

УДК 537.531

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРЕН ПОРОШКОВЫХ МИШЕНЕЙ НА СПЕКТРЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

В. И. Алексеев¹, А. Н. Елисеев¹, И. А. Кищин^{1,2}, А. С. Ключев^{1,2},
А. С. Кубанкин^{1,2}, Р. М. Нажмудинов^{1,2}

В работе представлены результаты измерений зависимости ширины на полувысоте и относительной интенсивности спектральных пиков параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) для различных кристаллографических плоскостей от размера зерен микронного алмазного порошка.

Ключевые слова: параметрическое рентгеновское излучение, порошковые мишени, релятивистские электроны.

Введение. Параметрическое рентгеновское излучение возникает вследствие взаимодействия налетающих заряженных частиц с электронными оболочками атомов периодической среды. Существует большое количество теоретических работ и обзоров по исследованию параметрического резонансного излучения (ПРИ) из кристаллов [1–3], мозаичных кристаллов [4] и поликристаллических сред [5, 6]. Эти теории хорошо апробированы и получили свое подтверждение в работах для кристаллов [7, 8], мозаичных кристаллов [9] и поликристаллов [10–12].

Данная работа является продолжением исследований ПРИ из порошковых мишеней, то есть мишеней без преимущественной ориентации зерен (без текстуры). Случайная ориентация зерен в порошках позволяет регистрировать ПРИ от различных кристаллографических плоскостей в отличие от монокристаллов и текстурированных поликристаллов, в которых доминирует, как правило, излучение от одной кристаллографической плоскости. Первые исследования генерации ПРИ в порошковых мишенях были выполнены в работе [13], в которой проводились количественные измерения спектров ПРИ в вольфрамовой порошковой мишени с размером зерен 0.8–1.7 мкм, в этой

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: klyuevas@lebedev.ru.

² НИУ “Белгородский государственный национальный исследовательский университет”, 308015 Россия, Белгород, ул. Победы, д. 85.

работе было показано хорошее согласие экспериментальных данных с кинематической теорией ПРИ для поликристаллических сред. Но т. к. в работе использовался только один сорт порошка, не была исследована зависимость свойств ПРИ от размера зерен мишени.

Как известно, ПРИ формируется на длине ослабления [14–16], которая лежит в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров для алмазного порошка. Ожидается, что в мишенях из микронных порошков, где размер зерен меньше длины ослабления, должно наблюдаться уширение пиков. В работе [17] показано, что существует эффект уширения пиков при уменьшении размеров кристаллитов.

В настоящей работе проведена первая попытка выявления зависимости свойств ПРИ из порошковых мишеней от размера зерна. Исследовались следующие свойства: зависимость ширины на полувысоте рефлекса ПРИ и отношение выхода пиков ПРИ от размеров зерна.

Эксперимент. Экспериментальная часть работы была выполнена на установке “Рентген 1” [18] в Лаборатории электромагнитных взаимодействий Отдела физики высоких энергий ФИАН. В качестве источника релятивистских электронов использовался микротрон, который является инжектором синхротрона “ПАХРА”. Энергия ускоренных электронов составляла 7 МэВ, частота следования импульсов 50 Гц, длительность импульсов 4 мкс. Для увеличения количества зерен, участвующих в процессе излучения, магнитооптическая система была настроена так, чтобы пучок электронов имел

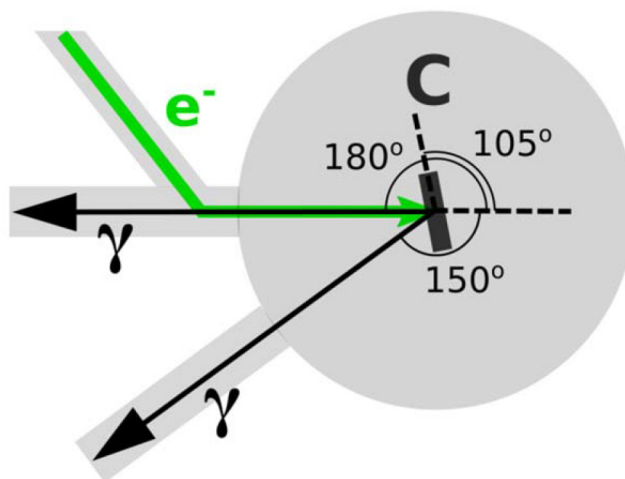


Рис. 1: Геометрия эксперимента: C – алмазная порошковая мишень, γ – направления распространения ПРИ, e^- – направление движения электронов.

