

DOI: 10.18721/JPM.11213

УДК 538.911; 539.1.03

**КАНАЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ
В КРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА****К.Б. Агапьев¹, В.К. Иванов¹, А.В. Король², А.В. Соловьев²**¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;² Научно-исследовательский центр мезобионаносистем (MBN),
Франкфурт-на-Майне, Германия

В работе представлены результаты численного моделирования процессов каналирования ультрарелятивистских электронов и позитронов с энергией 270 МэВ в кристаллах алмаза. С помощью пакета прикладных программ MBN Explorer были определены траектории заряженных частиц, падающих на кристалл длиной 20 мкм вдоль кристаллографической плоскости (110). Получены параметры каналирования и спектры излучения позитронов и электронов для случаев падения этих частиц на прямой и на периодически изогнутый кристаллы алмаза.

Ключевые слова: периодически искривленный кристалл алмаза; каналирование; ультрарелятивистская частица; излучение при каналировании

Ссылка при цитировании: Агапьев К.Б., Иванов В.К., Король А.В., Соловьев А.В. Каналирование ультрарелятивистских частиц в кристалле алмаза // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 139 – 150. DOI: 10.18721/JPM.11213

**CHANNELING OF ULTRARELATIVISTIC PARTICLES
IN A DIAMOND CRYSTAL****K.B. Agapev¹, V.K. Ivanov¹, A.V. Korol², A.V. Solov'yov²**¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;² MBN Research Center UG, Frankfurt am Main, Germany

The numerical simulation results on the channeling of ultrarelativistic electrons and positrons with the energy of 270 MeV in a diamond crystal are presented in the paper. Using the pack of applied codes MBN Explorer [1, 2], the trajectories of the charged particles have been determined for the particles' falling on the 20 μm-length crystal, along (110) crystallographic plane. The channeling parameters and radiation spectra of electrons and positrons were obtained computationally for the cases of the charged particles' incidence on a straight diamond crystal and a periodically bent one.

Key words: periodically bent diamond crystal; channeling; ultrarelativistic particle; channeling radiation

Citation: K.B. Agapev, V.K. Ivanov, A.V. Korol, A.V. Solov'yov, Channeling of ultrarelativistic particles in a diamond crystal, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 11 (2) (2018) 139 – 150. DOI: 10.18721/JPM.11213

Введение

Процессы взаимодействия заряженных частиц с веществом, в частности кристаллическим, уже многие годы исследуются экспериментаторами и теоретиками. Целью этих исследований является определение таких характеристик взаимодействия, как длина пробега частиц в веществе, их энергетические потери, спектры излучений и другие [2].

В последние годы большое внимание уделяется процессам каналирования в кристаллах, когда заряженные частицы, попадая в потенциальный «канал», определяемый электростатическими силами, распространяются вдоль кристаллографических плоскостей или осей. Такие частицы, захваченные в канал прямого кристалла, могут пробегать значительные расстояния, превышающие среднюю длину пробега в аморфной мишени, вследствие значительно меньшей потери энергии на своем пути [3]. Для электронов канал пролегает вдоль рядов атомов или ионных цепочек кристалла, в то время как для позитронов он располагается в пространстве между рядами атомов. Стабильность движения частиц вдоль каналов определяется малым значением энергии поперечного движения, по сравнению с величиной электростатического барьера.

Будучи захваченной в канал, частица испытывает осцилляции в плоскости, поперечной направлению распространения частицы, что приводит к излучению при ее каналировании [4]. Это излучение определяется поперечной энергией каналирующей частицы, и в зависимости от типа кристалла и его ориентации меняется его интенсивность. При этом осцилляционное излучение не когерентно и имеет широкий энергетический спектр [5 – 9].

Каналирование может также происходить в изогнутых кристаллах, которые часто используются для поворота пучков заряженных частиц, ускоренных до релятивистских энергий [10]. Перемещение частицы складывается из двух компонент: ее осцилляционное движение в канале и ее распространение вдоль средней линии искривленного канала. Стабильность по-

следней компоненты движения в таком искривленном канале достигается при дополнительном условии, а именно – радиус кривизны R должен значительно превышать критическую величину R_c , определяемую продольной энергией частицы [10]. 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 [11 – 18].

