

ионов  $Mn^{3+}$  в результате статического эффекта Яна—Теллера [6, 7]. В манганите висмута упорядочение  $e_g$ -орбиталей, по-видимому, отсутствует. Этот вывод основывается на том, что кристаллическая структура  $BiMnO_3$  не является  $O'$ -орторомбической, как в остальных ортоманганитах. Согласно [6], кооперативное упорядочение  $e_g$ -орбиталей приводит

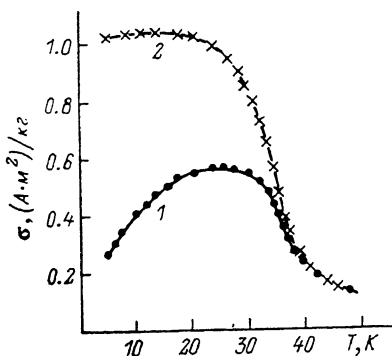


Рис. 3. Зависимости  $\sigma(T)$  в поле 16 кА/м образца  $Bi_{0.6}Pb_{0.4}MnO_{2.8}$  при отогреве (1) и охлаждении (2).

к  $O'$ -орторомбической структуре. Свойства кубического  $Bi_{0.6}Pb_{0.4}MnO_{2.8}$  также резко отличаются от свойств других ортоманганитов с почти кубической элементарной ячейкой, которые являются ферромагнетиками [6]. Вероятно, эти отличия обусловлены участием  $6p$ -орбиталей ионов висмута в химической связи. Мы предполагаем, что дефекты кристаллической структуры и ионы в нестехиометрическом  $Bi_{0.6}Pb_{0.4}MnO_{2.8}$  распределяются так, что макроскопические моноклинные искажения элементарной ячейки снимаются, но, по-видимому, появляются области с другим типом искажений кристаллической

структуры. В рамках этого предположения  $Bi_{0.6}Pb_{0.4}MnO_{2.8}$  состоит из микродоменов фаз со статическим и динамическим эффектом Яна—Теллера. Согласно [6], фаза со статическим эффектом Яна—Теллера является антиферромагнитной, а фаза с динамическим эффектом — ферромагнитной. Фрустрации обменных взаимодействий на границах микродоменов приводят к магнитным свойствам, присущим спиновым стеклам.

#### Список литературы

- [1] Sugawara F., Jida S., Syono Y., Akimoto S. // J. Phys. Soc. Jop. 1968. V. 25. N 6. P. 1553—1558.
- [2] Troyanchuk I. O., Ges A. P., Pastushonok S. N. e. a. // Cryst Res. Technol. 1989. V. 24. N 12. P. 1241—1244.
- [3] Bertaut E. F., Buisson G., Quezel-Ambrunas S. // Sol. St. Comm. 1967. V. 5. N 11. P. 25—30.
- [4] Troyanchuk I. O., Bashkirov L. A., Shemyakov A. A., Prokopenko V. K. // Phys. St. Sol. (a). 1989. V. 109. N 1. P. K59—K61.
- [5] Fisher K. H. // Phys. St. Sol. (b). 1985. V. 130. N 1. P. 13—73.
- [6] Гудинаф Д. Магнетизм и химическая связь. М., 1968. 328 с.
- [7] Pouthenet R., Veuret C. // J. Physique. 1970. V. 31. N 1. P. 65—72.

Институт физики твердого тела  
и полупроводников  
АН БССР  
Минск

Поступило в Редакцию  
30 января 1990 г.

## О РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ НА СВЕРХРЕШЕТКЕ С ХАОТИЧЕСКИ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ АМОРФНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

В. И. Пунегов

Адекватное определение структурного совершенства важнейших объектов микро- и оптоэлектроники по данным рентгеновской дифрактометрии требует учета всех факторов, влияющих на угловое распределение рассеянной интенсивности. В настоящее время решение теоретических задач

по динамической дифракции на сверхрешетке (СР), как правило, проводится в рамках когерентного рассеяния [1, 2]. Влияние диффузной компоненты на формирование кривых дифракционного отражения (КДО) таких материалов не исследовано. Некогерентное рассеяние эффективно учитывается статистической динамической теорией дифракции [3-6].

В данной работе на основе статистического подхода [6] рассмотрена дифракция на гармонической СР различной степени совершенства. Рассмотрение проведено для симметричной брэгговской дифракции на СР с кубической элементарной ячейкой.

