

УДК 538.97

## ДИАГНОСТИКА НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2014 г. В. И. Алексеев<sup>1</sup>, А. Н. Елисеев<sup>1</sup>, Э. Ф. Иррибарра<sup>2</sup>, Р. М. Нажмуудинов<sup>2</sup>,  
Н. Н. Насонов<sup>2</sup>, А. С. Кубанкин<sup>1,2</sup>, В. В. Полянский<sup>1</sup>, В. И. Сергиенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Лаборатория радиационной физики НИУ БелГУ, Белгород, Россия

Поступила в редакцию 17.07.2013 г.

Измерены спектры поляризационного тормозного излучения в геометрии обратного рассеяния при взаимодействии электронов с энергией 7 МэВ с поликристаллической пленкой никеля. Измерение выполнено в условиях, когда размер области когерентного рассеяния рентгеновского излучения в мишени порядка 10 нм. Полученные результаты позволяют рассчитывать на эффективность использования поляризационного тормозного излучения в качестве нового метода диагностики атомной структуры нанодисперсных поликристаллов.

DOI: 10.7868/S0207352814040076

### ВВЕДЕНИЕ

Поляризационное тормозное излучение (ПТИ) релятивистских электронов [1, 2] может использоваться для структурной диагностики поликристаллических сред на основе энергодисперсионной методики [3–8]. К потенциальным преимуществам обсуждаемого подхода относятся точное знание спектра псевдофотонов кулоновского поля быстрых электронов (псевдофотоны выступают в качестве первичного зондирующего излучения), что необходимо в рамках энергодисперсионной методики, а также возможность достижения высокого пространственного разрешения измерений за счет относительно простой магнитной фокусировки пучка электронов на мишень [4]. В [9] показана возможность существенного повышения энергетического разрешения измерений в схеме регистрации пиков ПТИ в направлении, противоположном скорости излучающих электронов, а в [7] данный эффект был впервые достоверно зафиксирован. В [8] показана возможность измерения сигнала ПТИ в геометрии обратного рассеяния при условии малости размера зерна поликристалла по отношению к длине фотопоглощения сигнала ПТИ, что подчеркнуло состоятельность развиваемого метода для исследования поликристаллов с субмикронным размером зерна.

Важным вопросом, определяющим возможность использования ПТИ в качестве нового метода исследования атомной структуры поликристаллических сред, является измерение сигнала ПТИ, генерируемого в поликристаллах с размером области когерентного рассеяния порядка 10 нм. Данная величина часто встречается в зада-

чах материаловедения, и исследование структурных характеристик подобных поликристаллов является одной из основных задач физического материаловедения.

В настоящей работе зафиксированы когерентные пики ПТИ в геометрии обратного рассеяния электронов с энергией 7 МэВ, взаимодействующих с поликристаллом никеля со средним размером области когерентного рассеяния около 50 нм. Данная мишень была специально изготовлена для проведения эксперимента и предварительно исследована методом рентгеноструктурного анализа. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения развиваемого метода для исследования поликристаллических наноструктурированных сред.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальное исследование ПТИ в геометрии обратного рассеяния было выполнено на установке [8], схематически представленной на рис. 1. В качестве источника электронного пучка использовался микротрон 1. Электронный пучок 2 с энергией 7 МэВ формировался углеродными коллиматорами 3 с апертурой 5 мм. Транспортировка пучка электронов к мишени 7, установленной в вакуумной камере 6, осуществлялась тремя поворотными магнитами 4, двумя парами магнитных квадрупольных линз 5 и корректором 6, что позволяло сфокусировать электронный пучок в месте расположения мишени до поперечного размера около 3 мм и расходимостью не более 5 мрад. Данные величины удовлетворяли условиям изме-

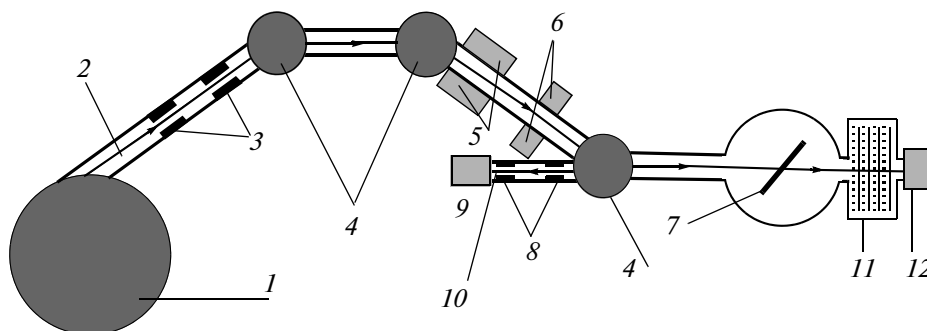


Рис. 1. Экспериментальная установка.

