

Эксперимент по высокоэффективному отклонению протонного пучка с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом на синхроциклотроне ПИЯФ

Д. А. Амерканов⁺, Л. А. Вайшнине⁺, Ю. А. Гавриков⁺, Б. Л. Горшков⁺, А. С. Денисов⁺, Е. М. Иванов⁺,
П. Ю. Иванова^{+,*}, Ю. М. Иванов⁺¹⁾, М. А. Кознов⁺, В. И. Мурзин⁺, Л. А. Щипунов⁺

⁺Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, 188300 Гатчина, Россия

^{*} Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 8 сентября 2023 г.

После переработки 8 сентября 2023 г.

Принята к публикации 10 сентября 2023 г.

В представленном эксперименте впервые наблюдалось отклонение протонного пучка с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом кремния длиной 1 мм на угол (3.0 ± 0.1) мрад с эффективностью $(32 \pm 3)\%$ при торцевом захвате в каналирование. Разработанный кристаллический дефлектор допускает увеличение угла отклонения пучка и может быть использован для получения малоинтенсивных пучков при промежуточных энергиях.

DOI: 10.31857/S1234567823200016, EDN: oqsbht

Введение. Каналирование заряженных частиц изогнутыми кристаллами, основы которого подробно освещены в обзоре [1], в настоящее время успешно используется для управления и формирования пучков на ускорителях высоких и сверхвысоких энергий. Например, на ускорителе У-70 в ИФВЭ более половины операционного времени работают пучки, связанные с кристаллическим выводом из ускорительного кольца или кристаллическим расщеплением выведенных пучков [2]. На ускорительном комплексе LHC в CERN исследуется применение кристаллов в системе медленного вывода пучка 400 ГэВ протонов из ускорителя SPS [3, 4] и в системе коллимации пучков LHC [5].

Несмотря на значительные достижения в использовании кристаллов при высоких и сверхвысоких энергиях, в области промежуточных энергий кристаллы практически не применяются. Основная проблема связана с тем, что с уменьшением энергии протонов длина деканалирования в кристалле уменьшается. Экспериментальные данные по деканалированию протонов, собранные в [6], показывают близкий к линейному характер зависимости длины деканалирования от энергии. Единственный результат в области промежуточных энергий был получен в эксперименте по поиску объемного захвата 1 ГэВ протонов в изогнутом кристалле [7], длина деканалирова-

ния для (111) плоскостей в нем была найдена равной (1.26 ± 0.09) мм [8, с. 158]. С тех пор новых экспериментальных данных по деканалированию для промежуточных энергий, насколько нам известно, не появилось.

Величина длины деканалирования влияет на эффективность отклонения заряженных частиц изогнутым кристаллом. Эффективность определяется как отношение числа отклоненных частиц к числу упавших на кристалл и оценивается (при торцевом захвате) произведением геометрического аксептанса плоскостного канала на экспоненту затухания каналированного пучка из-за рассеяния на электронах в канале. Например, в опытах по объемному захвату [7, 8] применялся кристалл длиной 10 мм, изогнутый на 21 мрад наклеиванием на стеклянный цилиндр радиусом 46 см. При такой длине из-за деканалирования эффективность отклонения параллельного пучка кристаллом не превышает 0.01 %. Уменьшение же длины кристалла с целью увеличения эффективности уменьшает предельный угол изгиба, что ухудшает пространственное разделение падающего и каналированного пучков. В опытах по объемному отражению 1 ГэВ протонов [9] применялся кристалл длиной по пучку 30 микрон, эффективность каналирования составила 63 %, но угол отклонения был равен 0.4 мрад. Для упругоквазимоэаичного способа изгиба [10], использованного в этих опытах, полученное отклонение близко к практическому пределу, опре-