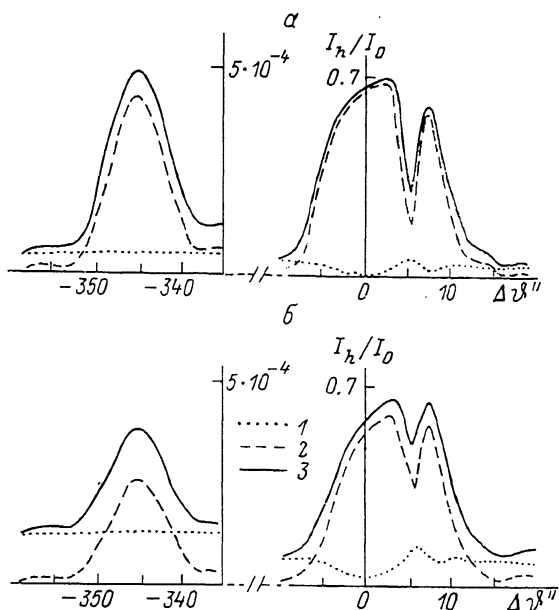


Рис. 1. КДО сверхрешетки.  $E=0.9$  (а) и  $0.7$  (б).

1 — диффузная, 2 — когерентная, 3 — суммарная интенсивность.  $L=0.06$  мкм,  $\Delta a/a_0=2 \cdot 10^{-4}$ ,  $R_0=0.1$  мкм.

Гармоническому закону модуляции межплоскостного расстояния в глубь кристалла  $a(z)=a_0+\Delta a \cos(\kappa z)$  отвечает корреляционная длина

$$\tau(\eta, z) = e^{iA \sin(\kappa z)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(A) e^{-im\kappa z} \times \int_0^{\infty} G(z, \xi) e^{i(\eta - m\kappa)\xi} d\xi, \quad (1)$$

где  $\kappa=2\pi/L$ ;  $\Delta a, L$  — амплитуда и период модуляции параметра решетки;  $\eta$  — угловая переменная, пропорциональная угловой отстройке  $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0$ , где  $\vartheta_0$  соответствует углу Брэгга для среднего значения параметра решетки  $a_0$  модулированного кристалла.

Корреляционная длина (1), являющаяся одним из основных параметров теории, представлена в виде ряда по функциям Бесселя  $J_m(A)$ , где  $A=\Delta a L n/a_0^2$ ,  $n$  — порядок отражения. Основной член разложения ( $m=0$ ) имеет максимальное значение в угловой области главного пика СР. Остальные слагаемые суммы (1) отвечают за диффузное рассеяние и диффузное поглощение когерентных волн в угловых интервалах расположения спутников: значения  $m=\mp 1$  соответствуют первым (левому и правому) спутникам, а  $m=\mp 2$  вторым спутникам и т. д. Корреляционная функция  $G(z, \xi)$  определяет статистическое распределение микродефектов в СР. Отметим, что в рассматриваемом случае хаотического распределения дефектов эта функция не зависит от координаты  $z$  в глубь кристалла.

Следуя [5], рассмотрим модель дефектов в виде сферических аморфных кластеров радиуса  $R_0$ . Поля упругих деформаций вне кластера отсутствуют. Дефекты хаотически распределены по всей толщине сверхрешетки. Степень совершенства  $CP$  зависит от концентрации аморфных включений  $C$  и радиуса  $R_0$ . В уравнениях дифракции это учитывается через величину статического фактора Дебая—Валлера  $E = \exp(-4\pi CR_0^3/3)$ . Для принятой модели дефектов интегралы в (1) вычисляются.

Численные расчеты КДО выполнены для  $CP$   $Al_xGa_{1-x}As$  толщиной 3 мкм на полубесконечной идеальной подложке GaAs. Используются параметры, соответствующие (004) отражению  $\sigma$ -поляризованного  $Cu K\alpha_1$ -излучения. Рассогласование параметров решетки  $CP$  и подложки  $(a_0 - a_s)/a_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ , их дифракционные пики частично перекрываются.

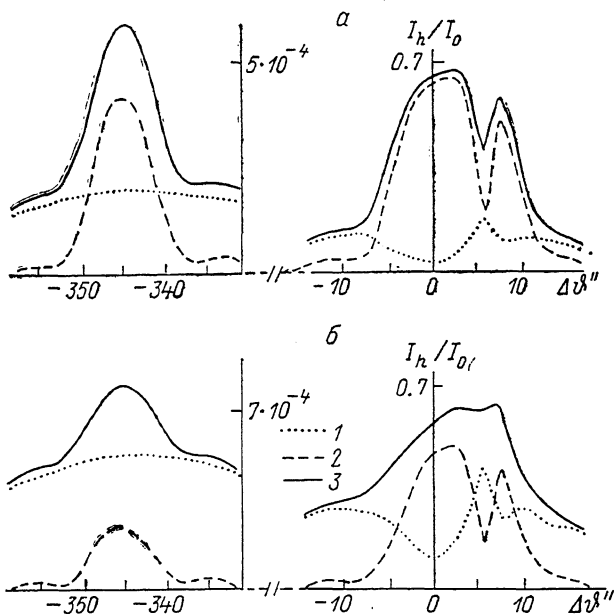


Рис. 2. КДО сверхрешетки.  $E=0.9$  (а) и  $0.7$  (б).

1 — диффузная, 2 — когерентная, 3 — суммарная интенсивность.  $R_0=0.4$  мкм.