Исследование синхротронного излучения представляет несомненный интерес в связи с концепцией кристаллического ондулятора (см., например, работу [18] и ссылки в ней). 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 связи с идеей создания кристаллического ондулятора, в последние годы в ряде лабораторий проводятся эксперименты по измерению параметров каналирования и характеристик спектров излучения ультра-релятивистских позитронов [19 – 21] и электронов [22, 23] в прямых и изогнутых кристаллах кремния и алмаза. Теоретические работы по исследованию процессов каналирования в этих кристаллах проводятся с использованием недавно разработанного пакета прикладных программ MBN Explorer [1, 2]. Применимость этого пакета для описания процессов каналирования электронов и позитронов была проверена в расчетах для аморфного и кристаллического кремния [2, 24 – 26].

Поскольку в настоящее время проводятся эксперименты по измерению спектров излучения электронов в периодически изогнутом кристалле алмаза [27], представляет несомненный интерес теоретическая интерпретация экспериментальных результатов.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является теоретический анализ каналирования ультра-релятивистских элект-

тронов и позитронов с энергией 270 МэВ как в прямом, ориентированном вдоль кристаллографической плоскости (110) кристалле алмаза, так и в периодически изогнутом кристалле алмаза.

Моделирование процесса каналирования электронов и позитронов в прямых, изогнутых и периодически изогнутых каналах выполнялось нами с помощью универсального пакета вычислительных программ MBN Explorer [1, 2].

Метод расчета в рамках пакета MBN Explorer

Трехмерное моделирование прохождения ультрарелятивистских частиц через кристаллическую среду осуществляется с помощью алгоритма молекулярной динамики, реализованного в пакете вычислительных программ MBN Explorer [2]. Характеристики движения высокоэнергетических частиц внутри кристалла были получены путем интегрирования релятивистских уравнений движения. При построении траектории частицы производилось пошаговое динамическое моделирование кристаллической среды [2].

Для описания движения ультрарелятивистских частиц применимо квазиклассическое приближение, и, поскольку квантовые поправки малы, можно ограничиться уравнениями классической релятивистской механики:

$$\dot{\mathbf{p}} = q\mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ – внешнее электростатическое поле; q – заряд частицы, а \mathbf{p} – ее релятивистский импульс, определяемый обычным выражением:

$$\mathbf{p} = m\gamma\dot{\mathbf{r}} = m\gamma\mathbf{v},$$

где m , \mathbf{r} , \mathbf{v} – масса частицы, ее радиус-вектор и скорость, соответственно; γ – релятивистский фактор,

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \gg 1$$

(c – скорость света).

При интегрировании уравнения (1) используются начальные условия для координат налетающей частицы и ее скорости: $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}(0)$ и $\mathbf{v}_0 = \mathbf{v}(0)$.

В модуле MBN Explorer, связанном с каналированием, электростатическое поле вычисляется как

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla U(\mathbf{r}). \quad (2)$$

Здесь электростатический потенциал $U(\mathbf{r})$ представляет собой сумму атомных потенциалов U_{at} :

$$U(\mathbf{r}) = \sum_j U_{at}(\mathbf{p}_j), \quad (3)$$

где $\mathbf{p}_j = \mathbf{r} - \mathbf{R}_j$ (\mathbf{R}_j – радиус-вектор j -го атома, \mathbf{p} – координата в плоскости, перпендикулярной направлению движения).

Формально суммирование выполняется по всем атомам кристалла. Однако, если учитывать быстрое уменьшение $U_{at}(\mathbf{p}_j)$ с расстоянием, то можно ввести предельное расстояние ρ_{max} , дальше которого вклад атомного потенциала $U_{at}(\mathbf{p}_j)$ пренебрежимо мал. Поэтому для данной точки наблюдения \mathbf{r} сумма может быть ограничена теми атомами, которые расположены внутри сферы радиуса ρ_{max} . Для поиска таких атомов используется алгоритм связанных ячеек, реализованный в MBN Explorer, который подразумевает разбиение кристалла на ячейки и рассмотрение только ближайших к частице атомов. Описанная схема используется для расчета силы $q\mathbf{E}$, действующей на каждом шаге интегрирования.

