

Математическое моделирование физических процессов

Научная статья

УДК 538.911; 539.1.03

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16104>

ИЗЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ В ИСКРИВЛЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ

В. В. Гавриловец¹ ✉, **А. В. Король**², **Г. Б. Сушко**²,
В. К. Иванов³, **А. В. Соловьев**²

¹ Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
г. Минск, Беларусь;

² Научно-исследовательский центр мезобионаносистем, г. Франкфурт-на-Майне, Германия;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ bycel@tut.by

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования процесса распространения высокоэнергетических заряженных частиц в изогнутых кристаллических средах кремния и германия в рамках атомистического подхода. Проведено сравнение расчетных результатов с литературными экспериментальными данными по измерению выходного углового распределения релятивистских электронов с энергией 855 МэВ и очень малой начальной расходимостью, а также их спектров выходного излучения для коротких изогнутых монокристаллов кремния и германия, обладающих различными радиусами изгиба. Установлено хорошее согласие всех результатов.

Ключевые слова: ультрарелятивистский электрон, изогнутый монокристалл, кремний, германий, каналирование, излучение при каналировании электронов

Финансирование: Данная работа поддержана в рамках проекта H2020-MSCA-RISE-2019 N-LIGHT. Также работа частично поддержана грантом БРФФИ-МЦТФ, номер Ф22МЦ-006.

Для цитирования: Гавриловец В. В., Король А. В., Сушко Г. Б., Иванов В. К., Соловьев А. В. Излучение высокоэнергетических электронов при каналировании в искривленных монокристаллах кремния и германия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 1. С. 33–50. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16104>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16104>

RADIATION OF HIGH-ENERGY ELECTRONS WHEN CHANNELING IN THE BENT SILICON AND GERMANIUM MONOCRYSTALS

V. V. Haurylavets¹ ✉, **A. V. Korol**², **G. B. Sushko**²,
V. K. Ivanov³, **A. V. Solov'yov**²

¹ Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus;

² MBN Research Center at Frankfurt Innovation Center of Biotechnology,
Frankfurt am Main, Germany;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
✉ bycel@tut.by

Abstract. In the paper, the simulation results on propagation of high-energy charged particles in the bent crystalline (Si and Ge) media have been presented within the atomistic approach. The calculation results were compared with literary experimental data obtained by measuring the output angular distribution of 855 MeV electrons with their very low initial divergence. Moreover, the literary experimental data on output radiation spectra for short bent Si and Ge crystals with different bending radii were taken into account. A good agreement between all the results was found.

Keywords: ultrarelativistic electron, bent monocrystal, silicon, germanium, channeling, radiation when electrons channeling

Funding: The present work is supported by the Project H2020-MSCA-RISE-2019 N- LIGHT. Moreover, the work is partly supported by Grant BRFFI-MCTF, No. F22MC-006.

For citation: Haurylavets V. V., Korol A. V., Sushko G. B., Ivanov V. K., Solov'yov A. V., Radiation of high-energy electrons when channeling in the bent silicon and germanium monocrystals, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (1) (2023) 33–50. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16104>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

В течение многих лет процессы распространения заряженных частиц внутри вещества являются объектом повышенного внимания в теоретических и экспериментальных исследованиях, поскольку результаты таких исследований имеют большое прикладное значение помимо фундаментального. В частности, заряженные ультрарелятивистские частицы, которые распространяются внутри кристаллической решетки, могут проходить аномально большие расстояния в ориентированных кристаллах, двигаясь внутри потенциального канала, созданного электростатическим полем атомных плоскостей или осей. Этот процесс, названный каналированием, был предсказан Йенсом Линдхардом [1] в середине 1960-х годов. Такие частицы, захваченные в канал неизогнутого кристалла, могут пробегать значительные расстояния вследствие малой потери энергии на своем пути (см. монографию [2] и ссылки в ней). Длина пробега частиц, захваченных в монокристалл, существенно превышает среднюю длину их пробега в аморфной мишени. Направления таких каналов зависят от заряда ультрарелятивистских частиц: для электронов канал пролегает вдоль рядов атомов или ионных цепочек кристалла, в то время как для позитронов канал пролегает в пространстве между рядами атомов.

Будучи захваченной в канал, частица испытывает осцилляции в плоскости, поперечной направлению распространения частицы, что приводит к излучению при каналировании [3] (см. монографию [4], где дан подробный исторический обзор работ, посвященных этому явлению). Это излучение определяется поперечной энергией каналирующей частицы, его интенсивность зависит не только от энергии частицы, но и от типа монокристалла, ориентации его осей. При этом осцилляционное излучение не когерентно и имеет широкий энергетический спектр [2, 5 – 7].

За последнее время опубликовано большое количество как теоретических [2, 8 – 18], так и экспериментальных [19 – 28] работ, направленных на изучение механизмов каналирования и получение спектров излучения электронов и позитронов в прямых и изогнутых кристаллах кремния и алмаза.

Стабильность движения частиц вдоль каналов определяется малым значением энергии поперечного движения, по сравнению с величиной электростатического барьера. Таким образом, частица считается каналирующей, если длина пробега вдоль канала значительно



превышает постоянную решетки кристалла. Однако в процессе движения частица может испытывать столкновения с ионами кристаллической решетки, при этом отклониться на значительный угол и выйти из режима каналирования. Такой процесс называется деканалированием. Наряду с деканалированием имеют место процессы реканалирования, когда частица после очередного столкновения может быть вновь захвачена и продолжить движение в другом канале кристалла.

Процессы каналирования, происходящие в изогнутых кристаллах, часто используются для поворота пучков заряженных частиц, ускоренных до релятивистских энергий [2]. Движение частицы складывается из двух компонент: осцилляционное движение в канале и распространение частицы вдоль средней линии искривленного канала. Стабильность последнего движения в таком искривленном канале достигается при дополнительном условии, а именно – когда радиус кривизны R значительно превышает критическую величину R_c , определяемую продольной энергией частицы [2]. Такое движение релятивистской частицы при каналировании в изогнутом канале приводит к дополнительному излучению синхротронного типа. Интенсивность и частота синхротронного излучения зависят от типа и энергии каналирующих частиц, а также от характеристик кристалла [8 – 18].

Исследование синхротронного излучения представляет большой интерес в связи с концепцией кристаллического ондулятора [2]. Возможность каналирования заряженных релятивистских частиц в периодически изогнутом кристалле (кристаллическом ондуляторе) может дать новый источник монохроматического излучения с энергией от сотен кэВ до нескольких МэВ. В некоторых лабораториях проводятся эксперименты по измерению параметров каналирования и характеристик спектров излучения ультрарелятивистских позитронов [29 – 31] и электронов [32, 33] в прямых и изогнутых кристаллах кремния и алмаза. Теоретические работы по исследованию процессов каналирования в этих кристаллах проводятся с использованием разработанного пакета прикладных программ MBN Explorer [34, 35]. Возможность применения этого пакета для моделирования и описания процессов каналирования электронов и позитронов была проверена для аморфного кремния и кристаллов кремния и германия [2, 7, 11, 36].

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является моделирование физических процессов при каналировании ультрарелятивистских электронов с энергией 855 МэВ в прямых и изогнутых монокристаллах кремния и германия.

При описании прохождения заряженных частиц через кристаллическую среду используется атомистический подход, реализованный с позиций классической релятивистской физики. Указанный подход предполагает определение траектории распространения заряженных частиц в кристаллах и соответствующие спектры излучения с использованием квазиклассического метода Байера – Каткова [37]. Моделирование процесса каналирования электронов и позитронов в прямых и изогнутых каналах было выполнено с помощью универсального пакета вычислительных программ MBN Explorer [34, 35].

В следующем разделе кратко описана вычислительная процедура для расчета траектории частицы в кристалле. Статистическая обработка большого числа траекторий распространения частиц в кристалле позволяет определять основные параметры каналирования, а также спектры излучения частиц. В последующих разделах значения полученных параметров обсуждаются и сравниваются с экспериментальными данными.