¹⁾e-mail: ivanov_yu@npni.nrcki.ru

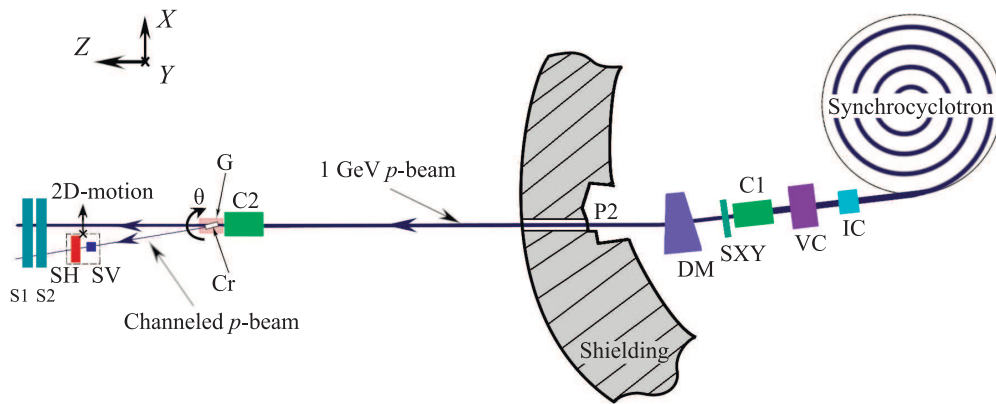


Рис. 1. (Цветной онлайн) Расположение экспериментальной установки. Показана система координат XYZ , связанная с пучком. Направление осей X и Y соответствует рабочему ходу блока детекторов SV-SH, ось Z направлена по пучку

деляемому прочностью материала, и не зависит от размера кристалла в направлении пучка.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования, подготовленного и выполненного в 2019–2023 гг., в котором изогнутым кристаллом длиной 1 мм протонный пучок был отклонен на угол 3 мрад с эффективностью 32%, что позволяет рассматривать созданный кристаллический дефлектор как прототип кристаллических устройств для развития пучковой инфраструктуры синхроциклотрона ПИЯФ.

Методика эксперимента. В проведенном исследовании было применено такое же расположение экспериментальной установки (рис. 1), как в опытах по поиску объемного отражения [9]. Пучок протонов с энергией 1 ГэВ, медленно выведенный из синхроциклотрона, проходил ионизационную камеру IC, служившую монитором интенсивности выведенного пучка, вертикальный магнит-корректор VC и попадал в коллиматор C1 с проходным отверстием $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Положение и профиль пучка после коллиматора C1 проверялись сканером SXY. Поворотный магнит DM направлял пучок в канал P2 экспериментального зала, в котором был установлен коллиматор C2 с проходным отверстием (XY на рис. 1) $4 \times 1 \text{ мм}^2$.

Расстояние между коллиматорами C1 и C2 равнялось 31 м, между коллиматором C2 и детекторами – 5 м. Протонный канал от коллиматора C1 до детекторов откачивался до давления несколько миллибар. Окно на выходе канала было выполнено из каптоновой пленки толщиной 60 мкм.

Поворотное устройство G с кристаллом Cr было закреплено внутри протонного канала на выходной стороне коллиматора C2 и обеспечивало враще-

ние кристалла с шагом 4 мкрад в угловом диапазоне ± 10 мрад. За выходным окном канала на воздухе были расположены сцинтилляционные детекторы SV, SH, S2 и S1 (перечислены в направлении пучка). Детекторы SV и SH служили для измерения поперечного распределения протонов, детекторы S2 и S1 – для измерения интегральной интенсивности пучка.

Детекторы SV и SH были изготовлены из сцинтилляционного пластика в форме пластинок с размерами (XYZ на рис. 1) $1.5 \times 4.0 \times 7.0 \text{ мм}^3$ и $9.6 \times 1.5 \times 7.0 \text{ мм}^3$, соответственно, и установлены ортогонально друг другу в смежных светоизолированных камерах, образуя перекрестие в проекции на плоскость, перпендикулярную оси пучка. Сцинтилляции в каждой из камер регистрировались отдельными фотомножителями ФЭУ-140 в режиме малофотонного счета. Фотоны из пластика собирались ФЭУ через воздушный зазор в камерах без применения световодов. Блок с детекторами SV и SH помещался на столике, оборудованном дистанционно управляемой системой X - и Y -перемещений. Диапазон перемещений составлял 100 мм с погрешностью позиционирования 1 мкм. Блок детекторов SV-SH для измерения поперечного распределения протонов показан на рис. 2. За ним далее по пучку располагались пластиковые сцинтилляционные детекторы S2 и S1 с размерами (XYZ) $60 \times 60 \times 10 \text{ мм}^3$, позволявшими регистрировать протоны прямого и каналированного пучков, включая рассеянные на малые углы в кристалле, остаточном воздухе, окошках, сцинтилляционных пластиках (потери из-за ядерных взаимодействий малы). Время формирования импульсов во всех детекторных каналах не превышало 10 нс.