Для моделирования движения частиц вдоль кристаллографической плоскости с индексами Миллера ($k l m$) используется следующая процедура [28]. Вводится симуляционный бокс размерами $L_x \times L_y \times L_z$, внутри которого вводится кристаллическая решетка. Ось z ориентирована вдоль направления распространения пучка и параллельна плоскости ($k l m$), ось y направляется перпендикулярно этой плоскости. Радиус-векторы узлов решетки $\mathbf{R}_j^{(0)}$ ($j = 1, 2, \dots, N$) генерируются в соответствии с типом ячейки Браве кристалла, при этом используются заранее определенные значения трансляционных векторов [18].

Когда узловые точки внутри симуляционного бокса определены, векторы положения атомных ядер генерируются с учетом их тепловых колебаний. Последние приводят к случайному смещению Δ_j от узловых

положений; эти положения определяются нормальным распределением около среднеквадратичной амплитуды тепловых колебаний [29].

Интегрирование уравнений движения начинается при $t = 0$, когда частица «входит» в кристалл при значении координаты $z = 0$. Начальные координаты x_0 и y_0 выбираются в центральной части плоскости (xy), в пределах $\Delta x = 2d$, $\Delta y = d$ (d – межплоскостное расстояние плоскостей ($k l m$)), случайным образом, с помощью генератора случайных чисел. Начальная скорость v_0 частицы ориентирована вдоль оси z , т. е. она имеет компоненты $v_0 (0, 0, v_{0z})$.

Для моделирования распространения частицы через кристалл конечной толщины L в MBN Explorer используется так называемый динамический симуляционный бокс [2, 18] как новый тип граничных условий. Внутри этого бокса движется частица, взаимодействующая с атомами, лежащими внутри обрезающей сферы. Для оптимизации численной процедуры размеры бокса L_x, L_y, L_z выбираются в 3 – 5 раз больше, чем ρ_{\max} . Как только расстояние l от частицы до ближайшей грани становится близким к ρ_{\max} ($l \approx \rho_{\max}$), создается новый симуляционный бокс того же размера с геометрическим центром, совпадающим (приблизительно) с положением частицы. Чтобы избежать скачков в изменении силы, действующей на частицу, положения атомов, расположенных на пересечении старого и нового симуляционных боксов, не изменяются. В остальной части нового бокса позиции атомных ядер генерируются по описанной выше схеме. Моделирование прерывается, когда z -координата частицы становится равной толщине кристалла L .

Аналогичный процесс выполняется при моделировании искривленных каналов в изогнутом кристалле.

Расчет траекторий электронов и позитронов

С помощью пакета программ MBN Explorer было произведено моделирование траекторий электронов и позитронов энергией 270 МэВ, падающих вдоль кристаллографических плоскостей (110) на кристаллы алмаза. Расчеты были выполнены для

прямого кристалла и периодически изогнутого по косинусу; длина кристаллов – 20 мкм. Амплитуда изогнутости кристалла составляла 2,5 Å, длина периода изогнутости – 5 мкм. С помощью генератора случайных чисел было построено по 6 тыс. траекторий для электронов в прямом кристалле алмаза, ориентированном вдоль кристаллографической плоскости (110), и в периодически изогнутом кристалле. Столько же траекторий было получено для позитронов в тех же кристаллах. Траектории были проанализированы и усреднены для расчета параметров каналирования в кристалле.

В обычном кристалле алмаза мы имеем дело с прямыми каналами, обусловленными периодическим расположением его атомов. Ширина канала определяется межатомным расстоянием и составляет величину $d = 1,26$ Å. Частицы, захваченные в прямые каналы с малой поперечной энергией, реже покидают такие каналы. В силу того, что кристалл короткий, позитроны чаще всего проходят по каналу через весь прямой кристалл, электроны же чаще сталкиваются с атомами решетки и вылетают из канала. Это связано с тем, что позитроны движутся между атомами кристалла, где их удерживает отталкивающее взаимодействие с ионами решетки. Электроны же движутся по траекториям, подобным винтовым линиям, в непосредственной близости от ядер, поэтому они существенно чаще сталкиваются с ними и вылетают из канала.

