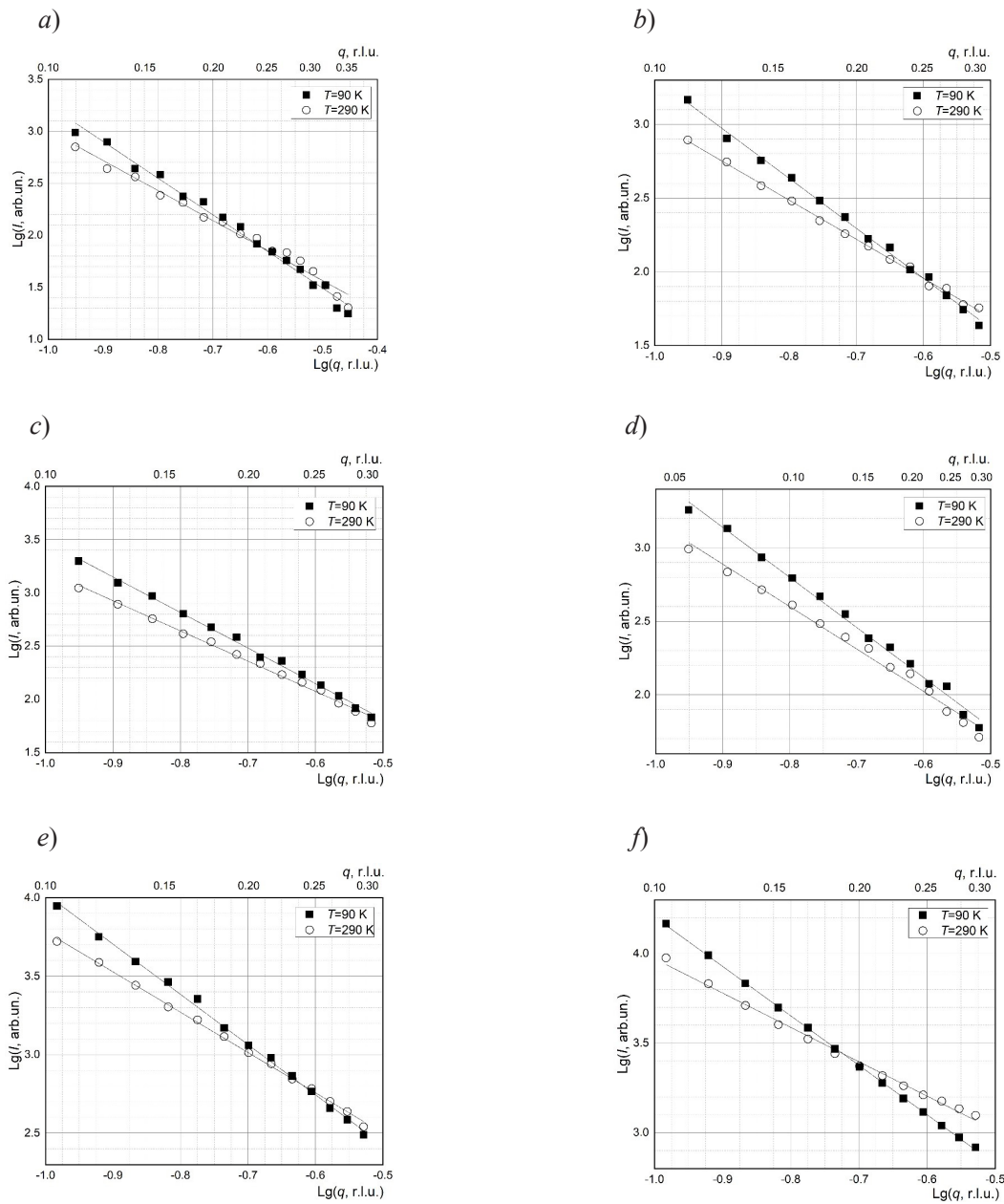


Рис. 4. Зависимости интенсивности DS от приведенного волнового вектора (в дважды логарифмическом масштабе) в SBN-60 при 90 и 290 К вблизи узла (332) в направлениях [010] (a) и [110] (b), узла (412) в направлениях [010] (c) и [110] (d), узла (002) в направлениях [010] (e) и [110] (f). Значения q указаны в г.л.у. Линии на рисунках – результат подгонки

Функции G_2 в прямом пространстве соответствует коррелятор вида

$$C_2 = \exp(-kr),$$

в котором нет «обрезающего» множителя, т. е. такая корреляционная функция присуща областям с размытыми границами.