Выстройка аппаратуры на ось пучка проводилась путем облучения последовательности конвертов

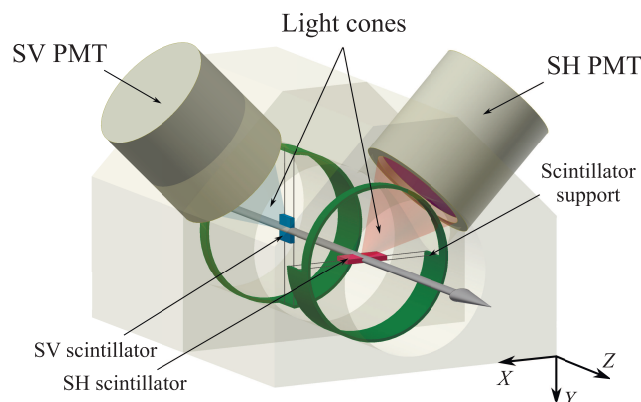


Рис. 2. (Цветной онлайн) Блок детекторов SV-SH

с фотобумагой, юстировки по отпечаткам пучка двух лазеров, задающих горизонтальную и вертикальную световые плоскости, до совпадения в пределах 1 мм линии пересечения плоскостей с осью пучка, последующего выставления на линию пересечения элементов установки.

Электроника экспериментальной установки позволяла выполнить необходимые в процессе измерений перемещения элементов и обеспечивала сбор физических данных. По завершении заданной экспозиции в очередном положении управляющая программа записывала дату, время, линейное положение X , линейное положение Y , угловое положение θ , длительность набора данных, число зарегистрированных импульсов в каналах S1, S2, S1&S2, SH, SV, SH&SV.

В эксперименте использовались три типа измерений. Линейный X -скан детекторами SV-SH при фиксированном линейном положении Y и фиксированном угловом положении θ кристалла Сг, линейный Y -скан детекторами SV-SH при фиксированном линейном положении X и фиксированном угловом положении θ кристалла Сг, угловой θ -скан кристаллом при фиксированных X - и Y -положениях детекторов SV-SH. Эти измерения позволяли полностью решить задачи поиска каналирования и определения характеристик прямого и отклоненного пучков.

Изогнутый кристалл для каналирования протонов с энергией 1 ГэВ. Рабочий кристалл для эксперимента был изготовлен в ПИЯФ из слитка бездислокационного монокристаллического кремния. В качестве каналирующих плоскостей были выбраны атомные плоскости (110), имеющие высокий геометрический аксептанс при торцевом захвате в режим каналирования. Для изгиба был использован антикластический эффект, позволяющий вынести места

закрепления кристалла за пределы пучка и обеспечивающий высокую однородность кривизны изгиба (рис. 3). Впервые антикластический изгиб для каналирования заряженных частиц высоких энергий был применен в [11].

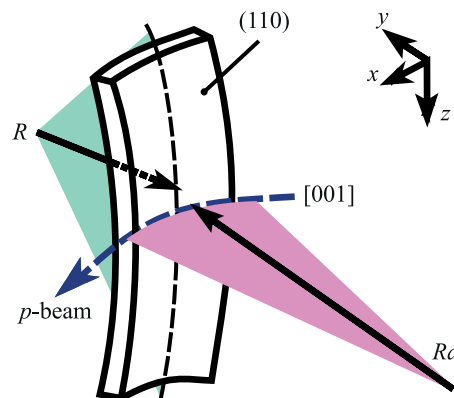


Рис. 3. (Цветной онлайн) Схема изгиба кристалла. Показана система координат xyz пластинки и ориентация кристаллической решетки

Монокристаллический кремний является анизотропным материалом, свойства которого зависят от направления. Аналитически изгиб анизотропных тел был исследован Voigt'ом [12]. В частности, им были получены решения для растяжения, изгиба и кручения анизотропного стержня с эллиптическим сечением. Эти решения приведены в книге Лехницкого [13] и были применены Сумбаевым [14] для объяснения упругоквазимозаичного эффекта при дифракции гамма-излучения на упруго изогнутых пластинах кварца в фокусирующих кристалл-дифракционных спектрометрах. Хорошее согласие расчетов Сумбаева с экспериментом [15] подтвердило применимость модели. Позднее Самсонов [16] использовал это же приближение для описания антикластического изгиба и некоторых других эффектов в изогнутых анизотропных пластинках различной ориентации, которые также были подтверждены экспериментально [17].