Траектории заряженных частиц при каналировании в изогнутых кристаллах становятся более сложными и разнообразными. В качестве примера на рис. 1 приведено несколько типичных траекторий электронов и позитронов в периодически изогнутых кристаллах алмаза. Тонкие сплошные линии на изображениях показывают границы каналов; по вертикальной оси откладывается расстояние y в плоскости, перпендикулярной направлению движения (расстояние измеряется в единицах межатомного расстояния d). На этом рисунке можно увидеть основные особенности и характеристики движения частиц в кристалле: режимы каналирования, деканалирования,

реканалирования [18]. Под реканалированием понимается процесс, когда частица, двигаясь вне канала, может испытывать столкновение и, вследствие этого, может быть захвачена каким-либо каналом.

На рис. 1, *a* представлена только одна траектория электрона, проходящая кристалл в одном канале. Такие траектории по статистике выглядят как исключение из общего числа траекторий. Остальные представленные траектории соответствуют более обычному движению электронов в режимах деканалирования и нерегулярного реканалирования на коротких участках различных каналов.

Сравнение траекторий, представленных на рис. 1 *a* и *b*, показывает, что позитроны каналируют значительно лучше, чем электроны, причем такая картина наблюдается как для прямого, так и для изогнутого кристаллов. Лишь небольшая часть позитронов из тех, которые были изначально захвачены в канал, вылетает из него, большая же часть проходит сквозь весь кристалл через один канал. Поэтому интенсивность синхротронного излучения в периодически изогнутом кристалле должна быть выше.

Отметим, что амплитуда колебаний позитронов внутри канала может быть различной, однако поперечные колебания

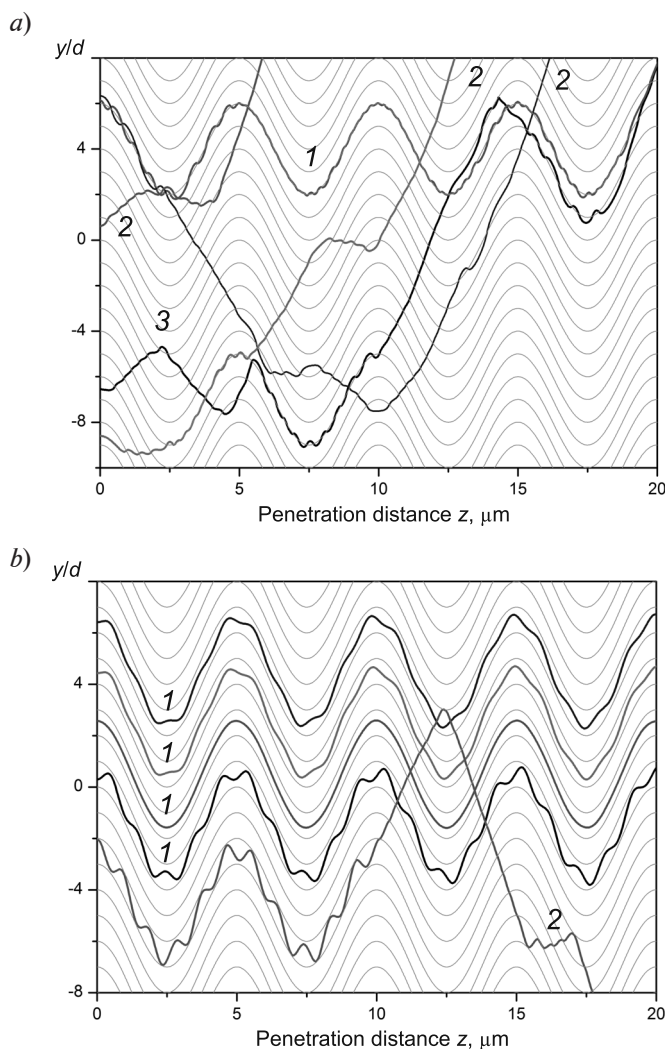


Рис. 1. Траектории электронов (*a*) и позитронов (*b*) с энергиями 270 МэВ в периодически изогнутом кристалле алмаза длиной 20 мкм. Показаны режимы каналирования (кривые 1), деканалирования (2) и реканалирования (3) В кристалле межатомное расстояние $d = 1,26 \text{ \AA}$

являются практически изохронными, их период остается почти неизменным, что соответствует гармоническим колебаниям. Следовательно, все позитроны излучают энергию примерно на одной длине волны, и их пик каналирующего излучения оказывается более узким и интенсивным, в отличие от максимума интенсивности излучения для электронов.

Статистический анализ вычисленных траекторий позволил получить основные параметры, характеризующие каналирование заряженных частиц (представлены в таблице).