Таким образом, из наблюдаемого роста интенсивности DS-1 и параметра наклона α при охлаждении можно сделать вывод о том, что при понижении температуры (во всяком случае вплоть до 90 К) продолжается процесс локальной перестройки структуры в SBN-60, при этом происходит рост вклада областей с размытыми границами, как раз и приводя-



щий к увеличению α . В свою очередь рост интенсивности DS-1 при охлаждении свидетельствует об увеличении «плотности» (общего числа) подобных областей.

Для объяснения отсутствия температурных зависимостей как интенсивности DS-2, так и параметров наклона α в этом случае, можно воспользоваться подходами, используемыми при интерпретации данных по малоугловому рассеянию нейтронов и рентгеновского излучения. Известно, что в случае массового фрактала с размерностью D для параметра α в законе рассеяния $I(q) \sim q^{-\alpha}$ справедливо соотношение $D = \alpha$, где $1 < \alpha < 3$ [19 – 21]. Так например, для одномерной цепочки массовых сфер $\alpha = 1$, а для агрегатов, построенных из сфер без перекрытия, $1 \leq D \leq 3$, где D – нецелое число. Параметр D соответствует распределению массы в пространстве. При таком подходе полученные экспериментальные значения параметра α получают вполне логичное объяснение, если, например, в качестве объектов рассеяния рассматривать соответствующие агломераты из цепочек атомов в SBN-60.

Заключение

В работе исследованы температурные зависимости интенсивности диффузного рассеяния синхротронного излучения $I_{DS}(T, q)$ (q – приведенный волновой вектор) в монокристалле ниобата стронция-бария $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$, вблизи узлов кристаллической решетки (332), (412) и (002), в трех принципиальных направлениях: [001], [010], [1 $\bar{1}$ 0].

Показано, что в дважды логарифмиче-

ском масштабе зависимости $I_{DS}(T, q)$ хорошо описываются степенным законом $q^{-\alpha}$; при этом получены температурные зависимости параметров α .

Установлено, что диффузное рассеяние вблизи указанных узлов существенно анизотропно и состоит из двух компонент (DS-1 и DS-2) с принципиально различным поведением температурных зависимостей интенсивности и параметров α .

Интенсивность компоненты DS-1 и соответствующий параметр α увеличиваются с понижением температуры, что свидетельствует о продолжающейся при охлаждении эволюции локальной структуры в SBN-60, связанной с размытием границ областей локального упорядочения.

Что касается поведения компоненты DS-2, наблюдаемого в направлении [001], то ни интенсивность, ни параметр α во всем исследованном интервале (90 – 290 К) не зависят от температуры, однако значение α зависит от того, в окрестности какого узла обратной решетки проводились измерения. Вполне вероятно, что природа DS-2 связана с рассеянием на массовых фрактальных структурах.

В СПбПУ работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы 0784-2020-0025). За частичную финансовую поддержку исследований по данной тематике Д.Ю. Чернышев благодарит РФФИ (грант 19-29-12023).

Авторы подтверждают, что конфликт интересов отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Viehland D., Xu Z., Huang W.-H. Structure – property relationships in strontium barium niobate. I. Needle-like nanopolar domains and the metastably-locked incommensurate structure // *Philos. Mag. A*. 1995. Vol. 71. No. 2. Pp. 205–217.
2. Черная Т.С., Максимов Б.А., Верин И.А., Ивлева Л.И., Симонов В.И. Уточнение кристаллической структуры монокристаллов $\text{Ba}_{0.39}\text{Sr}_{0.61}\text{Nb}_2\text{O}_6$ // *Кристаллография*. 1997. Т. 42. № 3. С. 421–426.
3. Glass A.M. Investigation of the electrical properties of $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ with special reference to pyroelectric detection // *J. Appl. Phys.* 1969. Vol. 40. No. 12. Pp. 4699–4713.
4. Ewbank M.D., Neurgaonkar R.R., Cory W.K., Feinberg J. Photorefractive properties of

strontium-barium niobate // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62. No. 2. Pp. 374–380.

5. **Romero J.J., Aragó C., Gonzalo J.A., Jaque D., Solé J. García.** Spectral and thermal properties of quasiphase-matching second-harmonic-generation in Nd^{3+} : $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}(\text{NbO}_3)_2$ multiresonant-frequency-converter nonlinear crystals // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. No. 5. Pp. 3111–3113.

6. **Simagina L.V., Mishina E.D., Semin S.V., Piyin N.A., Volk T.R., Gainutdinov R.V., Ivleva L.I.** Second harmonic generation in microdomain gratings fabricated in strontium-barium niobate crystals with an atomic force microscope // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. No. 5. Pp. 052015–052020.

7. **Кузьминов Ю.С.** Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука, 1982. 400 с.