рения ПТИ в геометрии обратного рассеяния, ограниченными размерами поперечного сечения электронного пучка и его расходимостью [7–9]. Поперечный размер, положение в вакуумном канале и ток электронного пучка контролировались пропорциональной камерой 11 и цилиндром Фарадея 12. Сигнал ПТИ 10 формировался коллиматорами 8, размер которых подбирался таким образом, чтобы сигнал попадал в детектор 9 из области взаимодействия электронного пучка с мишенью и частично с поверхности держателя мишени, изготовленного из оргстекла. Коллиматоры 8 были изготовлены из оргстекла, размер апертуры 2 мм (ближний к детектору) и 4 мм. Данная особенность позволила исключить из измеряемого сигнала фон, образующийся при взаимодействии рассеянных электронов и рентгеновского излучения с деталями установки. Сигнал ПТИ регистрировался энергодисперсионным кремниевым дрейфовым детектором с энергетическим разрешением 130 эВ и площадью окна 7 мм<sup>2</sup>. Установка ближнего к мишени поворотного магнита 4 позволила создать геометрию эксперимента с минимальным фоном в месте расположения детектора, создаваемым микрофоном и коллиматорами электронного пучка.

В качестве мишени использовалась фольга никеля толщиной 40 мкм. Предварительные исследования, выполненные методом рентгеноструктурного анализа, показали, что мишень обладает текстурой и средний размер области когерентного рассеяния составляет около 50 нм.

Толщина мишени выбиралась из условия поглощения фонового излучения в области измерений, возникающего в результате взаимодействия пучка электронов с пропорциональной камерой и влияющего на форму регистрируемого спектра. Детектор был защищен от внешнего радиационного фона установки свинцовой защитой.

## ИЗМЕРЕНИЯ

Установка была разработана для измерений в условиях наименьшего проявления фона, создаваемого электронами и рентгеновским излучением, в спектре измеряемого сигнала ПТИ в виде пиков. Для поликристаллического никеля расчетное положение спектральных пиков ПТИ в геометрии обратного рассеяния соответствует следующим значениям: 3.05 (111), 3.52 (200), 4.97 (220), 5.83 (311), 6.09 (222) и 7.03 кэВ (400). Наряду с регистрируемыми пиками ПТИ в сигнале присутствовал вклад характеристического излучения никеля ( $K_{\alpha}$  – 7.48 кэВ,  $K_{\beta}$  – 8.26 кэВ). Наличие пиков характеристического излучения препятствует измерению спектров ПТИ вблизи данных значений энергии в пределах энергетического разрешения детектора. Ранее полученные результаты [5–8] показали существенный вклад пика вылета в измеряемый спектр сигнала ПТИ. Пик вылета является фантомным пиком, присутствующим в измеряемом спектре и образующимся вследствие неупругого рассеяния регистрируемых фотонов на кремниевом кристалле детектора. Расчетное положение пиков вылета, возникающих при неупругом рассеянии характеристических линий  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  никеля, соответствует энергии 5.74 и 6.52 кэВ. Таким образом, беспрепятственно зафиксировать было возможно только пики ПТИ, соответствующие плоскостям (111), (200) и (220), область проявления остальных пиков будет перекрываться с пиками характеристического излучения и пиками вылета.

Рентгеноструктурное исследование мишени показало наличие преимущественной ориентации [110] плоскости поверхности мишени, поэтому первое измерение спектра ПТИ было выполнено при условии нормальной ориентации поверхности мишени относительно пучка электронов. В результате был достоверно зафиксирован пик ПТИ, соответствующий плоскости (220) при энергии 4.97 кэВ (рис. 2). Спектр обрезан в более жесткой области в начале проявления пика характеристического излучения линии  $K_{\alpha}$  никеля, амплитуда которого