достаточно большой диаметр 8 мм с начальной расходимостью менее 3 мрад в месте расположения мишени.

На рис. 1 показана геометрия эксперимента. Излучение детектировалось под углами наблюдения 150° и 180° полупроводниковыми рентгеновскими дрейфовыми детекторами Amptek XR-100 FAST SDD. Эффективность регистрации детектора в области от 3 до 10 кэВ близка к 100%. Телесные углы, в которых регистрировалось излучение для углов наблюдения 150° и 180° относительно направления движения электронов, составляли 2×10^{-4} ср и 7×10^{-4} ср, соответственно.

Для проведения измерений из алмазных порошков с размерами зерен $0.3 \text{ мкм} \pm 0.1 \text{ мкм}$, $6 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$ и $42 \text{ мкм} \pm 7 \text{ мкм}$ были изготовлены три мишени толщиной 1 мм. Порошок размещался между двумя майларовыми плёнками толщиной 25 мкм, которые клеились с двух сторон полиметилметакрилатовой пластины со сквозным прямоугольным отверстием размерами $9 \times 23 \text{ мм}^2$. На этапах подготовки мишеней проводился элементный рентгеновский анализ порошков и элементов конструкции мишени. Исследования показали, что конструкционные элементы не содержат примесей с элементами тяжелее кислорода. В алмазных порошках были выявлены примеси кремния, кальция, марганца, хрома и железа, энергия характеристических линий примесей не находится близко к энергиям ПРИ.

Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 2, красная кривая соответствует спектру при угле наблюдения 150° , синяя кривая соответствует спектру при угле наблюдения 180° . В ходе выполнения исследований удалось выявить рефлекс ПРИ от плоскости (111) с энергией 3.01 кэВ и 3.12 кэВ (длины ослабления 31.8 мкм и 35.6 мкм) и от плоскости (220) с энергией 4.916 кэВ и 5.089 кэВ (длины ослабления 165.5 мкм и 143.1 мкм) для углов наблюдения 180° и 150° соответственно, данные рефлексии были выявлены для всех типов мишеней. Также были выявлены рефлексии от плоскости (311), но они находились близко к характеристической линии марганца (5.97 и 5.9 кэВ, соответственно).

Также присутствуют спектральные характеристические линии примесных элементов, входящих в состав используемых порошков. Дополнительным подтверждением, что наблюдалось именно ПРИ, а не характеристическое рентгеновское излучение ХРИ, является зависимость энергии пиков от угла наблюдения, в случае наблюдения ПРИ при угле наблюдения 180° энергия пиков имеет меньшую энергию, чем для угла наблюдения 150° .