Выражение, описывающее форму срединного сечения кристаллической полоски, изогнутой по радиусу R , в системе координат xyz на рис. 3 имеет вид:

$$y = \frac{z^2}{2R} - \frac{x^2}{2R_a},$$

где R_a – наведенный антикластический радиус изгиба, определяемый выражением (для анизотропии общего вида):

$$R_a = R \frac{S_{35}^2 - S_{33}S_{55}}{S_{13}S_{55} - S_{15}S_{35}},$$

в котором S_{13} , S_{33} , S_{35} , S_{55} – константы упругости, вычисленные с учетом ориентации пластинки относительно кристаллографических осей. Если изгиб не сопровождается кручением ($S_{35} = 0$), это упрощает формулу до использованной в [18]:

$$R_a = R \frac{-S_{33}}{S_{13}}.$$

В случае монокристаллического кремния отношение R_a/R имеет минимум для вырезки, при которой атомная плоскость (110) совпадает со срединным сечением, а ось [001] – с пучком, как показано на рис. 3. Эта вырезка была применена при изготовлении пластинок.

Длина пластинок в направлении пучка была выбрана равной 1 мм. Это соответствует длине деканалирования (110) плоскостей, полученной пересчетом измерения [8] длины деканалирования (111) плоскостей по модели [19], предсказывающей линейную зависимость длины деканалирования от межплоскостного расстояния. Высота рабочих пластинок, определяемая размерами падающего на кристалл пучка и мест крепления кристалла, выбрана равной 30 мм. Толщина пластинок t определяет предельный радиус изгиба без риска разрушения. На основе опыта критический радиус изгиба обычно принимается равным $1000t$. Поскольку уменьшение толщины t пропорционально уменьшает интенсивность каналированного пучка, было выбрано значение 0.1 мм, при котором интенсивность отклоненного пучка все еще значительно превышает фон от коллиматора С2, а антикластический изгиб имеет заметную величину, достаточную для разделения пучков. При выбранной толщине и ориентации пластинки радиус антикластического изгиба может достигать 300 мм. Это значение много больше критического радиуса изгиба для каналирования (радиуса Цыганова) протонов с энергией 1 ГэВ, равного 2.7 мм, поэтому влиянием изгиба на эффективность отклонения частиц можно пренебречь.

В ходе подготовки эксперимента была изготовлена серия плоскопараллельных пластинок (полосок) с размерами (xyz) $1.0 \times 0.1 \times 30.0$ мм³. Все четыре длинные грани каждой пластинки были глубоко полированы с финишным зерном 0.25 мкм. Полученная плоскостность больших граней 30.0×1.0 мм² была лучше 0.5 мкм, угол склонения больших граней и плоскости (110) был меньше 50 мкрад.

Процесс изгиба кристалла в изгибающем устройстве контролировался оптически по изменению угла отражения лазерного луча от изогнутого кристалла при линейном перемещении сборки, а так-

же по дифракции рентгеновского излучения. Угол изгиба, обусловленный антикластическим эффектом, найденный из рентгеновских измерений, равен (2.9 ± 0.1) мрад.

Результаты измерений. На рисунке 4 показан линейный X -скан, пересекающий прямой и отклоненный пучки при Y в центре прямого пучка и θ в максимуме каналирования. По горизонтальной оси отложено X -положение в мм, по вертикальной оси – счеты совпадений SH&SV за 10 с. Изменения интенсивности протонного пучка в процессе сканирования учтены поправкой счетов SH&SV по показаниям детекторов S2 и S1. По результатам фитирования пиков угол отклонения каналированных протонов найден равным (3.0 ± 0.1) мрад. Он получен сложением расстояния между центрами прямого и отклоненного пучков 14 мм со смещением кристалла относительно центра прямого пучка 0.9 мм и делением суммы на расстояние между кристаллом и детектором SV, равное 5 м. Найденное значение принято за величину антикластического изгиба кристалла. Оно согласуется в пределах ошибки с рентгеновскими данными.