8. **Woike T., Petricek V., Dusek M., Hansen N.K., Fertey P., Lecomte C., Arakcheeva A., Chapuis G., Imlaue M., Pankrathe R.** The modulated structure of $\text{Ba}_{0.39}\text{Sr}_{0.61}\text{Nb}_2\text{O}_6$. I. Harmonic solution // Acta Crystallographica. Sec. B. 2003. Vol. 59. Part 1. February. 2003. Pp. 28–35.

9. **Schneck J., Toledano J.C., Whatmore F., Ainger F.W.** Incommensurate phases in ferroelectric tetragonal tungsten bronzes // Ferroelectrics. 1981. Vol. 36. No. 1. Pp. 327–330.

10. **Борисов С.А., Окунева Н.М., Вахрушев С.Б., Набережнов А.А., Волк Т.Р., Филимонов А.В.** Критическое рассеяние нейтронов в одноосном релаксоре $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 2. С. 295–301.

11. **Chillal S., Koulialias D., Gvasaliya S.N., Cowley R.A., Ivleva L.I., Lushnikov S.G., Zheludev A.** Phase transition of chemically doped uniaxial relaxor ferroelectric // J. Phys.: Condens. Matter. 2015. Vol. 27. No. 43. P. 435901 (8 p).

12. **Ondrejko P., Kempa M., Kulda J., Frick B., Appel M., Combet J., Dec J., Lukasiewicz T., Hlinka J.** Dynamics of nanoscale polarization fluctuations in a uniaxial relaxor // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 113. No. 16. P. 167601.

13. **Ondrejko P., Kempa M., Savinov M., Bednyakov P., Kulda J., Bourges P., Dec J., Hlinka J.** Electric-field influence on the neutron diffuse scattering near the ferroelectric transition of $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$ // Phase Transit. 2016. Vol. 89. No. 7–8. Pp. 808–816.

14. **Vanina P.Yu, Vakhrushev S.B., Naberezhnov A.A., Bosak A.A.** Multiscale local ordering in the prototypical uniaxial relaxor $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ single crystal at room temperature // J. Phys.: Condens. Matter. 2019. Vol. 31. No. 17. P. 175401.

15. **Brönnimann C., Eikenberry E.F., Heinrich B., et al.,** The PILATUS 1M detector // J. Synchrotron. Radiat. 2006. Vol. 13. Part 2. March. Pp. 120–130.

16. Agilent, CrysAlis PRO. Agilent Technologies. Yarnton, Oxfordshire, England. 2011.

17. **Willis B.T.M., Pryor A.W.** Thermal vibrations in crystallography. Cambridge: Cambridge University Press, 1975. 296 p.

18. **Andrews S.R.** X-ray scattering study of the random electric dipole system KTaO_3 : Li // J. Phys. C: Solid State Phys. 1985. Vol. 18. No. 7. Pp. 1357–1376.

19. **Жульен Р.** Фрактальные агрегаты // Успехи физических наук. 1989. Т. 157. № 2. С. 339–357.

20. **Авдеев М.В., Аксенов В.Л.** Малоугловое рассеяние нейтронов в структурных исследованиях магнитных жидкостей // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 10. С. 339–357.

21. **Cousin F.** Small angle neutron scattering // EPL Web of Conferences. 2015. Vol. 104. P. 01004 (1–49).

Статья поступила в редакцию 05.09.2020, принята к публикации 10.09.2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАНИНА Полина Юрьевна — кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
p.yu.vanina@gmail.com

СИЛИН Никита Сергеевич — студент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
silin.ns@edu.spbstu.ru

БОСАК Алексей Алексеевич — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Европейского центра синхротронного излучения (ESRF), г. Гренобль, Франция.

71, Avenue des Martyrs, Grenoble, 38000, France
alexei.bossak@esrf.fr

ЧЕРНЫШОВ Дмитрий Юрьевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Физика нанокompозитных материалов электронной техники» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
chernyshov65@gmail.com

НАБЕРЕЖНОВ Александр Алексеевич — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
alex.nabereznov@mail.ioffe.ru