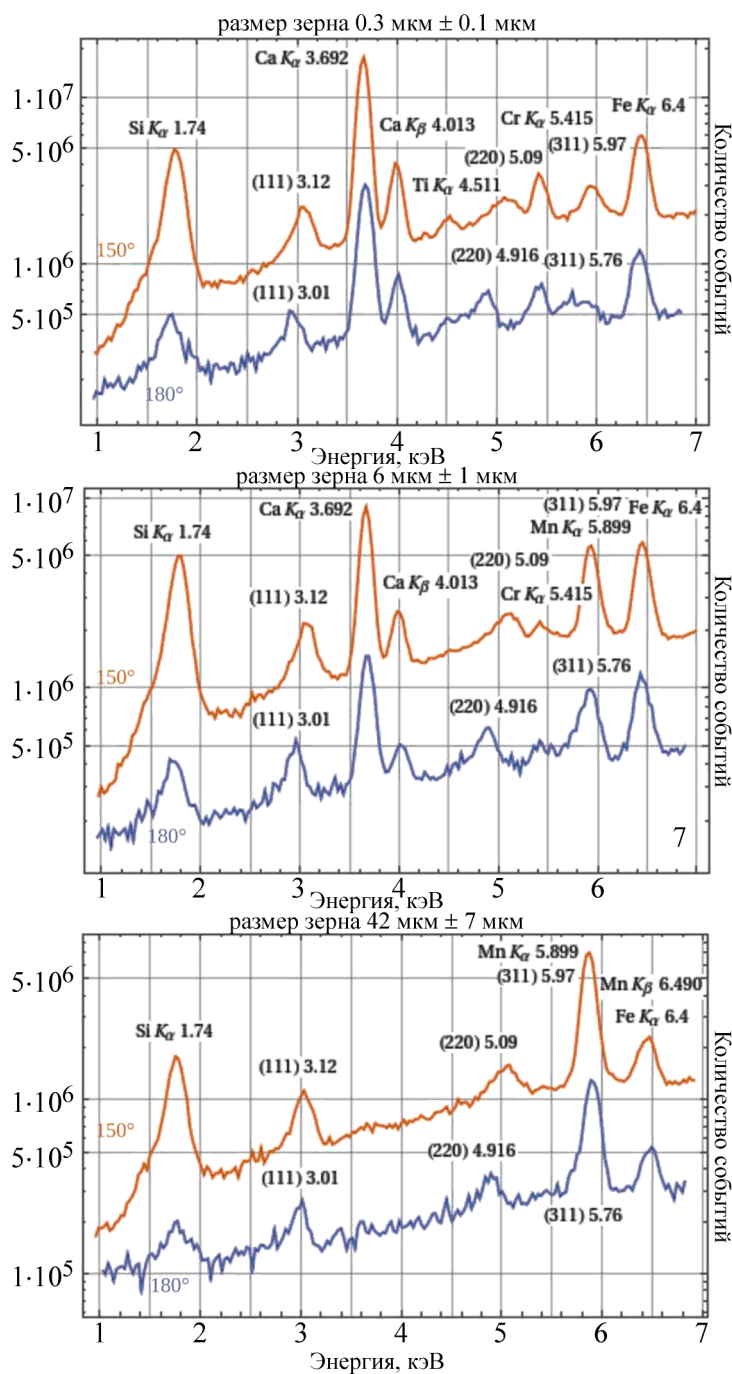


Рис. 2: Спектры ПРИ, образованного в порошковых мишенях с размерами зерен 0.3, 6.42 мкм, измеренные при углах наблюдения 150° (красная линия) и 180° (синяя линия). Пики с энергией около 3 и 5 кэВ соответствуют ПРИ от кристаллографических плоскостей (111) и (220), остальные пики относятся к ХРИ примесных элементов.

Результаты и обсуждения. Для математической обработки была найдена функция, лучше всего описывающая экспериментальные данные. Она состояла из суммы квадратичной функции для фона и от 6 до 10 гауссианов, по одному на каждый распознанный пик. Так удалось разделить вклады двух пиков в том случае, когда они сливались.