Для сравнения с полученными нами расчетными результатами, экспериментальные данные по угловому рассеянию электронов были взяты из работ [11, 38], а по излучению – из работы [17]. Эти данные были получены на микротроне (МАМИ) в г. Майнце, Германия.

МАМИ представляет собой микротрон, который генерирует пучок релятивистских электронов с энергией 855 МэВ и очень малой их расходимостью (ею можно пренебречь при моделировании). В качестве мишени использовали тонкие изогнутые кристаллы германия и кремния. Технология производства последних хорошо отлажена и позволяет получать очень чистые кристаллы с малым количеством дефектов. Частицы, прошедшие через кристалл, разделялись магнитным полем на заряженные и нейтральные, при этом измерялся спектр их излучения. Экспериментальная установка более детально описана в работе [18].

Метод вычислений

В работе используется метод релятивистской молекулярной динамики, реализуемый в пакете программ MBN Explorer [34, 35]. Данный метод позволяет моделировать прохождение заряженных ультрарелятивистских частиц в электростатическом поле кристаллической среды $\mathbf{E}(\mathbf{r})$. Целью таких расчетов является построение большого количества случайных траекторий движения частиц в кристалле; при их статистической обработке определяются основные характеристики прохождения частиц и спектры их излучения.

Решаются классические уравнения релятивистской механики

$$d\mathbf{p} / dt = q\mathbf{E}, \quad d\mathbf{r} / dt = \mathbf{v}, \quad (1)$$

где q , \mathbf{r} – заряд частицы и ее координата; \mathbf{p} , \mathbf{v} – ее релятивистский импульс и скорость.

Электростатическое поле $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ определяется через градиент от суммы атомных потенциалов U_{atom} ближайших атомов к моделируемой частице:

$$q\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -q\nabla_r U(\mathbf{r}),$$

$$U(\mathbf{r}) = \sum_j U_{atom}(\rho_j) = \sum_j U_{atom}(\mathbf{r} - \mathbf{R}_j). \quad (2)$$

Потенциал U_{atom} отдельного атома очень быстро спадает, и на некотором расстоянии

$$\rho_j = |\mathbf{r} - \mathbf{R}_j| \gg \alpha_{TF}$$

где α_{TF} – радиус Томаса – Ферми (в расчетах им можно пренебречь), \mathbf{R}_j – радиус-вектор до атома.

Ввиду малости радиуса Томаса – Ферми α_{TF} , при расчете электростатического поля кристаллической среды достаточно ограничиться некоторой областью (конечный объем), в которой атомы расположены по узлам кристаллической решетки. При этом используемый пакет программ учитывает также случайные смещения атомов относительно узлов решетки вследствие тепловых колебаний.

В универсальном пакете MBN Explorer размер области расчета потенциала ρ_j является параметром, задаваемым при моделировании. При расчете потенциала $U(\mathbf{r})$ учитываются атомы в сфере радиуса ρ_j , причем расстояние от частицы до ближайшей стороны области моделирования равно или превышает величину ρ_j . Моделируемая область кристаллической среды является кубической и строится по мере продвижения частицы; изгиб кристалла реализуется как последовательное смещение кристаллической решетки по одной координате.

Использованный нами метод релятивистской молекулярной динамики реализован в программе моделирования MBN Explorer и подробно описан в работе [35]. При моделировании использовались два атомных потенциала: Мольера [39] и Пасиоса [40]. Последний основан на решении уравнений Хартри – Фока, поэтому он точнее описывает поведение атомного потенциала, в том числе на малых расстояниях.

Изгиб кристалла и ориентация кристаллических осей при моделировании задавались такими же значениями параметров, какие использовались на эксперименте, что наглядно показано на рис. 1. Пучок электронов (ЕВ) распространялся вдоль кристаллических плоскостей (СгВР), которые являются по сути вторичными изгибами кристаллической пластинки [41] при деформации кристалла. Именно вторичный изгиб использовался в эксперименте, и мы задавали его значение в настоящих расчетах.

Методами молекулярной динамики было получено большое количество (свыше 10 тыс.) траекторий прохождения электронов через кристалл с учетом случайного распределения тепловых колебаний атомов. Полученные траектории использовались для определения углового распределения электронов, пройденных через кристалл, а также для расчета их спектра излучения. Эти расчеты проводились с помощью вычислительных модулей в рамках MBN Explorer.

Излучение электронов в кристаллах кремния и германия промоделировано для различных радиусов изгиба и ориентации кристаллов; при этом рассмотрены два случая:

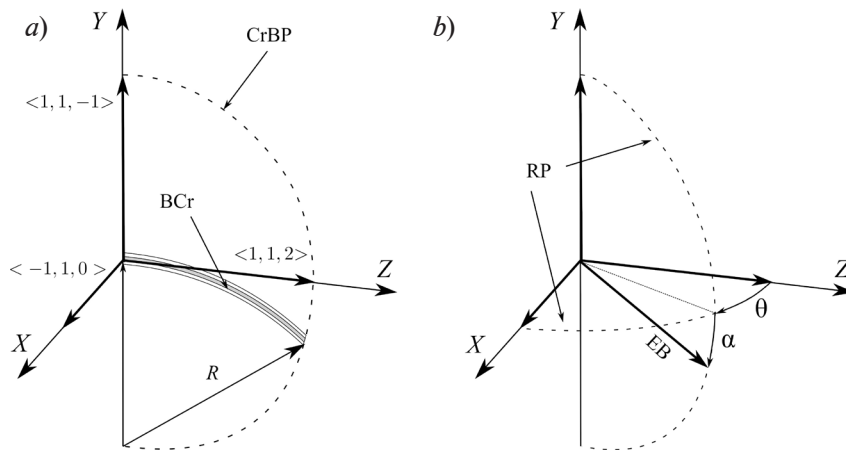


Рис. 1. Ориентации осей изогнутого кристалла (BCr) (a) и направления электронного пучка (EB) (b), использованные в экспериментах и при моделировании: CrBP, RP – плоскости изгиба кристалла и вращения EB, соответственно; R – радиус вторичного изгиба кристалла; α , θ – углы поворота EB относительно плоскости (111) и от оси (112) для получения плоскости (111), соответственно

каналирование электронов, а также их объемное отражение от изогнутых плоскостей кристалла (при наиболее четко выраженном эффекте) [18]. Примеры полученных результатов представлены в иллюстрациях. Значения использованных при этом параметров сведены в таблицу.

Для определения статистических ошибок угловых распределений и излучения использовался следующий метод. Погрешность в определении угла вылета для угловых распределений и энергии гамма-квантов излучения равна соответственно шагу по углу и по энергии на графиках. Статистическая погрешность Δn_i для угловых распределений и излучения определялась по формуле

$$\Delta n_i = t_\alpha [n_i(1 - n_i)N]^{1/2}, \quad (3)$$

где N – число частиц; n_i – относительная доля частиц в i -м бине N_i , $n_i = N_i/N$; t_α – коэффициент Стьюдента, соответствующий вероятности α .

Таблица

Экспериментальные [11, 17, 38] и расчетные значения использованных параметров для двух монокристаллов

Монокристалл	Радиус изгиба кристалла R, мм	
	Эксперимент	Расчет
Германий	–	10,5
	–	12,5
	18,3	18,3
Кремний	13,9	
	20,0	
	27,3	
	47,6	

Электронный пучок был сориентирован вдоль оси $\langle 112 \rangle$, а кристалл поворачивали на угол $\theta = 95$ мрад вокруг оси $\langle 11\bar{1} \rangle$ при угле $\alpha = 0$ (см. рис. 1).

Для построения углового распределения использовалось от 40 до 150 тыс. траекторий; для определения спектра излучения – свыше 10 тыс. Экспериментальные данные определяли методом оцифровки графических данных из работ [11, 17]. Значения статистических ошибок для экспериментальных данных углового распределения имели порядок величины толщины линии, поэтому для них статистические ошибки не указаны. Для опубликованных экспериментальных данных по излучению статистические ошибки авторами не были указаны.