Для определения эффективности отклонения протонов кристаллом были выполнены многократные линейные X – Y -сканирования пучков, из анализа которых определено отношение интегральных потоков отклоненного и прямого пучков, равное 1/100. В случае соосности коллиматора С2 и протонного пучка, на кристалл должна попадать 1/40 часть от числа прошедших коллиматор протонов, которая равна отношению толщины кристалла 0.1 мм к ширине отверстия коллиматора 4 мм. Анализ измеренных распределений и моделирование прохождения протонов через коллиматор привели к заключению о наличии небольшого угла между осями коллиматора и пучка, из-за которого ширина прохода 4 мм уменьшилась до 3.2 мм. С учетом этой поправки эффективность отклонения протонов кристаллом найдена равной (32 ± 3) %.

Анализ результатов и выводы. Для равномерного распределения падающих на кристалл протонов в интервале углов $\pm\Phi$ эффективность отклонения ε определяется выражением [1, 20]:

$$\varepsilon = \frac{2x_c}{d_p} \frac{\pi}{4} \frac{\theta_c}{\Phi} e^{-\frac{l}{\lambda_d}},$$

где $d_p = 1.92 \text{ \AA}$ – ширина плоскостного (110) канала, $x_c = d_p/2 - 2.5u_T$ – критическая полуширина канала устойчивого каналирования, $u_T = 0.075 \text{ \AA}$ – средняя амплитуда тепловых колебаний атомов кремния, l – длина кристалла по пучку, λ_d – длина деканалирования.

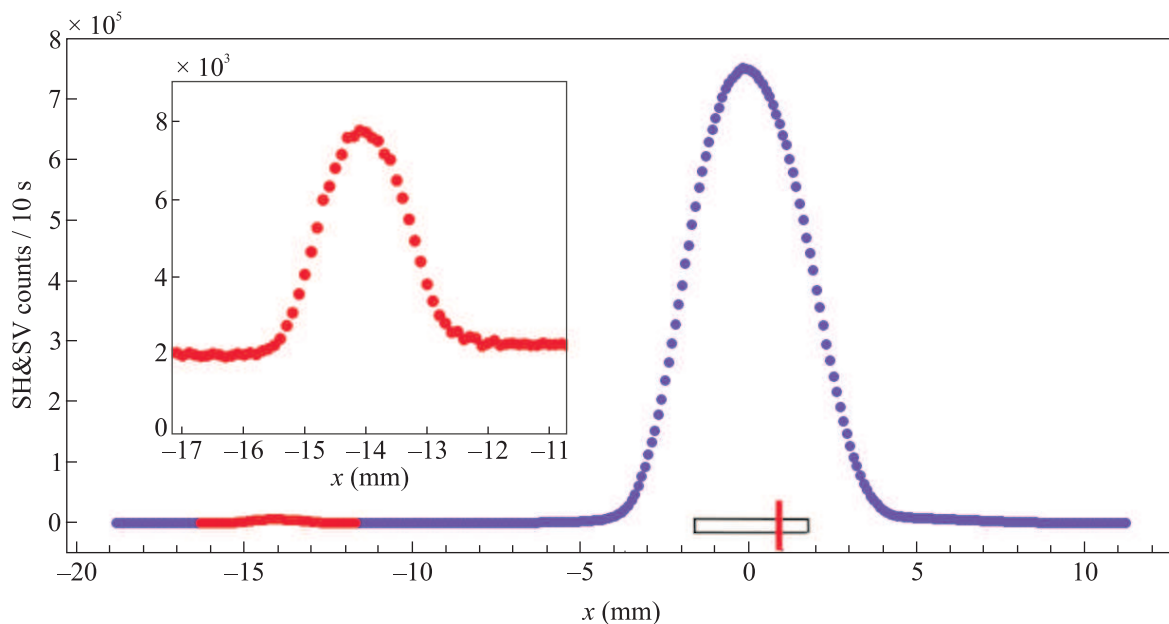


Рис. 4. (Цветной онлайн) Линейный X-скан прямого и каналированного пучков. Снизу пика прямого пучка показано положение кристалла относительно эффективного отверстия коллиматора С2

Принимая критический угол каналирования θ_c равным 139 мкрад, что соответствует критической поперечной энергии каналирования $E_c(x_c) = 14.32$ эВ (см. [20]), и оценивая расходимость пучка Φ величиной 161 мкрад по полуразмеру отверстия коллиматора С1, находим значение длины деканалирования λ_d , равное (1.9 ± 0.3) мм.

Найденное значение соответствует торцевому захвату в режим каналирования и заметно отличается от оценки длины деканалирования 1 мм, полученной пересчетом результата эксперимента по объемному захвату [8]. По-видимому, это свидетельствует о различии процессов деканалирования при торцевом и объемном захвате. Объяснение может состоять в том, что при торцевом захвате заселяются все состояния каналирования, а в случае объемного захвата заселяются преимущественно верхние состояния, которые деканалируют быстрее.