Коэффициент захвата частиц A (acceptance) представляет собой отношение числа частиц N_{acc} , попавших в канал при попадании в кристалл, к числу всех падающих частиц N_0 :

$$A = N_{acc} / N_0.$$

Приведенные в таблице значения относятся к коэффициенту захвата при падении частиц вдоль оси z .

Остальные параметры связаны со средними расстояниями или временами нахождения заряженных частиц в одном или не-

скольких каналах. Длина каналирования L_{ch} определяется как среднее расстояние, которое частица прошла в канале за все время движения в кристалле. Длина реканалирования L_{rech} – среднее расстояние, пройденное частицами в каналах в процессах реканалирования (попадание в новый канал в результате столкновения).

В таблице представлены еще два параметра, называемые длиной проникновения [1, 18]. Первый, обозначенный как L_{p1} , определяет среднее расстояние, пройденное частицей, попавшей в первоначальный канал при входе в кристалл, то есть расстояние от входа до точки деканалирования внутри кристалла. Вторая длина проникновения, L_{p2} , определяется как среднее расстояние, пройденное частицей в одном канале, включая те каналы, в которые частица захватывается в результате реканалирования.

В связи с тем, что кристалл достаточно короткий (20 мкм), позитроны, захваченные в канал, проходят практически весь кристалл в том же канале; они имеют большие длины проникновения, каналирования и реканалирования, а также больший

Таблица

Параметры каналирования частиц в прямом и периодически изогнутом кристаллах алмаза

Параметр	Обозначение	Прямой кристалл		Периодически изогнутый кристалл	
		Э	П	Э	П
Коэффициент захвата частиц	A	0,695	0,957	0,511	0,888
Длина каналирования	L_{ch} , мкм	9,039	18,664	6,058	17,173
Длина реканалирования	L_{rech} , мкм	4,184	6,083	5,979	7,529
Длина проникновения	L_{p1} , мкм	5,431	19,068	4,303	18,819
	L_{p2} , мкм	4,551	18,013	3,599	16,373

Обозначения: Э, П – электроны и позитроны соответственно.

Примечания. 1. Длина обоих кристаллов алмаза – 20 мкм. 2. Частицы обоих типов падают на кристаллы с энергией 270 МэВ вдоль кристаллографических плоскостей (110). 3. Прямой кристалл ориентирован вдоль кристаллографической плоскости (110).

коэффициент захвата A .

Электроны значительно чаще испытывают столкновения с ионами решетки, так как их траектории проходят в непосредственной близости от ионов, и, как результат, часто вылетают из канала.

Спектры излучения электронов и позитронов

Анализ полученных временных зависимостей координат $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ и скоростей $\mathbf{v} = \mathbf{v}(t)$ частиц позволяет получить спектральные характеристики излучения этих частиц.

Для вычисления спектрально-углового распределения излучаемой энергии $d^3E / (\hbar d\omega d\Omega)$ (ω — частота излучаемого фотона, Ω — телесный угол), В.Н. Байер и В.М. Катков развили квазиклассическое приближение, детали которого можно найти в работе [30].

В рамках квазиклассического приближения спектральное распределение энергии, излученной ультрарелятивистской частицей в направлении \mathbf{n} , определяется следующим выражением [30]:

$$\frac{d^3E}{\hbar d\omega d\Omega} = \alpha \frac{q^2 \omega^2}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int_{-\infty}^{\infty} dt_2 e^{i\omega'(\psi(t_1) - \psi(t_2))} \times \left[\left(1 + (1 + u^2) \left(\frac{v_1 v_2}{c^2} - 1 \right) \right) + \frac{u^2}{r^2} \right], \quad (4)$$

где $\alpha = e^2/\hbar c$ — постоянная тонкой структуры, q — заряд частицы в единицах элементарного заряда,

$$\psi(t) = t - \mathbf{nr}(t)/c.$$

Величины ω' и u учитывают радиационную отдачу:

$$\omega' = (1 + u)\omega, \quad u = \frac{\hbar\omega}{\varepsilon - \hbar\omega}. \quad (5)$$

Спектральное распределение излучаемой энергии $dE / (\hbar d\omega)$ получается путем численного интегрирования значений $d^3E / (\hbar d\omega d\Omega)$ по заданным интервалам углов φ и θ . В приведенных ниже результатах мы ограничивались учетом фотонов, излученных в пределах апертуры 0,2 мрад. Иными словами, в спектрах излучения мы учитывали пучок фотонов, который лежит

в конусе с параметрами $\varphi[0; 2\pi]$ и $\theta[0; \theta_0]$.