Результаты моделирования и их обсуждение

Геометрия кристаллов. Образцы, использованные в экспериментах [38], представляли собой тонкие монокристаллические пластинки кремния или германия толщиной 15 мкм; кристаллическая ось (112) образца была направлена перпендикулярно плоскости пластинки (см. рис. 1, *a*). Для получения изгиба монокристаллическую пластинку вставляли в держатель (разработан специально для этого (см. работу [38])), который обеспечивал равномерный изгиб и позволял варьировать величину радиуса изгиба кристалла в процессе эксперимента. Для достижения малого радиуса изгиба был использован специальный метод: плоскости монокристалла сами сильно изгибались вследствие квазимозаичного эффекта в результате небольшого первичного изгиба в другой плоскости [42].

Электронный пучок направлялся в область, где первичный изгиб кристалла был наименьшим. Направление кристаллических осей и однородность изгиба контролировались перед проведением экспериментов с помощью высокоточной рентгеновской дифракции. В экспериментальной установке держатель с кристаллом размещался в гониометре с тремя степенями свободы и ориентировался таким образом, чтобы каналирование электронов происходило в плоскости (111) [11] (см. рис. 1).

Относительная ориентация используемой плоскости изгиба кристалла (CrVP) и кристаллических осей показана на рис. 1, *a*, где R – радиус вторичного изгиба кристалла, параметр, который использовался и в эксперименте, и при моделировании. На рис. 1, *b* представлена ориентация кристаллических осей относительно направления падения пучка, где θ – угол поворота пучка электронов от оси (112), для получения плоскости (111), а α – угол поворота относительно плоскости (111).

В настоящей работе смоделированы процессы распространения высокоэнергетических электронов в кристаллах кремния и германия, для которых получены экспериментальные данные. Монокристаллы этих элементов обладают одинаковой кубической решеткой, однако существенно различаются зарядами ядер. При распространении электронов в кристалле минимум потенциальной ямы расположен вдоль кристаллических плоскостей атомов в решетке. В результате этого каналирующие электроны рассеиваются значительно сильнее, по сравнению с неканалирующими.

Толщина кристаллов соизмерима с длиной деканалирования для электронов, составляющей примерно 5 – 18 мкм [2]. Это позволяет выделить эффекты, связанные с каналированием отрицательно заряженных частиц, на фоне деканалировавших частиц. В самом деле, изгиб кристаллов позволяет в угловом распределении разделить пик электронов, захваченных в режим каналирования от надбарьерных электронов, которые имеют поперечную кинетическую энергию выше барьера усредненного потенциала. Кроме того, изгиб позволяет наблюдать эффект объемного отражения в угловом распределении электронов. Изменение радиуса изгиба кристаллов позволит проверить динамику изменения в угловом распределении электронов в зависимости от изгиба кристалла, а также в зависимости от зарядового числа атома.

Основной пик в угловом распределении электронов содержит надбарьерные деканалировавшие электроны, а также электроны, отраженные от изогнутых кристаллических плоскостей в результате эффекта объемного отражения. Второй пик в угловом распределении формируется электронами, находящимися в режиме каналирования при выходе из кристалла.

Излучение электронов в кристаллах кремния и германия было промоделировано для различных радиусов изгиба в ориентации кристаллов для двух случаев: каналирование электронов, а также их объемное отражение от изогнутых плоскостей кристалла (при наиболее четко выраженном эффекте).

Для моделирования траекторий электронов, использованных при построении углового распределения, мы применяли потенциалы Мольера и Пасиоса.

Учитывая вывод, сделанный в работе [2], о преимуществе потенциала Пасиоса над потенциалом Мольера для описания интенсивности излучения при каналировании в монокристаллах кремния, мы использовали для расчета излучения траектории, полученные расчетным путем с помощью потенциала Пасиоса.

Угловое распределение электронов в изогнутых кристаллах кремния и германия. Сначала рассмотрим прохождение электронов в *режиме каналирования*. Угловое распределение электронов, прошедших вдоль канала через изогнутые монокристаллы кремния и германия, показано на рис. 2. Эти данные приведены в одинаковом масштабе, чтобы наглядно продемонстрировать разницу между объектами, состоящими из атомов разной природы и с различными зарядами ядра.

Основной пик в угловом распределении электронов в монокристалле кремния выше и более острый, чем в монокристалле германия. Это связано с тем, что электроны рассеиваются сильнее на атомах германия, обладающего бóльшим зарядом ядра. В результате рассеяния меньшая доля электронов остается в режиме каналирования при движении до конца монокристалла, на что указывает высота второго пика.

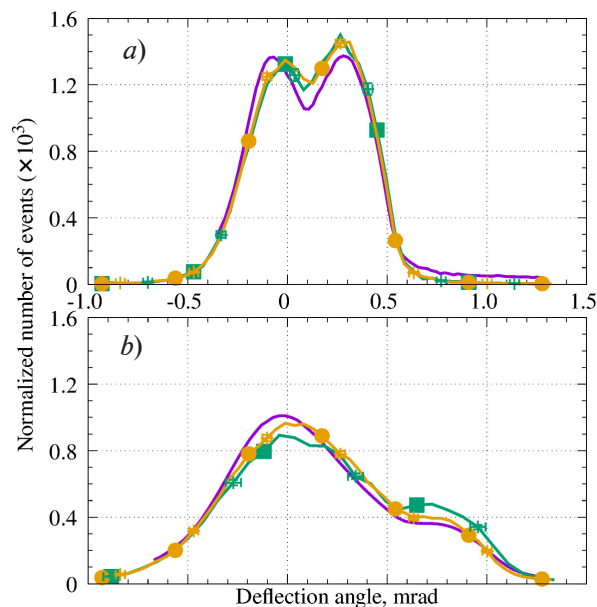


Рис. 2. Вычисленные (символы, соединенные линиями) и измеренные (линии) угловые распределения [11] электронов с энергией 855 МэВ, прошедших через изогнутые монокристаллы Si (a) и Ge (b), использованные как мишени.

Моделирование проведено с использованием потенциалов Мольера и Пасиоса (кривые с квадратами и кружками соответственно);

$R = 47,6$ мм (a) и $18,3$ мм (b) (см. рис. 1 и табл.)

На рис. 2 также представлены результаты моделирования с применением потенциалов Мольера и Пасиоса, которые использовали для расчета траекторий электронов. Для монокристалла кремния разница в распределениях, полученных с помощью этих потенциалов, не выходит за границы статистической погрешности, тогда как для монокристалла германия наблюдается заметное различие результатов. Анализ полученных данных позволяет заключить, что применение потенциала Пасиоса приводит к лучшему согласию с экспериментом.

Отметим, что графики, отражающие результаты моделирования, нормированы на единицу на всем угловом интервале. Так, в диапазоне от $-0,38$ до $1,40$ мрад, в котором находятся основные данные, мы вычисляли площадь под полученной кривой моделирования (см. рис. 2). При этом экспериментальные данные нормировались так, чтобы площади

под кривыми экспериментальных измерений совпадали с соответствующими площадями под расчетными кривыми. Каждое рассчитанное угловое распределение нормировалось аналогичным образом, поскольку экспериментальные данные не охватывают все возможные углы отклонения. Кроме того, следует отметить, что для монокристалла кремния второй пик в угловых распределениях, обусловленный электронами, которые находятся в режиме каналирования, расположен ближе к основному максимуму и имеет большую площадь, чем у соответствующих кривых для кристалла германия.

На рис. 3 представлено сравнение результатов серии расчетов угловых распределений электронов, проведенных при различных значениях радиуса изгиба монокристалла кремния, с экспериментальными данными. С увеличением радиуса изгиба второй пик на указанных распределениях постепенно сдвигается в область больших углов отклонения и его амплитуда плавно снижается, что соответствует экспериментальным данным.