Большее значение длины деканалирования при торцевом захвате позволяет применить более длинные в направлении пучка кристаллы и тем самым увеличить угол отклонения частиц. Это, в свою очередь, делает возможной постановку задачи о кристаллическом выводе пучка из 1 ГэВ протонного синхротрона ПИЯФ.

Авторы выражают благодарность дирекции Отделения физики высоких энергий за поддержку, сотрудникам Ускорительного отдела за сотрудничество и помощь при проведении экспериментов.

1. V.M. Biryukov, Yu.A. Chesnokov, and V.I. Kotov, *Crystal Channeling and its Application at High-Energy Accelerators*, Springer, Berlin (1997).
2. Yu.A. Chesnokov, A.G. Afonin, V.T. Baranov, G.I. Britvich, P.N. Chirkov, V.A. Maisheev, D.A. Savin, and V.I. Terekhov, JETP **127**, 115 (2018).
3. L.S. Esposito, P. Bestmann, M. Butcher et al. (Collaboration UA9), *Crystal for slow extraction loss-reduction of the SPS electrostatic septum*, 10th International Particle Accelerator Conference, JACoW Publishing, Geneva, Switzerland (2019), p. 2379.
4. F.M. Velotti, P. Bestmann, M. Butcher et al. (Collaboration UA9), *Demonstration of loss reduction using a thin bent crystal to shadow an electrostatic septum during resonant slow extraction*, 10th International Particle Accelerator Conference, JACoW Publishing, Geneva, Switzerland (2019), p. 3399.
5. W. Scandale, G. Arduini, R. Assmann et al. (Collaboration UA9), Int. J. Mod. Phys. A **37**, 2230004 (2022).
6. R.A. Carrigan, Jr., *Phenomenological Summary of Dechanneling in Aligned Single Crystals*, FNAL preprint FN-454, 1 (1987).
7. V.A. Andreev, V.V. Baublis, E.A. Damaskinskii et al. (Collaboration), JETP Lett. **36**, 415 (1982).
8. V.M. Samsonov, *The Leningrad experiment on volume capture*, in Relativistic Channeling NATO ASI series B: Physics **165**, 129 (1987).

9. Yu. M. Ivanov, N. F. Bondar', Yu. A. Gavrikov, A. S. Denisov, A. V. Zhelamkov, V. G. Ivochkin, S. V. Kos'yanenko, L. P. Lapina, A. A. Petrunin, V. V. Skorobogatov, V. M. Suvorov, A. I. Shchetkovsky, A. M. Taratin, and W. Scandale, JETP Lett. **84**, 372 (2006).
10. Yu. M. Ivanov, A. A. Petrunin, and V. V. Skorobogatov, JETP Lett. **81**, 99 (2005).
11. A. G. Afonin, V. M. Biryukov, V. A. Gavrilushkin et al. (Collaboration), JETP Lett. **67**, 781 (1998).
12. W. Voigt, *Lehrbuch der Kristallphysik*, Teubner, Leipzig (1910).
13. С. Г. Лехницкий, *Теория упругости анизотропного тела*, Гостехиздат, М. (1950).
14. O. I. Sumbaev, Soviet Physics JETP **5**, 1042 (1957).
15. O. I. Sumbaev, Soviet Physics JETP **27**, 724 (1968).
16. В. М. Самсонов, *Изгиб пластины в фокусирующих кристалл-дифракционных рентгеновских и гамма-спектрометрах*, препринт ЛИЯФ-278 (1976).
17. В. М. Самсонов, Е. Г. Лапин, *О нескольких возможностях и особенностях использования изогнутого кристалла в кристалл-дифракционных приборах*, препринт ЛИЯФ-587 (1980).
18. V. Guidi, L. Lanzoni, and A. Mazzolari, J. Appl. Phys. **107**, 113534 (2010).
19. V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, N. A. Galyaev, V. I. Kotov, I. V. Narsky, S. V. Tsarik, V. N. Zapolsky, O. L. Fedin, M. A. Gordeeva, Yu. P. Platonov, and A. I. Smirnov, NIM B **86**, 245 (1994).
20. А. М. Таратин, *Физика элементарных частиц и атомного ядра* **29**, 1063 (1998).