

РАЗЛИЧИЕ СПЕКТРОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МИШЕНЕЙ И ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ФОЛЬГ

*И. А. Кишин^{а,б,1}, Е. Ю. Киданова^а, А. С. Кубанкин^{а,б},
Р. М. Нажмудинов^{а,б,в}, В. И. Алексеев^б, А. Н. Елисеев^б*

^а Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

^б Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

^в Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

Представлены экспериментальные исследования параметрического рентгеновского излучения, образующегося при взаимодействии релятивистских электронов с порошковыми мишенями и текстурированными фольгами. Показано различие в полученных рентгеновских спектрах. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных со значениями, рассчитанными по кинематической теории параметрического рентгеновского излучения.

Experimental studies of parametric X-ray radiation produced by the interaction of relativistic electrons with powder targets and textured polycrystals are presented. The difference in the obtained X-ray spectra is shown. The experimental data obtained are compared with values calculated according to the parametric X-ray radiation (PXR) kinematic theory.

PACS: 07.85.Nc

ВВЕДЕНИЕ

Параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) образуется за счет рассеяния кулоновского поля заряженных частиц на электронных оболочках атомов мишени [1]. Излучение слабо зависит от энергии падающих частиц, но сильно зависит от структуры мишени. В связи с этим был предложен новый метод диагностики структуры вещества на основе ПРИ [2]. Метод экспериментально апробирован с поликристаллическими фольгами алюминия, меди, никеля и другими мишенями [3]. Во всех экспериментальных работах в мишенях наблюдалось сильное влияние текстуры на выход ПРИ, образующейся, например, за счет прокатки [4]. Для решения этой проблемы были созданы порошковые мишени, в которых отсутствует преимущественная

¹E-mail: ivan.kishin@mail.ru

ориентация кристаллитов. Исследования с новым типом мишеней показали хорошее соответствие кинематической теории ПРИ для порошков с микронными [5] и наноразмерными зернами [6].

Настоящая работа является продолжением исследований ПРИ, образующегося в порошковых мишенях. Проведено сопоставление спектров ПРИ, образующегося в порошковых и текстурированных мишенях никеля, показано сравнение полученных спектров с кинематической теорией ПРИ, по измеренным спектрам были проведены расчеты полуширины пиков излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерения выполнены на базе ОФВЭ ФИАН на экспериментальной установке «Рентген-1» [7]. Схема проведения исследований представлена на рис. 1. В качестве источника релятивистских электронов использовался микротрон с энергией 7 МэВ, с частотой следования импульсов 50 Гц, с длительностью импульса 4 мкс, со средним током в месте расположения мишени 10 нА.

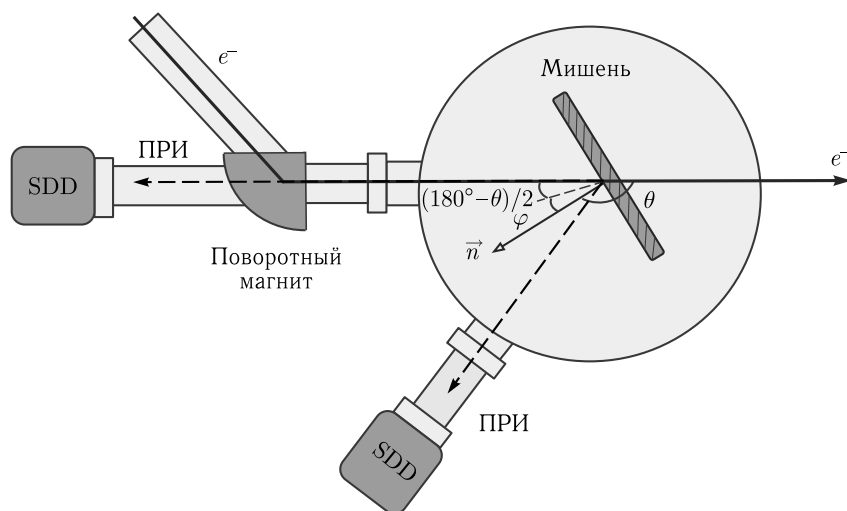


Рис. 1. Схема эксперимента: θ — угол наблюдения; φ — ориентационный угол

Для наблюдения излучения использовались два фотонных канала под углами θ 150 и 180° относительно вектора скорости движения электронов. Измерения проводились полупроводниковыми рентгеновскими детекторами SDD Amptek с временем формирования 1 мкс. Калибровка и энергетическое разрешение детекторов были определены с помощью экспериментальных спектров характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) калибровочных мишеней: никеля, платины, титана и кремния [6].

Мишень крепилась на двухосевой гониометр с возможностью вывода мишени с прямого пучка. Для порошковой мишени ориентационный угол φ был равен 0° и не изменялся во время набора спектра, для фольги угол φ изменялся на $\pm 20^\circ$.