Различия угловых распределений электронов для кремния и германия с близкими значениями радиусов изгиба монокристалла видны при сравнении результатов, представленных на рис. 2 и 3. Так, значения радиусов изгиба в 18,3 и 20,0 мм для монокристаллов германия и кремния (соответственно) близки, и соответствующие вторые пики на кривых угловых распределений возникают при близких значениях углов отклонения электронов. Однако форма кривых углового распределения существенно различна вследствие более сильного рассеяния электронов на атомах германия, по сравнению с таковым на атомах кремния. Позиции и амплитуды вторых пиков на угловых распределениях электронов хорошо совпадают с полученными на эксперименте (см. рис. 3).

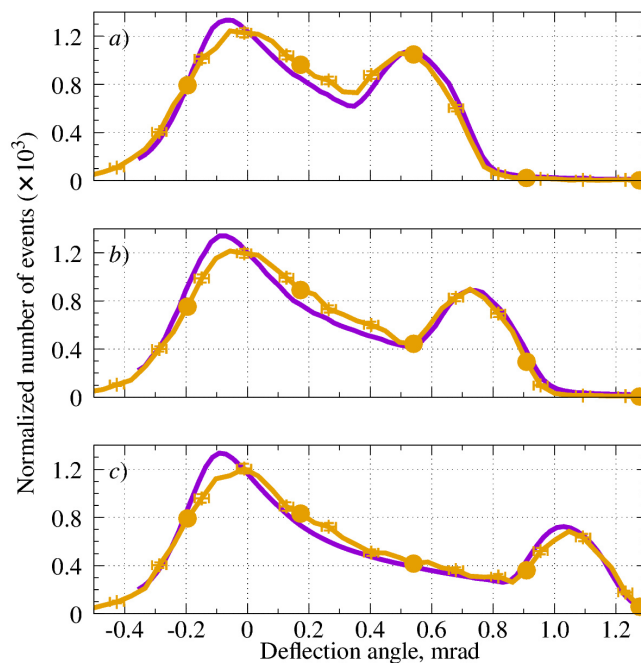


Рис. 3. Вычисленные (символы, соединенные линиями) и измеренные (линии) угловые распределения электронов с энергией 855 МэВ после взаимодействия с изогнутым кристаллом Si. R , мм: 27,3 (a), 20,0 (b) и 13,9 (c) (см. рис. 1 и табл.); использован потенциал Пасиуса

Основные пики на кривых распределений, обусловленные электронами, совершающими надбарьерное движение, совпадают для разных радиусов изгиба кристалла (в пределах статистической погрешности). Однако в вершинах этих пиков наблюдается некоторое систематическое отклонение числа электронов, полученных при моделировании, от экспериментальных данных. Следует также отметить, что максимум пиков для экспериментальных данных расположен при значении угла отклонения $-0,08$ мрад.

Кроме того, кривые, относящиеся к результатам моделирования и расположенные между двумя пиками, пролегают немного выше соответствующих кривых, относящихся к экспериментальным данным. Это означает, что при моделировании процесса каналирования доля электронов, переходящих в надбарьерное движение в результате деканалирования, превышает долю, полученную в эксперименте.

На рис. 4 приведены угловые распределения электронов после их прохождения через монокристаллы германия с разными значениями радиуса изгиба. Экспериментальные данные получены только для радиуса изгиба 18,3 мм. В целом можно утверждать, что смоделированная зависимость хорошо описывает экспериментальные данные. При уменьшении радиуса изгиба монокристалла высота максимума второго пика на угловых распределениях, соответствующего каналирующим электронам, снижается и, смещаясь в область больших углов, пик становится все менее выраженным.

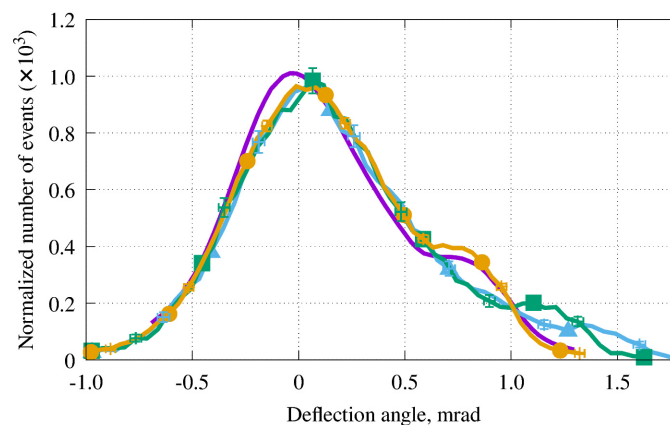


Рис. 4. Сравнение вычисленных (символы, соединенные линиями) и измеренных (линии) угловых распределений электронов с энергией 855 МэВ после взаимодействия с изогнутым кристаллом Ge. R , мм: 18,3 (линии и кружки), 10,5 (треугольники) и 12,5 (квадратики) (см. рис. 1 и табл.); использован потенциал Пасиуса

Основной пик углового распределения электронов совпадает для разных радиусов изгиба кристалла, что ожидаемо и соответствует теории. На рис. 4 хорошо видно упомянутое выше отличие результатов моделирования от экспериментальных данных, которое состоит в разных направлениях смещения позиции основного пика распределения электронов: при моделировании наблюдается смещение в область положительного значения угла отклонения, тогда как на эксперименте основной пик смещается в область отрицательных значений углов. Кроме того, в области кривых между двумя пиками теоретические значения несколько превышают экспериментальные. Характер различий между результатами моделирования и эксперимента для монокристаллов германия и кремния сохраняется для различных радиусов изгиба.

Теперь рассмотрим поведение электронов в *режиме объемного отражения от изогнутых плоскостей монокристалла* (при наиболее четко выраженном эффекте).

На рис. 5 приведено сравнение между результатами моделирования угловых распределений электронов (использован пакет прикладных программ MBN Explorer) и экспериментальными данными для случая объемного отражения в изогнутых монокристаллах кремния и германия. Смоделированная зависимость была рассчитана при значениях $\alpha = 0,45$ мрад, $\theta = 95$ мрад и радиусе изгиба 47,6 мм, чтобы соответствовать условиям эксперимента. Моделирование проведено с использованием потенциалов Пасиуса и Мольера.

Для монокристалла кремния результаты моделирования с применением двух указанных потенциалов совпадают очень хорошо. Для германия наблюдается различие в области максимума пика объемного отражения. Положение максимума смещено в область большего отклонения. Позиция, высота и ширина второго максимума в распределении

электронов, попавших в режим каналирования после объемного захвата, довольно хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Далее ведется обсуждение результатов вычислений с использованием потенциала Па-сиоса.

Угловые распределения электронов в кристаллах кремния и германия различаются по высоте и ширине пиков объемного отражения, что вызвано более сильным рассеянием электронов на атомах германия. Позиция второго пика на распределении, сформированном электронами в режиме каналирования после объемного захвата, совпадает с соответствующими экспериментальными данными для обоих элементов, однако высота этого пика у кремния заметно выше по абсолютной величине, тогда как у германия различие небольшое.

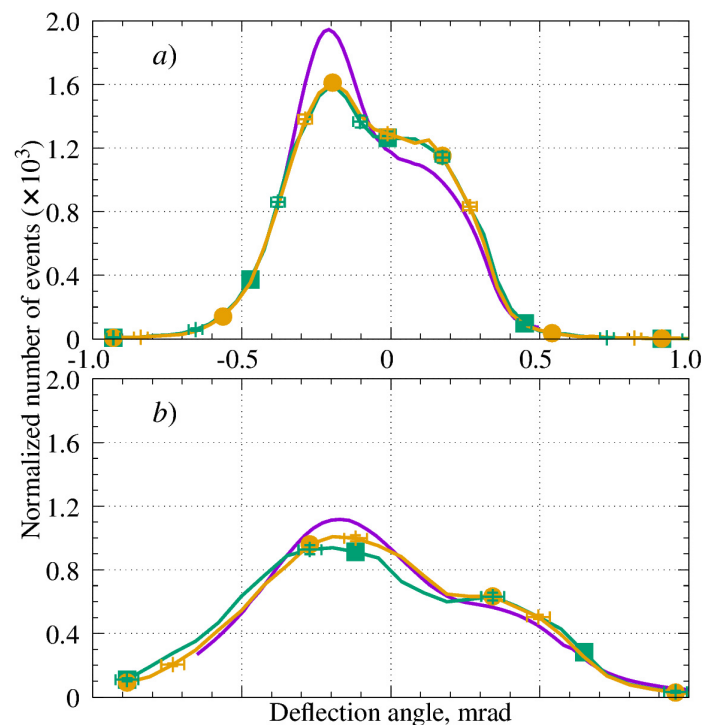


Рис. 5. Вычисленные (символы, соединенные линиями) и измеренные (линии) угловые распределения электронов с энергией 855 МэВ после взаимодействия с изогнутыми кристаллами Si ($R = 47,6$ мм) (a) и Ge ($R = 18,3$ мм) (b).