Таким образом, мы получаем спектр излучения для каждой вычисленной траектории и усредняем по ансамблю этих траекторий.

На рис. 2, *a* представлены спектры излучения электронов в прямом и изогнутом кристаллах. Широкий максимум (кривая 1) при энергии больше 0,4 МэВ определяется вкладом в интенсивность излучения, связанного с осцилляциями электрона в плоскости, поперечной направлению движения частицы (CR). Уменьшение интенсивности этого максимума в периодически изогнутом кристалле (кривая 2) связано с большими потерями числа каналирующих электронов.

На рис. 2, *b* показаны спектры излучения позитронов в прямом и изогнутом кристаллах. Максимум CR (кривая 1) здесь более узкий и высокий ввиду того, что частота поперечных колебаний всех позитронов при распространении в канале примерно одинакова.

При каналировании в изогнутом кристалле, как видно из рис. 2, *a* и *b* (кривые 2), при энергии квантов порядка 130 кэВ наблюдается максимум интенсивности излучения, отсутствующий в прямом кристалле. Появление этого максимума связано с движением частицы в периодически изогнутом кристалле, когда заряженная частица движется вдоль средней линии изогнутого канала. Частота квантов излучения связана с периодом кривизны канала и продольной энергией заряженной частицы. Это излучение когерентно, имеет небольшую спектральную ширину и, поскольку оно аналогично излучению в ускорителях на свободных электронах и позитронах, проходящих через периодически ориентированное магнитное поле, оно носит название ондуляторного излучения. Поскольку в работе рассматриваются электроны и позитроны одинаковой энергии, то положение ондуляторного пика на спектрах излучения одинаково. Однако интенсивность излучения позитронов на порядок выше, чем для электронов, вследствие гармоничности колебаний и большей длины каналирования позитронов.