REFERENCES

1. Viehland D., Xu Z., Huang W.-H., Structure-property relationships in strontium barium niobate. I. Needle-like nanopolar domains and the metastably-locked incommensurate structure, *Philos. Mag. A.* 71 (2) (1995) 205–217.
2. Chernaya T.S., Maksimov B.A., Verin I.A., et al., Crystal structure of $\text{Ba}_{0.39}\text{Sr}_{0.61}\text{Nb}_2\text{O}_6$ single crystals, *Crystallography Reports.* 42 (3) (1997) 375–380.
3. Glass A.M., Investigation of the electrical properties of $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ with special reference to pyroelectric detection, *J. Appl. Phys.* 40 (12) (1969) 4699–4713.
4. Ewbank M.D., Neurgaonkar R.R., Cory W.K., Feinberg J., Photorefractive properties of strontium-barium niobate, *J. Appl. Phys.* 62 (2) (1987) 374–380.
5. Romero, J.J., Aragón C., Gonzalo J.A., et al., Spectral and thermal properties of quasi-phase-matching second-harmonic-generation in Nd^{3+} : $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}(\text{NbO}_3)_2$ multiseif-frequency-converter nonlinear crystals, *J. Appl. Phys.* 93 (5) (2003) 3111–3113.
6. Simagina L.V., Mishina E.D., Semin S.V., et al., Second harmonic generation in microdomain gratings fabricated in strontium-barium niobate crystals with an atomic force microscope, *J. Appl. Phys.* 110 (5) (2011) 052015–052020.
7. Kuz'minov Yu.S., Segnetoelektricheskie kristally dlya upravleniya lazernym izlucheniem [Ferroelectric crystals to control laser emission], Nauka, Moscow, 1982 (in Russian).
8. Woike T., Petricek V., Dusek M., et al., The modulated structure of $\text{Ba}_{0.39}\text{Sr}_{0.61}\text{Nb}_2\text{O}_6$. I. Harmonic solution, *Acta Crystallographica, Section B.* 59 (Part 1, February) (2003) 28–35.
9. Schneck J., Toledano J.C., Whatmore F., Ainger F.W., Incommensurate phases in ferroelectric tetragonal tungsten bronzes, *Ferroelectrics.* 36 (1) (1981) 327–330.
10. Borisov S.A., Okuneva N.M., Vakhrushev S.B., et al., Critical neutron scattering in a uniaxial relaxor $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$, *Physics of the Solid State.* 55 (2) (2013) 334–341.
11. Chillal S., Koulialias D., Gvasaliya S.N., et al., Phase transition of chemically doped uniax-

ial relaxor ferroelectric, *J. Phys.: Condens. Matter.* 27 (43) (2015) 435901 (8p.).

12. **Ondrejko P., Kempa M., Kulda J., et al.**, Dynamics of nanoscale polarization fluctuations in a uniaxial relaxor, *Phys. Rev. Lett.* 113 (16) (2014) 167601.

13. **Ondrejko P., Kempa M., Savinov M., et al.**, Electric-field influence on the neutron diffuse scattering near the ferroelectric transition of $\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$, *Phase Transit.* 89 (7–8) (2016) 808–816.

14. **Vanina P.Yu., Vakhrushev S.B., Naberezhnov A.A., Bosak A.A.**, Multiscale local ordering in the prototypical uniaxial relaxor $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ single crystal at room temperature, *J. Phys.: Condens. Matter.* 31 (17) (2019) 175401.

15. **Brönnimann C., Eikenberry E.F., Henrich B., et al.**, The PILATUS 1M detector, *J. Synchro-*

tron. Radiat. 13 (Part 2, March) (2006) 120–130.

16. Agilent, CrysAlis PRO, Agilent Technologies, Yarnton, Oxfordshire, England, 2011.

17. **Willis B.T.M., Pryor A.W.**, Thermal vibrations in crystallography, Cambridge University Press, Cambridge, 1975.

18. **Andrews S.R.**, X-ray scattering study of the random electric dipole system KTaO_3 : Li, *J. Phys. C. Solid State Phys.* 18 (7) (1985) 1357–1376.

19. **Jullien R.**, Fractal aggregates, *Comm. Cond. Mat. Phys. (Comm. Mod. Phys. Pt. B)*. 13 (4) (1987) 177–205.

20. **Avdeev M.V., Aksenov V.L.**, Small-angle neutron scattering in structure research of magnetic fluids, *Physics Uspekhi.* 53 (10) (2010) 971–993.

21. **Cousin F.**, Small angle neutron scattering, *EPJ Web of Conferences.* 104 (2015) 01004 (1–49).

Received 05.09.2020, accepted 10.09.2020.

THE AUTHORS

VANINA Polina Yu.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
p.yu.vanina@gmail.com

SILIN Nikita S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
silin.ns@edu.spbstu.ru

BOSAK Alexey A.

European Synchrotron Radiation Facility

71, Avenue des Martyrs, Grenoble, 38000, France
alexei.bossak@esrf.fr

CHERNYSHOV Dmitry Yu.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
chernyshov65@gmail.com

NABEREZHNOV Alexander A.

Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences

26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
alex.naberezhnov@mail.ioffe.ru