Порошковая мишень была изготовлена согласно конструкции полезной модели [8], толщина мишени составляла 1 мм. В качестве наполнителя использовался порошок никеля со средним размером зерен 1,57 мкм. Размер был определен с помощью снимков на растровом микроскопе с определением 100 случайно выбранных зерен.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Согласно расчетам для никелевой мишени в области энергий от 3 до 7 кэВ при углах наблюдения 150 и 180° должны наблюдаться спектральные пики от кристаллографических плоскостей (111), (200), (220), (311), (222), (400). Полученные спектры ПРИ из порошковых мишеней представлены на рис. 2, слева. Удалось зарегистрировать пики ПРИ только от трех первых кристаллографических плоскостей. Рефлекс от плоскости (311) близок по энергии пику вылета никеля (пик ESC), 5,84 и 5,72 кэВ соответственно. Пик вылета образуется при неупругом рассеянии ХРИ никеля на атомах кремниевого детектора. Пики от более высоких порядков неразличимы из-за наложения на них ХРИ-линий никеля $K_{\alpha} = 7,478$ кэВ, $K_{\beta} = 8,265$ кэВ.

Дополнительно были измерены спектры ПРИ из фольги никеля при угле наблюдения 180°, образующиеся при тех же условиях, что и для порошковых мишеней.

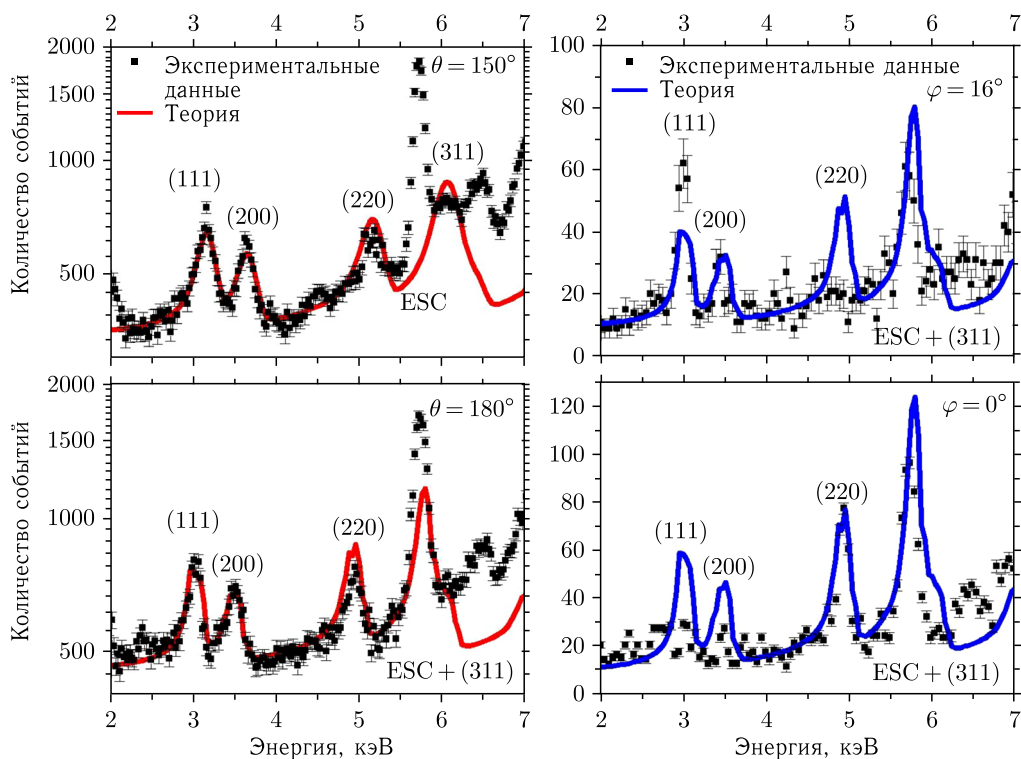


Рис. 2. Слева: спектр ПРИ из порошка никеля для углов наблюдения 150 и 180°, угол ориентации 0°; справа: спектр ПРИ из фольги никеля, угол наблюдения 180°, угол ориентации 16 и 0°

Как видно из рис. 2, справа, при изменении ориентации мишени набор пиков изменяется, что указывает на наличие текстуры. В случае же с порошковыми мишенями при изменении угла ориентации пики от плоскостей смещаются по энергии, но не пропадают. Для сравнения были взяты спектры ПРИ из фольги никеля при углах ориентации мишени φ 0 и 16° .

Полученные экспериментальные данные были сопоставлены с кинематической теорией ПРИ для поликристаллических структур [9]. В случае генерации ПРИ из порошковой мишени наблюдается хорошее соответствие теории и эксперимента по всем пикам ПРИ для двух углов наблюдения, в то время как теория и эксперимент для никелевой фольги совпадают только по положению пиков, а увидеть весь набор пиков при одной ориентации мишени невозможно.