Расчет выполнен с использованием потенциалов атомов Пасиоса и Мольера (кривые с квадратами и кружками соответственно) при $\alpha = 0,45$ мрад, $\theta = 95$ мрад

Высота пиков, относящихся к объемному отражению, на кривых углового распределения электронов для обоих элементов ниже, чем на эксперименте, однако их положения совпадают. Для монокристалла кремния на графике углового распределения наблюдается суперпозиция основных и сопутствующих пиков углового распределения.

Спектры излучения при каналировании в изогнутых монокристаллах кремния и германия

Спектральное распределение интенсивности излучения рассчитывалось при распространении электронов в кристаллах кремния и германия в режиме каналирования. Для расчета интенсивности излучения в режиме каналирования использовали полученные ранее траектории электронов при определении углового распределения электронов (см. раздел «Угловое распределение электронов в изогнутых кристаллах кремния и германия», режим каналирования).

С целью удобства анализа и сравнения графиков излучения применялось нормирование данных, при котором спектральные значения умножались на энергию фотонов. В таком представлении тормозное излучение по формуле Бете – Гайтлера приобретает вид горизонтальной прямой, а отклонения от нее указывают либо на усиление, либо на ослабление этого излучения. Поскольку интенсивность излучения зависит от заряда ядер атомов монокристалла, в случае германия интенсивность выше, чем в случае кремния.

На рис. 6, *a – c* приведены спектры излучения электронов для режима каналирования при различных значениях радиуса изгиба монокристалла кремния. По вертикальным осям отложены значения интенсивности излучения в безразмерных единицах $E(dN/dE)$, где E – энергия гамма-кванта, dN – число квантов гамма-излучения в интервале энергии dE . Экспериментальные данные взяты из работы [17].

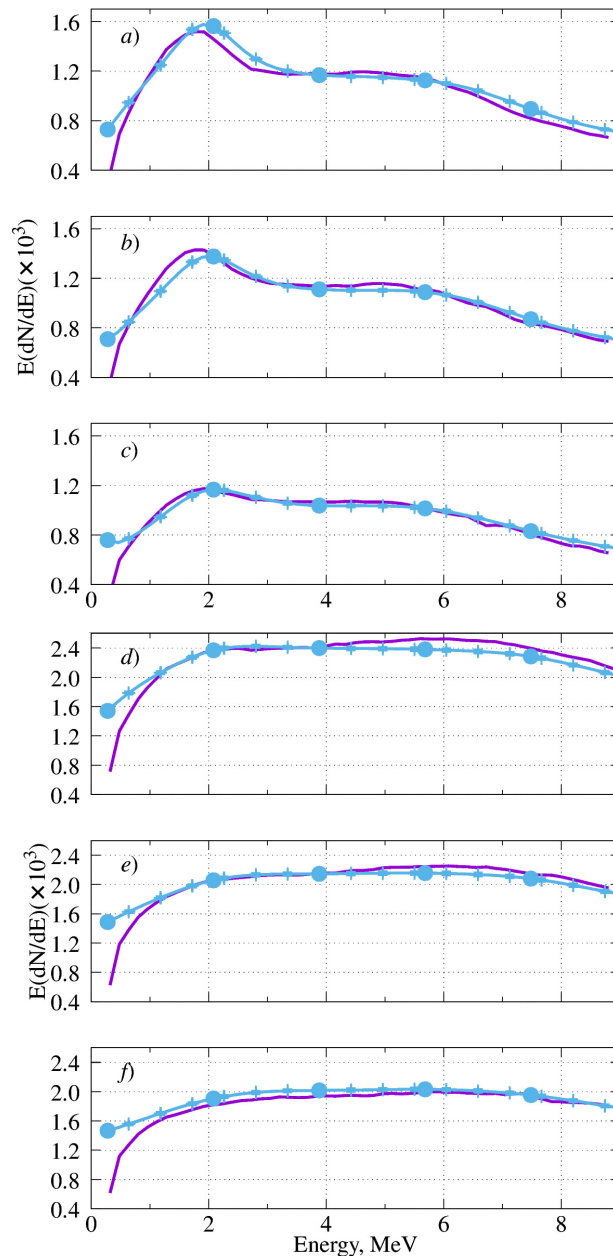


Рис. 6. Вычисленные (символы, соединенные линиями) и экспериментальные [17] (линии) спектры излучения, испускаемого электронными пучками с исходной энергией 855 МэВ, после взаимодействий с изогнутыми кристаллами Si (*a – c*) и Ge (*d – f*) под углами $\theta = 95$ град и $\alpha = 0$; R , мм: 27,3 (*a*), 20,0 (*b*), 13,9 (*c*), 18,3 (*d*), 12,5 (*e*), 10,5 (*f*) (см. табл.).

Моделирование выполнено с использованием потенциала Пасиоса

При уменьшении радиуса изгиба бóльшая часть электронов находится в режиме надбарьерного движения и, соответственно, интенсивность излучения ниже. Важно отметить, что результаты моделирования повторяют все характерные особенности экспериментальных данных. Однако заметим, что в низкоэнергетической области спектра экспериментальные данные отсекаются, поэтому ниже энергии в 1 МэВ сравнение с результатами моделирования было невозможным.

На рис. 6, *d – f* показаны спектры излучения из монокристалла германия с различными значениями радиуса изгиба для режима каналирования. Ввиду большей величины заряда ядра германия, интенсивность этого излучения выше, чем соответствующая интенсивность для кремния. Помимо этого, изменения интенсивности излучения в зависимости от энергии фотона в случае кристалла германия менее выражены, по сравнению с кристаллом кремния.

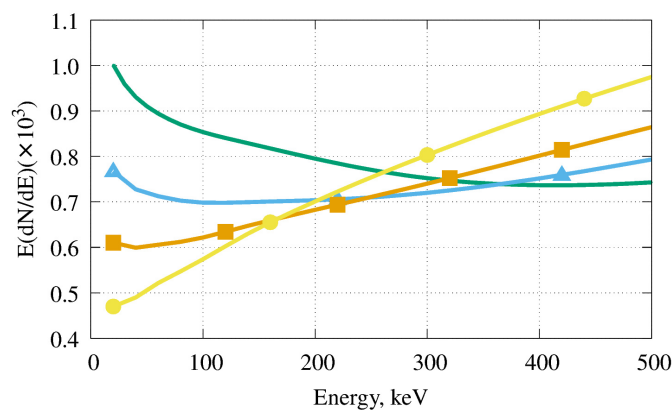


Рис. 7. Расчетные низкоэнергетические части спектров излучения для изогнутого кристалла Si (см. рис. 6, *a – c*) для тех же радиусов изгиба, т. е. R , мм: 27,3 (квадраты), 20,0 (треугольники), 13,9 (линия без символов), а также $R = 47,6$ мм (кружки)

Особенности низкоэнергетической части спектра (интервал 20 – 500 кэВ) для кремния представлены на рис. 7. Видно, что здесь имеет место рост интенсивности излучения при уменьшении радиуса изгиба кристалла. Это происходит в результате эффекта синхротронного излучения, обусловленного поворотом траектории электронов изогнутым кристаллом. При самом малом радиусе изгиба монокристалла (13,9 мм) траектория искривляется сильнее и наблюдается более интенсивное излучение. Полученный результат можно рассматривать в качестве прогноза, ввиду отсутствия соответствующих экспериментальных данных.