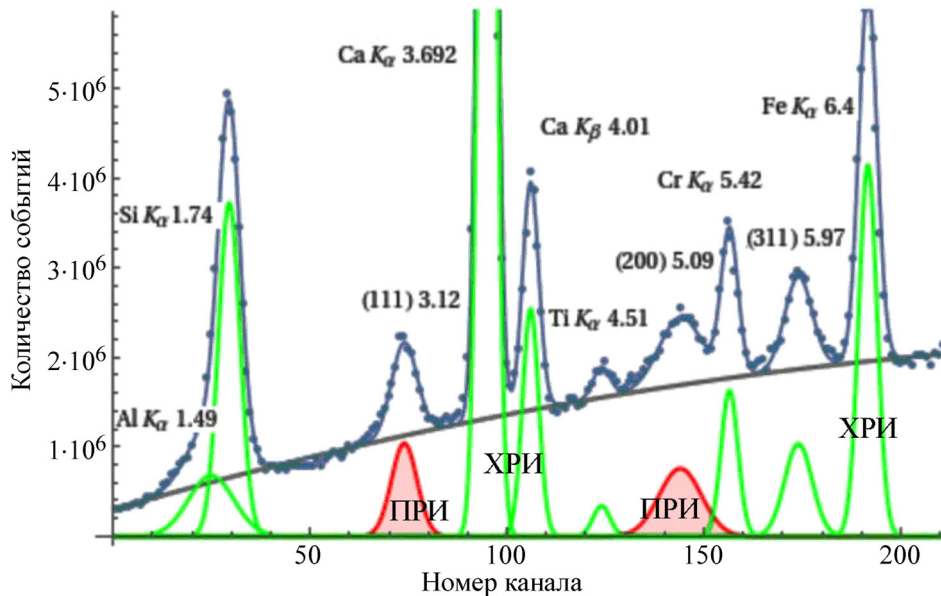


Рис. 3: Спектр алмазного порошка с размером зерен 0,3 мкм, измеренный под углом наблюдения 150° (точки), фитированная кривая, линия фона (серая), фитированные гауссианами пики ХРИ (зелёные), фитированные гауссианами пики ПРИ (красные).

После математической обработки находилось отношение площадей пиков ПРИ (выделены красным), это позволяло избавиться от погрешности, вносимой калибровкой. На рис. 4 показаны полученные отношения.

Как видно из рис. 4, наблюдается тенденция в изменении соотношения площадей пиков в зависимости от размера зерен, при увеличении размера зерна возрастает интенсивность излучения с более высокой энергией, это может быть связано с тем, что размер зерен порошков меньше длины ослабления для порошков с размером 0.3 и 6 мкм для плоскости (111), и меньше длины ослабления для всех порошков для плоскости (220).

На рис. 5 приведены ширины на полувысоте пиков ПРИ двух плоскостей, а также отмечены длины ослабления в алмазе для энергий 3.01 кэВ и 3.12 кэВ, соответствующих энергиям линий ПРИ от плоскости (111) при угле наблюдения 180° и 150° , соответственно. Длина ослабления в алмазе для энергий 4.92 кэВ и 5.09 кэВ равна 143.1 мкм и 165.5 мкм, соответственно, что значительно больше зерен всех образцов порошка. Из

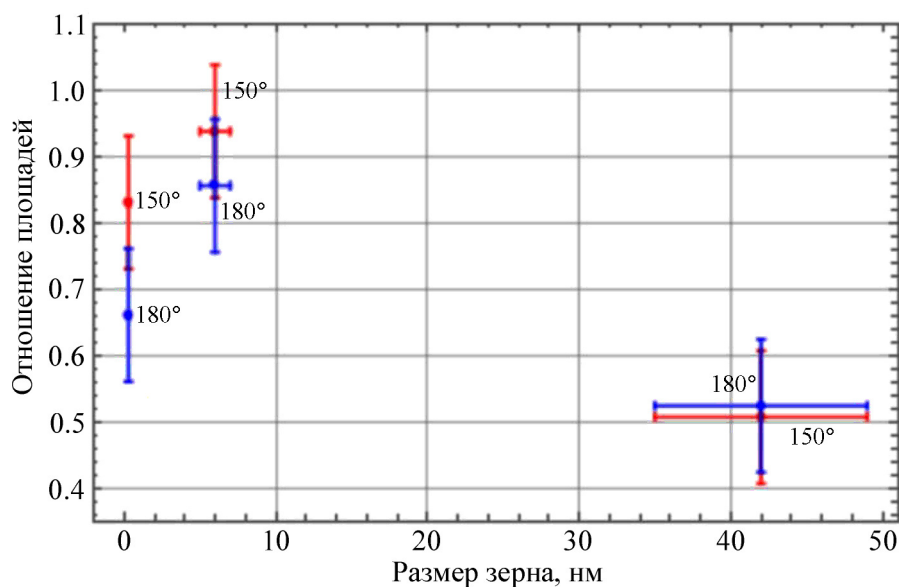


Рис. 4: Отношение площади пика ПРИ (111) к площади пика (220) для порошков с различным размером зерна: красные точки соответствуют углу наблюдения 150°, синие точки – 180°.