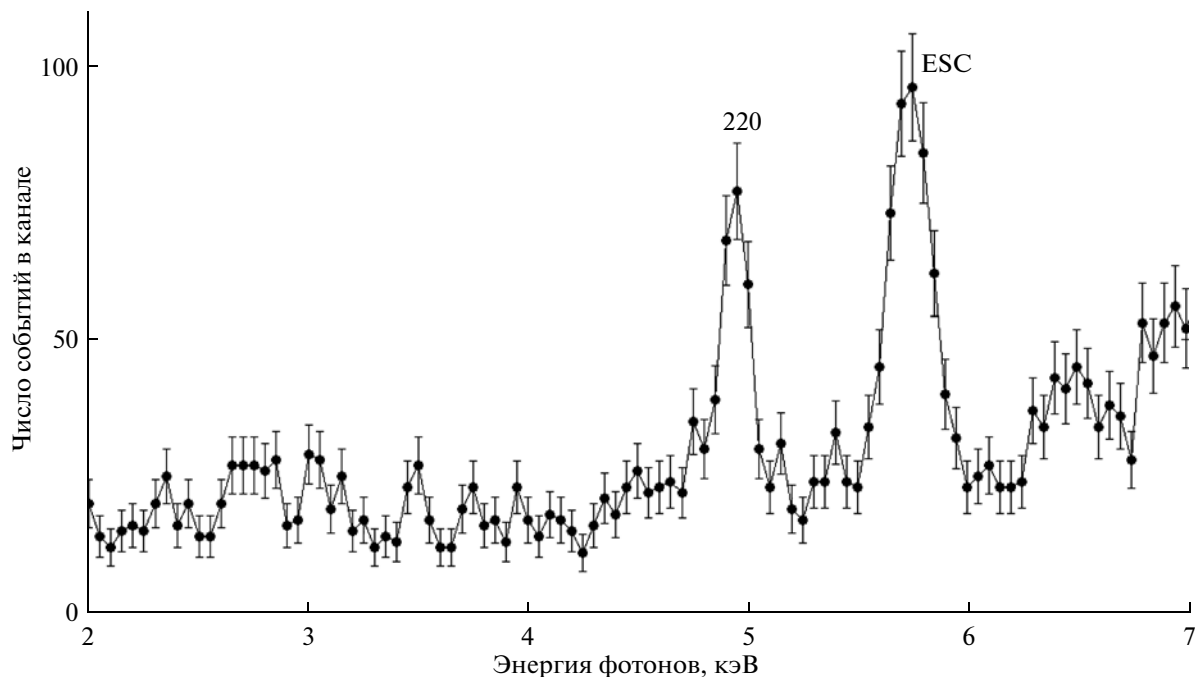


Рис. 2. Спектр ПТИ “назад” для поликристалла никеля, ось коллимации сигнала перпендикулярна плоскости поверхности мишени.