Полученные результаты моделирования показывают, что интенсивность излучения зависит от радиуса изгиба монокристалла и от заряда ядер его атомов.

Заключение

Проведено моделирование процесса прохождения электронов через тонкие изогнутые монокристаллы кремния и германия в рамках атомистического подхода, который основан на релятивистской молекулярной динамике в рамках классической релятивистской физики и рассчитаны параметры их излучения. Вычисления выполнены с помощью пакета прикладных программ MBN Explorer.

Результаты моделирования для углового распределения электронов в целом хорошо описывают экспериментальные данные. Некоторое отличие наблюдается в высоте основного пика углового распределения при анализе эффекта объемного отражения. Для обоих элементов вторые максимумы углового распределения электронов имеют хорошее согласие с экспериментальными данными при различных радиусах изгиба кристалла как по положению наблюдаемых пиков, так и по их высоте.

Возможной причиной отклонения расчетных угловых распределений от экспериментальных данных является неидеальность кривизны кристаллических плоскостей [43],



которая увеличивается с ростом поперечной ширины пучка. Другой причиной могут быть квантовые эффекты, которые не учитывались в рамках используемого атомистического подхода [44, 45].

Результаты моделирования спектров излучения очень хорошо совпадают с экспериментальными данными для различных радиусов изгиба кристаллов и обоих кристаллических материалов. На теоретических кривых для кремния в низкоэнергетической части наблюдается изменение интенсивности излучения для различных радиусов изгиба кристалла, обусловленное, вероятно, радиационным излучением, возникающим в результате поворота электронов изогнутыми кристаллическими плоскостями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lindhard J. Influence of crystal lattice on motion of energetic charged particles // *Matematisk-Fysiske Meddelelser udgivet af Det Konglige Danske Videnskabernes Selskab*. 1965. Vol. 34. No. 14. Pp. 1–64.
2. Korol A. V., Solov'yov A. V., Greiner W. Channeling and radiation in periodically bent crystals. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 240 p.
3. Kumakhov M. A. On the theory of electromagnetic radiation of charged particles in a crystal // *Physics Letters A*. 1976. Vol. 57. No. 1. Pp. 17–18.
4. Базылев В. А., Жеваго Н. К. Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. М.: Наука, 1987. 267 с.
5. Sáenz A. W., Überall H. Coherent radiation sources. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1985. 235 p.
6. Кумахов М. А., Комаров Ф. Ф. Излучение заряженных частиц в твердых телах. Минск: Университетское, 1985. 383 с.
7. Baryshevsky V. G., Tikhomirov V. V. Crystal undulators: from the prediction to the mature simulations // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. B. 2013. Vol. 309. 15 August. Pp. 30–36.
8. Sushko G. B., Bezchastnov V. G., Korol A. V., Greiner W., Solov'yov A. V., Polozkov R. G., Ivanov V. K. Simulations of electron channeling in bent silicon crystal // *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. Vol. 438. 14 June. P. 012019.
9. Polozkov R. G., Ivanov V. K., Sushko G. B., Korol A. V., Solov'yov A. V. Radiation emission by electrons channeling in bent silicon crystals // *European Physics Journal D*. 2014. Vol. 68. No. 9. P. 268.
10. Sushko G. B., Korol A. V., Solov'yov A. V. Multi-GeV electron and positron channeling in bent silicon crystals // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2015. Vol. 355. 15 July. Pp. 39–43.
11. Sytov A. I., Bandiera L., De Salvador D., et al. Steering of sub-GeV electrons by ultrashort Si and Ge bent crystals // *European Physics Journal C*. 2017. Vol. 77. No. 12. P. 901.
12. Korol A. V., Bezchastnov V. G., Sushko G. B., Solov'yov A. V. Simulation of channeling and radiation of 855 MeV electrons and positrons in a small-amplitude short-period bent crystal // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2016. Vol. 387. 15 November. Pp. 41–53.
13. Shen H., Zhao Q., Zhang F. S., Sushko G. B., Korol A. V., Solov'yov A. V. Channeling and radiation of 855 MeV electrons and positrons in straight and bent tungsten (110) crystals // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2018. Vol. 424. 1 June. Pp. 26–36.
14. Korol A. V., Bezchastnov V. G., Solov'yov A. V. Channeling and radiation of the 855 MeV electrons enhanced by the re-channeling in a periodically bent diamond crystal // *European Physics Journal D*. 2017. Vol. 71. No. 6. P. 174.
15. Павлов А. В., Король А. В., Иванов В. К., Соловьев А. В. Излучение позитронов и электронов с энергией 375 МэВ при каналировании в прямых и периодически изогнутых кристаллах алмаза // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2019. Т. 12. № 4. С. 108–118.
16. Pavlov A. V., Korol A. V., Ivanov V. K., Solov'yov A. V. Interplay and specific features of radiation mechanisms of electrons and positrons in crystalline undulators // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 2019. Vol. 52. No. 11. Pp. 11–16.

17. **Bandiera L., Sytov A., De Salvador D., et al.** Investigation on radiation generated by sub-GeV electrons in ultrashort silicon and germanium bent crystals // *European Physics Journal C*. 2021. Vol. 81. No. 4. P. 284.
18. **Haurylavets V. V., Leukovich A., Sytov A., Bandiera L., Mazzolari A., Romagnoni M., Guidi V., Sushko G. B., Korol A. V., Solov'yov A. V.** MBN explorer atomistic simulations of 855 MeV electron propagation and radiation emission in oriented silicon bent crystal: Theory versus experiment // *The European Physical Journal Plus*. 2022. Vol. 137. No. 1. P. 34.
19. **Bandiera L., Bagli E., Germogli G., et al.** Investigation of the electromagnetic radiation emitted by sub-GeV electrons in a bent crystal // *Physical Review Letters*. 2015. Vol. 115. No. 2. P. 025504.
20. **Mazzolari A., Bagli E., Bandiera L., et al.** Steering of a sub-GeV electron beam through planar channeling enhanced by rechanneling // *Physical Review Letters*. 2014. Vol. 112. No. 13. P. 135503.
21. **Wistisen T. N., Andersen K. K., Yilmaz S., Mikkelsen R., Hansen J. L., Uggerhøj U. I., Lauth W., Backe H.** Experimental realization of a new type of crystalline undulator // *Physical Review Letters*. 2014. Vol. 112. No. 25. P. 254801.
22. **Yabashi M., Tanaka H.** The next ten 2023s of X-ray science // *Nature Photonics*. 2017. Vol. 11. No. 1. Pp. 12–14.
23. **Backe H., Lauth W.** Channeling experiments with sub-GeV electrons in flat silicon single crystals // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2015. Vol. 355. 15 July. Pp. 24–29.
24. **Backe H., Lauth W.** Channeling experiments with electrons at the Mainz Microtron MAMI // 4th International Conference "Dynamics of Systems on the Nanoscale" (Bad Ems, Germany. October 3–7, 2016). Book of Abstracts. 2016. P. 58.
25. **Wistisen T. N., Uggerhøj U. I., Wienands U., et al.** Channeling, volume reflection, and volume capture study of electrons in a bent silicon crystal // *Physical Review Accelerators and Beams*. 2016. Vol. 19. No. 7. P. 071001.
26. **Bagli E., Bandiera L., Bellucci V., et al.** Experimental evidence of planar channeling in a periodically bent crystal // *The European Physical Journal C*. 2014. Vol. 74. No. 10. P. 3114.
27. **Wienands U., Markiewicz T. W., Nelson J., et al.** Observation of deflection of a beam of multi-GeV electrons by a thin crystal // *Physical Review Letters*. 2015. Vol. 114. No. 7. P. 074801.
28. **Uggerhøj U. I., Wistisen T. N.** Intense and energetic radiation from crystalline undulators // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2015. Vol. 355. 15 July. Pp. 35–38.
29. **Baranov V. T., Bellucci S., Biryukov V. M., et al.** Preliminary results on the study of radiation from positrons in a periodically deformed crystal // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2006. Vol. 252. No. 1. Pp. 32–35.
30. **Backe H., Krambrich D., Lauth W., et al.** Future aspects of X-ray emission from crystal undulators at channeling of positrons // *Il Nuovo Cimento C*. 2011. Vol. 34. No. 4. Pp. 175–180.
31. **Backe H., Kunz P., Lauth W., Rueda A.** Planar channeling experiments with electrons at the 855 MeV Mainz Microtron MAMI // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2008. Vol. 266. No. 17. Pp. 3835–3851.
32. **Backe H., Krambrich D., Lauth W., Lundsgaard J., Hansen J. L., Uggerhøj U. I.** X-ray emission from a crystal undulator – Experimental results at channeling of electrons // *Il Nuovo Cimento C*. 2011. Vol. 34. No. 4. Pp. 157–165.
33. **Backe H., Krambrich D., Lauth W., Andersen K. K., Hansen J. L., Uggerhøj U. I.** Channeling and radiation of electrons in silicon single crystals and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ crystalline undulators // *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. Vol. 438. 14 June. P. 012017.
34. **Solov'yov I. A., Yakubovich A. V., Nikolaev P. V., Volkovets I., Solov'yov A. V.** MesoBioNano explore – A universal program for multiscale computer simulations of complex molecular structure and dynamics // *Journal of Computational Chemistry*. 2012. Vol. 33. No. 30. Pp. 2412–2439.
35. **Sushko G. B., Bezchastnov V. G., Solov'yov I. A., Korol A. V., Greiner W., Solov'yov A. V.** Simulation of ultra-relativistic electrons and positrons channeling in crystals with MBN Explorer // *Journal of Computational Physics*. 2013. Vol. 252. 1 November. Pp. 404–418.
36. **Полозков Р. Г., Иванов В. К., Сушко Г. Б., Король А. В., Соловьев А. В.** Каналирование ультрарелятивистских позитронов в изогнутых кристаллах алмаза // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2015. № 2 (218). С. 167–178.
37. **Байер В. Н., Катков В. М., Страховенко В. М.** Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 396 с.