рис. 5 видно, что при уменьшении размера зерна ширина пика возрастает для плоскости (111), но не наблюдается изменения для плоскости (220).

Выводы. В работе были измерены спектры ПРИ релятивистских электронов, образующегося в алмазном порошке с разным размером зерен от 0.3 мкм до 42 мкм. На спектрах достоверно удалось зафиксировать пики ПРИ от кристаллографических плоскостей (111), (220), (331) для углов наблюдения 150° и 180°.

Из полученных экспериментальных результатов после математической обработки, была выявлена зависимость отношения выхода ПРИ плоскости (111) к ПРИ плоскости (220) от размера зерна, при увеличении размера зерна интенсивность более жесткого излучения возрастает.

Были получены зависимости ширины пика от размера зерен. Полученная зависимость для кристаллографической плоскости (111) показывает, что при увеличении размера зерна спектр ПРИ сужается, а для плоскости (220) не наблюдается зависимость от размера зерна. Это может быть связано с тем, что длины ослабления (31.8 мкм и 35.6 мкм) для плоскости (111) сопоставимы с размером зерен, а для плоскости (220) длины ослабления намного больше (165.5 мкм и 143.1 мкм для углов наблюдения 180° и 150°, соответственно).

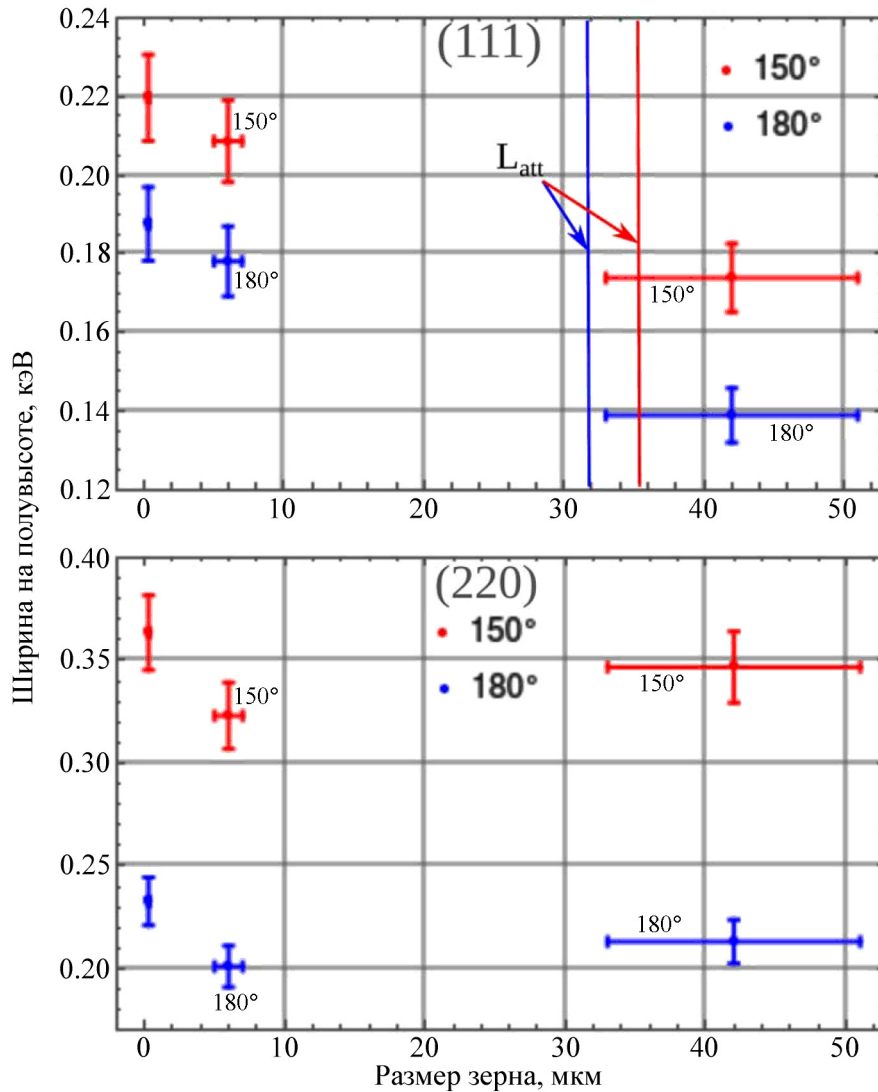


Рис. 5: Ширина на полувысоте пиков ПРИ двух плоскостей в зависимости от размера зерен, длина ослабления L_{att} в алмазе для энергий пиков от плоскости (111) (для 3.01 кэВ – синей линией, для 3.12 кэВ – красной).

Следующим этапом будут измерения ПРИ в порошковых мишенях с размером зерен менее 100 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части Госзадания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020-0032 (2019-1569), а также при поддержке одного участника стипендией Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов № СП-765.2019.2.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Ter-Mikaelian, *High-Energy, Electromagnetic Processes in Condensed Media*. M. Ter-Mikaelian (New York, Wiley, 1972), 466 p.