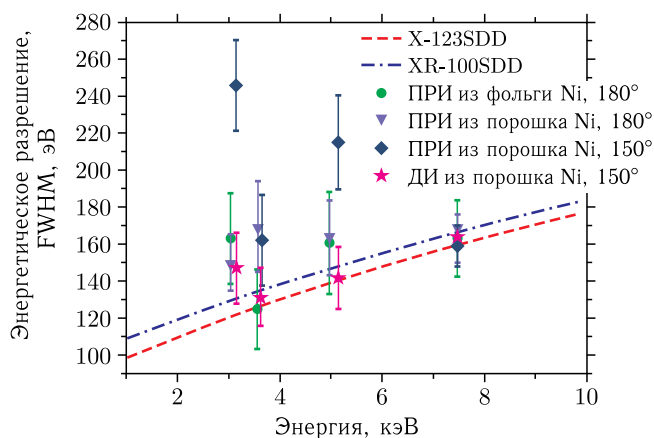


Рис. 3 (цветной в электронной версии). FWHM спектральных пиков. Синяя (штрихпунктирная) и красная (штриховая) линии соответствуют энергетическому разрешению детекторов; кружки — полуширина пиков ПРИ из фольги никеля, угол наблюдения 180° ; треугольники — полуширина пиков ПРИ из порошка никеля, угол наблюдения 180° ; ромбы — полуширина пиков ПРИ из порошка никеля, угол наблюдения 150° ; звездочки — дифракция рентгеновского излучения из порошка никеля, угол наблюдения 150°

Далее была проведена аппроксимация полученных пиков ПРИ функцией Гаусса, также были аппроксимированы пики, полученные при дифракции рентгеновского излучения на порошковой мишени. Полученные результаты приведены на рис. 3. Видно, что для угла наблюдения 180° видно хорошее соответствие ширины на полувысоте для обеих мишеней. Для угла наблюдения 150° заметно уширение рефлексов, значительно большее, чем энергетическое разрешение детектора, что соответствует ранее предсказанной теории [9]. Для случая дифракции рентгеновского излучения наблюдается наименьшая ширина на полувысоте, которая хорошо согласуется с экспериментально измеренным энергетическим разрешением детектора, что можно объяснить отсутствием влияния многократного рассеяния электронов в мишени, которое значительно влияет на ширину пиков.

ВЫВОДЫ

Представлено сравнение спектров ПРИ из порошка и фольги никеля. Показано, что спектры ПРИ из порошковых мишеней хорошо согласуются с теорией по форме, положению и относительной интенсивности, в то время как спектры ПРИ из фольг согласуются с теорией только по положению пиков. Установлено, что на ширину спектральных пиков ПРИ влияет угол наблюдения, а текстура рассматриваемой мишени не вносит вклада в полученные результаты. Таким образом, порошковые мишени можно использовать в разрабатываемом методе диагностики, как и было предложено ранее в работе с поликристаллическими фольгами [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части государственного задания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020-0032 (2019-1569).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baryshevsky V.G., Feranchuk I.D., Ulyanenko A.P.* Parametric X-Ray Radiation in Crystals // Springer Tr. Mod. Phys. 2005. V. 213, No. 24. P. 182.
2. *Nasonov N., Zhukova P., Sergienko V.* Polarization Bremsstrahlung in a Backward Direction for Medium Structure Diagnostics // J. Phys. Conf. 2010. V. 236. P. 012017.
3. *Alekseev V.I., Eliseev A.N., Irribarra E., Kishin I.A.* Research of the Polarization Bremsstrahlung of Relativistic Electrons in Polycrystalline Targets // Nucl. Instr. Meth. B. 2015. V. 342. P. 47–51.
4. *Hsun Hu.* Texture of Metals // Texture, Stress, Microstructure. 1974. V. 1. P. 233–258.
5. *Alekseev V.I., Eliseev A.N., Irribarra E., Kishin I.A., Klyuev A.S., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Trofymenko S.V., Zhukova P.N.* Parametric X-Ray Radiation from Powders // Phys. Lett. A. 2019. V. 383, No. 8. P. 770–773.
6. *Alekseev V.I., Eliseyev A.N., Irribarra E., Kishin I.A., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Sotnikova V.S., Yaprntsev M.N., Ivanshuk I.O.* Parametric X-Ray Radiation from Nanopowders // Rad. Phys. Chem. 2023. V. 202. P. 110497.
7. *Alexeyev V.I., Astapenko V.A., Eliseyev A.N., Irribarra E., Karpov V.A., Kishin I.A., Krotov Yu.A., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Al-Omari M., Sakhno S.V.* Investigation into the Mechanisms of X-Ray Generation during the Interaction between Relativistic Electrons and a Medium by Means of the Röntgen-1 Setup // J. Surf. Invest. 2017. V. 11. P. 694–698.
8. Патент на полезную модель № 199118 от 20.05.2020. Порошковая мишень для исследования свойств параметрического рентгеновского излучения релятивистских электронов / Кубанкин А. С., Кищин И. А., Ключев А. С., Нажмудинов Р. М., Каплий А. А., Шевчук О. Ю. Оpubл. 17.09.2020.
9. *Astapenko V., Nasonov N., Zhukova P.* Anomalous Peak in the Spectrum of Polarizational Bremsstrahlung from Relativistic Electrons Moving through a Solid Target // J. Phys. B. 2007. V. 40. P. 1337–1346.

Получено 1 февраля 2024 г.