38. **De Salvador D., Carturan S., Mazzolari A., et al.** Innovative remotely-controlled bending device for thin silicon and germanium crystals // *Journal of Instrumentation*. 2018. Vol. 13. No. 4. P. C04006.
39. **Molière G.** Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen I: Einzelstreuung am abgeschirmten Coulomb-Feld // *Zeitschrift für Naturforschung A*. 1947. Vol. 2a. No. 3. Pp. 133–145.
40. **Pacios L. F.** Analytical density-dependent representation of Hartree – Fock atomic potentials // *Journal of Computational Chemistry*. 1993. Vol. 14. No. 4. Pp. 410–421.
41. **Camattari R., Guidi V., Bellucci V., Mazzolari A.** The 'quasi-mosaic' effect in crystals and its applications in modern physics // *Journal of Applied Crystallography*. 2015. Vol. 48. Part 4. Pp. 977–989.
42. **Иванов Ю. М., Петрунин А. А., Скоробогатов В. В.** Наблюдение эффекта упругой квази-мозаичности в изогнутых монокристаллах кремния // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2005. Т. 81. № 3. С. 129–132.
43. **Sushko G. B., Korol A. V., Solov'yov A. V.** Ultra-relativistic electron beams deflection by quasi-mosaic crystals arxiv.org/abs/2110.12959. Accessed October 12, 2022.
44. **Artru X.** Quantum versus classical approach of dechanneling and incoherent electromagnetic processes in aligned crystals (draft) // *Journal of Instrumentation*. 2020. Vol. 15. April 3. P. C04010.
45. **Tikhomirov V. V.** Relativistic particle incoherent scattering in oriented crystals arxiv.org/abs/2004.06020. Accessed October 12, 2022.

REFERENCES

1. **Lindhard J.**, Influence of crystal lattice on motion of energetic charged particles, *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* 34 (14) (1965) 1–34.
2. **Korol A. V., Solov'yov A. V., Greiner W.**, Channeling and radiation in periodically bent crystals. 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
3. **Kumakhov M. A.**, On the theory of electromagnetic radiation of charged particles in a crystal, *Phys. Lett. A*. 57 (1) (1976) 17–18.
4. **Bazylev V. A., Zhevago N. K.**, *Izlucheniye bystrykh chastits v veshchestve i vo vneshnikh polyakh* [Emission from fast particles in matter and in external fields], Nauka Publishing, Moscow, 1987 (in Russian).
5. **Sáenz A. W., Überall H.**, Coherent radiation sources, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1985.
6. **Kumakhov M. A., Komarov F. F.**, Radiation from charged particles in solids, American Institute of Physics, New York, 1989.
7. **Baryshevsky V. G., Tikhomirov V. V.**, Crystal undulators: from the prediction to the mature simulations, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B*. 309 (15 August) (2013) 30–36.
8. **Sushko G. B., Bezchastnov V. G., Korol A. V., et al.**, Simulations of electron channeling in bent silicon crystal, *J. Phys. Conf. Ser.* 438 (14 June) (2013) 012019.
9. **Polozkov R. G., Ivanov V. K., Sushko G. B., et al.**, Radiation emission by electrons channeling in bent silicon crystals, *Eur. Phys. J. D*. 68 (9) (2014) 268.
10. **Sushko G. B., Korol A. V., Solov'yov A. V.**, Multi-GeV electron and positron channeling in bent silicon crystals, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B*. 355 (15 July) (2015) 39–43.
11. **Sytov A. I., Bandiera L., De Salvador D., et al.**, Steering of sub-GeV electrons by ultrashort Si and Ge bent crystals, *Eur. Phys. J. C*. 77 (12) (2017) 901.
12. **Korol A. V., Bezchastnov V. G., Sushko G. B., Solov'yov A. V.**, Simulation of channeling and radiation of 855 MeV electrons and positrons in a small-amplitude short-period bent crystal, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B*. 387 (15 November) (2016) 41–53.
13. **Shen H., Zhao Q., Zhang F. S., et al.**, Channeling and radiation of 855 MeV electrons and positrons in straight and bent tungsten (110) crystals, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B*. 2018. Vol. 424 (1 June) (2018) 26–36.
14. **Korol A. V., Bezchastnov V. G., Solov'yov A. V.**, Channeling and radiation of the 855 MeV electrons enhanced by the re-channeling in a periodically bent diamond crystal, *Eur. Phys. J. D*. 71 (6) (2017) 174.
15. **Pavlov A. V., Ivanov V. K., Korol A. V., Solov'yov A. V.**, Radiation of 375 MeV electrons and positrons during channeling in straight and periodically bent diamond crystals, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 12 (4) (2019) 108–118.