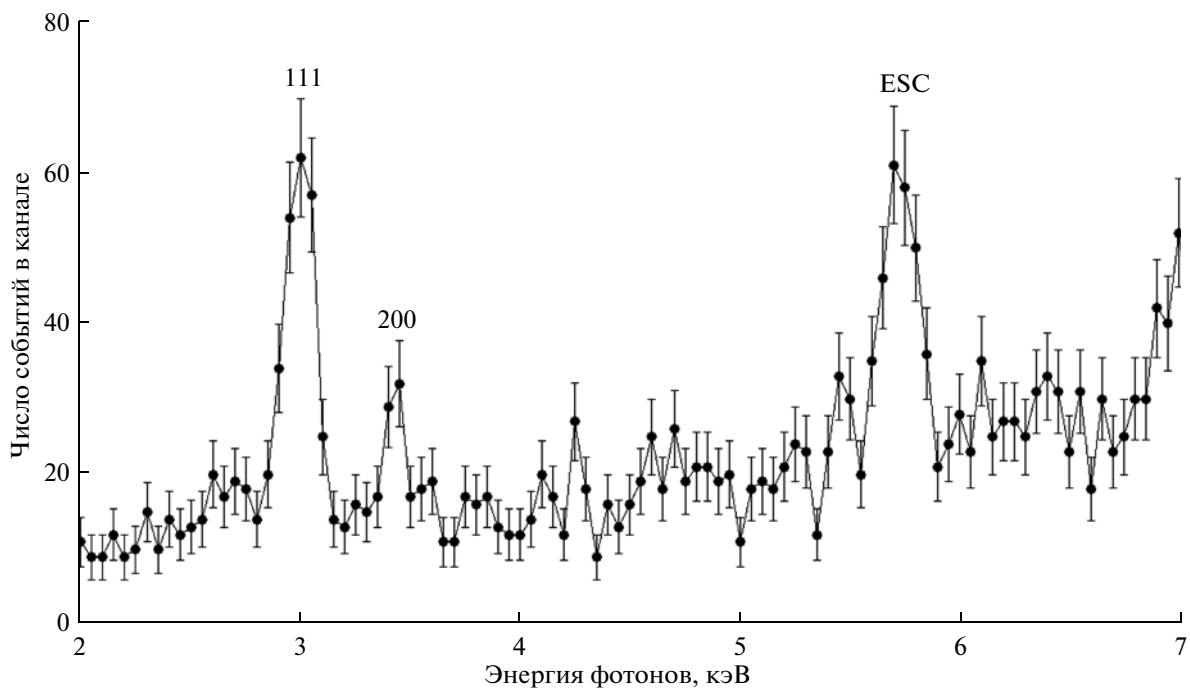


Рис. 3. Спектр ПТИ “назад” для поликристалла никеля, угол ориентации  $18^\circ$ .

превосходит амплитуду сигнала ПТИ более чем на два порядка. Отсутствие остальных пиков объясняется наличием текстуры, что подтвердилось фиксированием пиков ПТИ, соответствующих плоскостям (111) и (200) при изменении ориентацион-

ного угла. На рис. 3 представлен спектр ПТИ, измеренный при угле между нормалью к плоскости поверхности мишени и осью коллимации сигнала  $18^\circ$  (угол измерялся в горизонтальной плоскости).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Измерение в геометрии обратного рассеяния спектра ПТИ, генерируемого в поликристаллической фольге Ni со средним размером области когерентного рассеяния 50 нм, показало наличие когерентных пиков, положение которых хорошо согласуется с расчетными данными. Достоверно зафиксированы пики, соответствующие кристаллографическим плоскостям (111), (200) и (220) при различной ориентации мишени относительно пучка электронов. Пики, соответствующие остальным плоскостям, сложно идентифицировать из-за наличия текстуры. Полученный результат демонстрирует перспективность развиваемого нового метода исследования атомной структуры наноструктурированных поликристаллических сред, основанного на измерении спектра ПТИ в геометрии обратного рассеяния.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-31389мол\_а).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Амуся М.Я., Буймистров В.М., Зон Б.А. и др. Поляризованное тормозное излучение частиц и атомов. М.: Наука, 1987. 338 с.
2. Король А.В., Лялин А.Г., Соловьев А.В. Поляризованное тормозное излучение. С-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2004. 300 с.
3. Nasonov N.N. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1998. V. 145. P. 19.
4. Жукова П.Н., Кубанкин А.С., Насонов Н.Н., Сергиенко В.И. // Завод. лабор. 2008. № 10. С. 32.
5. Астапенко В.А., Кубанкин А.С., Насонов Н.Н., Полянский В.В., Похил Г.П., Сергиенко В.И., Хабло В.А. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. Вып. 6. С. 341.
6. Гостищев Н.А., Кубанкин А.С., Насонов Н.Н., Полянский В.В., Сергиенко В.И., Хабло В.А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 17. С. 98.
7. Алексеев В.И., Вохмянина К.А., Елисеев А.Н., Жукова П.Н., Кубанкин А.С., Нажмудинов Р.М., Насонов Н.Н., Полянский В.В., Сергиенко В.И. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 6. С. 83.
8. Алексеев В.И., Иррибарра Э.Ф., Кубанкин А.С., Нажмудинов Р.М., Насонов Н.Н., Полянский В.В., Сергиенко В.И. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 3. С. 88.
9. Astapenko V.A., Nasonov N.N., Zhukova P.N. // J. Phys. B: Atomic, Molecular & Opt. Phys. 2007. V. 40. P. 10.

**Diagnostics of Nanodispersed Polycrystals Based on Polarized Bremsstrahlung of Relativistic Electrons**

**V. I. Alekseev, A. N. Eliseev, E. F. Irribara, R. M. Nazhmudinov, N. N. Nasonov, A. S. Kubankin, V. V. Polyansky, V. I. Sergienko**

The spectra of polarization bremsstrahlung are measured in backscattering geometry for 7 MeV electrons interacting with a polycrystalline Ni foil. The size of coherent scattering region in the foil is of the order 10 nm. The results show the possibility of using a new method in the diagnostics of the atomic structure of polycrystalline materials with nanosized grains.