Дефекты радиуса  $R_0=0.1$  мкм создают протяженный по углам диффузный фон (рис. 1). С увеличением концентрации дефектов, т. е. с ростом  $E$ , интенсивность диффузного рассеяния в угловой области первого сателлита (на рис. 1 слева) и главного пика возрастает. Соответственно падает когерентная интенсивность. Профиль диффузно рассеянного излучения под главным максимумом  $CP$  имеет экстинкционный провал, а в области расположения пика подложки осциллирует. Увеличение размеров статистически распределенных дефектов ведет к концентрации диффузно рассеянных волн вблизи сателлита и главного пика (рис. 2), при этом угловая протяженность диффузного фона уменьшается. Интенсивность диффузно рассеянных волн в области расположения сателлита может существенно превышать когерентную составляющую. С увеличением размера дефекта сильнее проявляются осцилляции диффузного профиля КДО, что в конечном итоге приводит к более заметному сглаживанию интерференционных осцилляций полной интенсивности.

Таким образом, диффузное рассеяние на статистически распределенных микродефектах существенно влияет на формирование профиля КДО сверхрешетки. Двухкристальная дифрактометрия не позволяет отделить когерентную и диффузную компоненту. Необходимы дополнительные исследования методом трехкристальной дифрактометрии [7].

В заключение отметим, что в отсутствие модуляции решетки ( $\Delta a=0$ ) результаты данной теории согласуются с работой [5].

Автор выражает благодарность В. А. Бушуеву, В. М. Каганеру и Ф. Н. Чуховскому за обсуждение общих вопросов статистической динамической теории дифракции.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ассур К. П., Энтин И. Р. // ФТТ. 1982. Т. 24. № 7. С. 2122—2129.
- [2] Засимчук В. И., Тихонова Е. А. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 5. С. 1306—1312.
- [3] Kato N. // Acta Cryst. A. 1980. V. 36. N 5. P. 763—769.
- [4] Петрашень П. В. // Металлофизика. 1986. Т. 8. № 1. С. 35—43.
- [5] Бушуев В. А. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 11. С. 70—78.
- [6] Пунегов В. И. // III совещ. по всесоюз. межвузовской программе «Рентген». Ереван, 1989. С. 22, 38.
- [7] Кютт Р. Н. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 8. С. 270—273.

Сыктывкарский  
государственный университет  
им. 50-летия СССР

Поступило в Редакцию  
5 февраля 1990 г.

УДК 537.622 : 539.12.04

© Физика твердого тела, том 32, № 8, 1990  
Solid State Physics, vol. 32, N 8, 1990

## ИЗМЕНЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ БИОТИТА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Б. Грановский, Л. В. Навалихин, В. Е. Роде,  
Ж. Саидмурадов, М. Х. Усманов, М. И. Эпов

В данной работе приводятся результаты исследования влияния радиационного воздействия нейтронов на намагниченность биотита  $K(MgFe)_3[AlSi_3O_{10}](OHF)_2$ . Ранее проведенные исследования воздействия на биотит интенсивного потока протонов [1] и высокотемпературного отжига [1–3] показали, что как при радиационном воздействии, так и при отжиге происходят увеличение процентного содержания ионов  $Fe^{3+}$  и соответствующее уменьшение ионов  $Fe^{2+}$ . Так как процессы соударения высокоэнергетических частиц с ионами кристаллической решетки могут приводить к образованию «тепловых пиков» [4], то указанные данные позволяют связать радиационное воздействие на биотит с термически активационным окислением ионов железа ( $Fe_3O_4 \rightarrow Fe_2O_3$ ) в «тепловых пиках» [1, 4]. Магнитный момент ионов  $Fe^{3+}$  превышает магнитный момент ионов  $Fe^{2+}$  [5], поэтому в результате облучения высокоэнергетическими частицами или отжига следовало бы ожидать увеличения намагниченности биотита. Однако нами получены данные, указывающие на принципиально отличное этих типов воздействий на намагниченность биотита.

Биотит<sup>1</sup> разделили на семь групп по десять образцов в каждой. Для всех образцов методом Вейсса—Форера на установке [6] при 4.2 К измерили полевую зависимость намагниченности. Затем первую группу образцов прогрели при 1000 °С в течение 15 мин в муфельной печи. Четыре группы подвергли облучению на нейтронном генераторе НГ-160 нейтронами энергией 14 МэВ с плотностью потока в месте облучения  $10^8$  нейтр./см<sup>2</sup>·с. Время облучения варьировалось от 1 до 30 ч, причем в процессе облучения нейтронами температура образцов практически не отличалась от комнатной.

<sup>1</sup> Тонкозернистый биотит, полученный из гранодиоритов Кайтезекского массива, был предоставлен для наших экспериментов сотрудниками Института геологии ТаджССР А. Г. Норматовым и Т. Д. Джураевым.