16. **Pavlov A. V., Korol A. V., Ivanov V. K., Solov'yov A. V.**, Interplay and specific features of radiation mechanisms of electrons and positrons in crystalline undulators, *J. Phys. B.* 52 (11) (2019) 11–16.
17. **Bandiera L., Sytov A., De Salvador D., et al.**, Investigation on radiation generated by sub-GeV electrons in ultrashort silicon and germanium bent crystals, *Eur. Phys. J. C.* 81 (4) (2021) 284.
18. **Haurylavets V. V., Leukovich A., Sytov A., et al.**, MBN explorer atomistic simulations of 855 MeV electron propagation and radiation emission in oriented silicon bent crystal: Theory versus experiment, *Eur. Phys. J. Plus.* 137 (1) (2022) 34.
19. **Bandiera L., Bagli E., Germogli G., et al.**, Investigation of the electromagnetic radiation emitted by sub-GeV electrons in a bent crystal, *Phys. Rev. Lett.* 115 (2) (2015) 025504.
20. **Mazzolari A., Bagli E., Bandiera L., et al.**, Steering of a sub-GeV electron beam through planar channeling enhanced by rechanneling, *Phys. Rev. Lett.* 112 (13) (2014) 135503.
21. **Wistisen T. N., Andersen K. K., Yilmaz S., et al.**, Experimental realization of a new type of crystalline undulator, *Phys. Rev. Lett.* 112 (25) (2014) 254801.
21. **Wistisen T. N., Andersen K. K., Yilmaz S., et al.**, Experimental realization of a new type of crystalline undulator, *Phys. Rev. Lett.* 112 (25) (2014) 254801.
22. **Yabashi M., Tanaka H.**, The next ten 2023s of X-ray science, *Nat. Photonics.* 11 (1) (2017) 12–14.
23. **Backe H., Lauth W.**, Channeling experiments with sub-GeV electrons in flat silicon single crystals, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B.* 355 (15 July) (2015) 24–29.
24. **Backe H., Lauth W.**, Channeling experiments with electrons at the Mainz Microtron MAMI, In book: *The 4th Intern. Conf. "Dynamics of Systems on the Nanoscale"* (Bad Ems, Germany, Oct. 3–7, 2016), *Book of Abstracts* (2016) 58.
25. **Wistisen T. N., Uggerhøj U. I., Wienands U., et al.**, Channeling, volume reflection, and volume capture study of electrons in a bent silicon crystal, *Phys. Rev. Acc. Beams.* 19 (7) (2016) 071001.
26. **Bagli E., Bandiera L., Bellucci V., et al.**, Experimental evidence of planar channeling in a periodically bent crystal, *Europ. Phys. J. C.* 74 (10) (2014) 3114.
27. **Wienands U., Markiewicz T.W., Nelson J., et al.**, Observation of deflection of a beam of multi-GeV electrons by a thin crystal, *Phys. Rev. Lett.* 114 (7) (2015) 074801.
28. **Uggerhøj U. I., Wistisen T. N.**, Intense and energetic radiation from crystalline undulators, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B.* 355 (15 July) (2015) 35–38.
29. **Baranov V. T., Bellucci S., Biryukov V. M., et al.**, Preliminary results on the study of radiation from positrons in a periodically deformed crystal, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B.* 252 (1) (2006) 32–35.
30. **Backe H., Krambrich D., Lauth W., et al.**, Future aspects of X-ray emission from crystal undulators at channeling of positrons, *Il Nuovo Cimento C.* 34 (4) (2011) 175–180.
31. **Backe H., Kunz P., Lauth W., Rueda A.**, Planar channeling experiments with electrons at the 855 MeV Mainz Microtron MAMI, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B.* 266 (17) (2008) 3835–3851.
32. **Backe H., Krambrich D., Lauth W., et al.**, X-ray emission from a crystal undulator – Experimental results at channeling of electrons, *Il Nuovo Cimento C.* 34 (4) (2011) 157–165.
33. **Backe H., Krambrich D., Lauth W., et al.**, Channeling and radiation of electrons in silicon single crystals and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ crystalline undulators, *J. Phys. Conf. Ser.* 438 (14 June) (2013) 012017.
34. **Solov'yov I. A., Yakubovich A. V., Nikolaev P. V., et al.**, MesoBioNano explore – A universal program for multiscale computer simulations of complex molecular structure and dynamics, *J. Comput. Chem.* 33 (30) (2012) 2412–2439.
35. **Sushko G. B., Bezchastnov V. G., Solov'yov I. A., et al.**, Simulation of ultra-relativistic electrons and positrons channeling in crystals with MBN Explorer, *J. Comput. Phys.* 252 (1 November) (2013) 404–418.
36. **Polozkov R. G., Ivanov V. K., Sushko G. B., et al.**, Channeling of ultrarelativistic positrons in bent diamond crystals, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* (2 (218)) (2015) 167–178.
37. **Baier V. N., Katkov V. M., Strakhovenko V. M.**, *Electromagnetic processes at high energies in oriented single crystals*, World Scientific, Singapore, 1998.
38. **De Salvador D., Carturan S., Mazzolari A., et al.**, Innovative remotely-controlled bending device for thin silicon and germanium crystals, *J. Instrum.* 13 (4) (2018) C04006.

39. **Molière G.**, Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen I: Einzelstreuung am abgeschirmten Coulomb-Feld, *Z. Naturforsch. A.* 2a (3) (1947) 133–145.
40. **Pacios L. F.**, Analytical density-dependent representation of Hartree – Fock atomic potentials, *J. Comput. Chem.* 14 (4) (1993) 410–421.
41. **Camattari R., Guidi V., Bellucci V., Mazzolari A.**, The 'quasi-mosaic' effect in crystals and its applications in modern physics, *J. Appl. Crystallogr.* 48 (4) (2015) 977–989.
42. **Ivanov Yu. M., Petrunin A. A., Skorobogatov V. V.**, Observation of the elastic quasi-mosaicity effect in bent silicon single crystals, *JETP Lett.* 81 (3) (2005) 99–101.
43. **Sushko G. B., Korol A. V., Solov'yov A. V.**, Ultra-relativistic electron beams deflection by quasi-mosaic crystals arxiv.org/abs/2110.12959. Accessed Oct. 12, 2022.
44. **Artru X.**, Quantum versus classical approach of dechanneling and incoherent electromagnetic processes in aligned crystals (draft), *J. Instrum.* 15 (April 3) (2020) C04010.
45. **Tikhomirov V. V.**, Relativistic particle incoherent scattering in oriented crystals arxiv.org/abs/2004.06020. Accessed Oct. 12, 2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАВРИЛОВЕЦ Виктор Васильевич — научный сотрудник отраслевой лаборатории радиационной безопасности Института ядерных проблем Белорусского государственного университета, г. Минск, Беларусь.

220006, Беларусь, г. Минск, Бобруйская ул., 11
 bycel@tut.by
 ORCID: 0000-0002-9452-7465

КОРОЛЬ Андрей Владимирович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Научно-исследовательского центра мезобионаносистем (MBN), г. Франкфурт-на-Майне, Германия.

Altenhöferallee 3, Frankfurt am Main, 60438, Germany
 korol@mbnexplorer.com

СУШКО Геннадий Борисович — научный сотрудник Научно-исследовательского центра мезобионаносистем (MBN), г. Франкфурт-на-Майне, Германия.

Altenhöferallee 3, Frankfurt am Main, 60438, Germany
 sushko@mbnexplorer.com
 ORCID: 0000-0003-3591-7276

ИВАНОВ Вадим Константинович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 ivanov@physics.spbstu.ru
 ORCID: 0000-0002-3584-4583

СОЛОВЬЕВ Андрей Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор, научный и исполнительный директор Научно-исследовательского центра мезобионаносистем (MBN), г. Франкфурт-на-Майне, Германия.

Altenhöferallee 3, Frankfurt am Main, 60438, Germany
 solovyov@mbnresearch.com
 ORCID: 0000-0003-1602-6144

THE AUTHORS

HAURYLAVETS Viktor V.

Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University

11 Bobruiskaya St., Minsk, 220006, Belarus

bycel@tut.by

ORCID: 0000-0002-9452-7465

KOROL Andrei V.

MBN Research Center at Frankfurt Innovation Center of Biotechnology

Altenhöferallee 3, 60438 Frankfurt am Main, Germany

korol@mbnexplorer.com

SUSHKO Gennady B.

MBN Research Center at Frankfurt Innovation Center of Biotechnology

Altenhöferallee 3, 60438 Frankfurt am Main, Germany

sushko@mbnexplorer.com

ORCID: 0000-0003-3591-7276

IVANOV Vadim K.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

ivanov@physics.spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-3584-4583

SOLOV'YOV Andrey V.

MBN Research Center at Frankfurt Innovation Center of Biotechnology

Altenhöferallee 3, 60438 Frankfurt am Main, Germany

solovyov@mbnresearch.com

ORCID: 0000-0003-1602-6144

*Статья поступила в редакцию 19.10.2022. Одобрена после рецензирования 13.01.2023.
Принята 13.01.2023.*

Received 19.10.2022. Approved after reviewing 13.01.2023. Accepted 13.01.2023.