- [2] A. P. Potylitsyn, et al., *Diffraction Radiation from Relativistic Particles* (Springer, Berlin Heidelberg, 2010), 219–239 p.
- [3] V. G. Baryshevsky et al., *Parametric X-rays radiation in crystals: theory, experiments and applications* (Springer, Berlin Heidelberg, 2005), 188–213 p.
- [4] A. S. Kubankin, and N. N. Nasonov, *Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques* **2**(2), 317 (2008).
- [5] N. N. Nasonov, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. B* **145**, 19 (1998).
- [6] V. Astapenko, N. Nasonov, and P. Zhukova, *J. Phys. B, At. Mol. Opt. Phys.* **40**, 1337 (2007). DOI: 10.1088/0953-4075/40/7/003.
- [7] B. Sones, R. Danon, and R. Block, *Nucl. Instr. Meth. A* **560**, Issue 2, 589 (2006). DOI: 10.1016/J.NIMA.2006.01.054.
- [8] Y. N. Adishchev, A. S. Artemov, S. V. Afanasiev, et al., *JETP Lett.* **81**, 241 (2005). <https://DOI.org/10.1134/1.193100>,
- [9] V. I. Alexeyev, A. N. Eliseyev, E. Irribarra, et al., *Phys. Lett. A* **380**, 2892 (2016).
- [10] S. Nawang, I. Endo, M. Iinuma, et al., *Journal of the Physical Society of Japan* **75**(12), 124705 (2006). DOI: 10.1143/JPSJ.75.124705.
- [11] V. I. Alexeyev, A. N. Eliseyev, E. Irribarra, et al., *Phys. Lett. A* **382**, 503 (2018).
- [12] V. I. Alekseev, A. N. Eliseev, E. F. Irribarra, et al., *Phys. Res. B* **342**, 47 (2015).
- [13] V. I. Alekseev, A. N. Eliseyev, E. Irribarra, et al., *Phys. Lett. A* **383**, Iss. 8, 770 (2019).
- [14] П. Н. Жукова, А. С. Кубанкин, Н. Н. Насонов и др., *Диагностика материалов* **74**(10), 32 (2008).
- [15] П. Н. Жукова, *Дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07* (Курск, 2010), 274 с.
- [16] N. N. Nasonov, V. A. Nasonova, and I. G. Popov, *Phys. of Atomic Nuclei.* **64**(5), 966 (2001).
- [17] А. В. Шагин, *Вопросы атомной науки и техники, № 2*, 197 (2010). – № 2. Библиогр.: 9 назв. рос.
- [18] В. Алексеев, В. Астапенко, А. Елисеев и др., *Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 7*, 13 (2017).

Поступила в редакцию 12 мая 2020 г.

После доработки 14 декабря 2020 г.

Принята к публикации 15 декабря 2020 г.