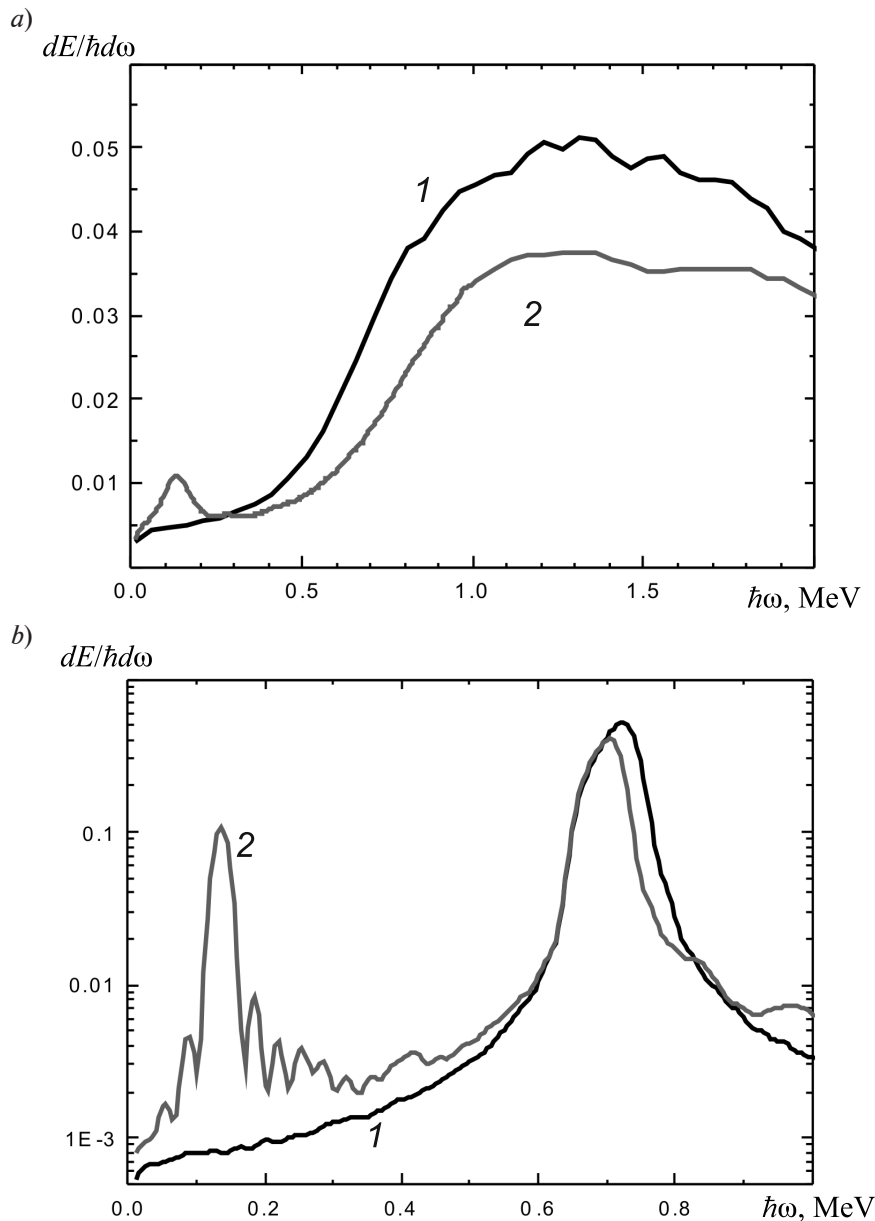


Рис. 2. Спектры излучения $dE/(\hbar d\omega)$ электронов (a) и позитронов (b) в прямом (1) и в периодически изогнутом (2) кристаллах алмаза длиной $L = 20$ мкм, ориентированных вдоль кристаллографической плоскости (110)

Заключение

С помощью пакета прикладных программ MBN Explorer [1, 2] проведено численное моделирование траекторий ультррелятивистских заряженных частиц в прямом и изогнутом кристаллах алмаза при падении электронов и позитронов вдоль кристаллографической плоскости (110). Координаты входа частиц в поперечной

плоскости выбирались с помощью генератора случайных чисел. Статистическая обработка полученных траекторий позволила определить параметры каналирования электронов и позитронов с энергией 270 МэВ в кристалле алмаза длиной 20 мкм. Показано, что позитроны имеют больший коэффициент захвата в канал и пробегают существенно большие расстояния в кристаллическом канале по сравнению с электронами.

Рассчитанный спектр излучения электронов и позитронов в квазиклассическом приближении при каналировании в периодически изогнутом кристалле состоит из двух основных областей. Высокоэнергетический максимум интенсивности связан с синхротронным излучением частиц при осцилляционном движении в канале; тот же максимум получен при каналировании в прямом кристалле. Низкоэнергетический максимум в области 130 кэВ появляется при движении частиц в периодически изогнутом канале и имеет ондуляторную природу. Это излучение когерентно и, несмотря на малое число периодов изогнутого кристалла (4 периода), имеет заметную интенсивность, что представляет интерес для возможного создания лазера

[17, 18, 31].

Полученные параметры каналирования и рассчитанные спектры излучения представляют интерес в связи с проводимыми в настоящее время экспериментами по каналированию электронов в прямых и изогнутых кристаллах в университете Майнца (Германия) [27].

Благодарности

Авторы работы выражают благодарность коллективу Суперкомпьютерного центра СКЦ «Политехнический» за предоставление вычислительных ресурсов для проведения расчетов и фонду Александра Гумбольдта (Германия) за частичную поддержку работы в рамках гранта, направленного на поддержку связей научных групп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solov'yov I.A., Yakubovich A.V., Nikolaev P.V., Volkovets I., Solov'yov A.V. MesoBioNano explorer — a universal program for multiscale computer simulations of complex molecular structure and dynamics // *J. Comp. Chem.* 2012. Vol. 33. No. 30. Pp. 2412–2439.
2. Sushko G.B., Bezchastnov V.G., Solov'yov I.A., Korol A.V., Greiner W., Solov'yov A.V. Simulation of ultrarelativistic electrons and positrons channeling in crystals with MBN explorer // *J. Comp. Phys.* 2013. Vol. 252. November 1. Pp. 404–418.
3. Lindhard J., Winther A., Dan K. Influence of crystal lattice on motion of energetic charged particles // *Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd.* 1965. Vol. 34. No. 14. Pp. 1–64.
4. Kumakhov M.A. On the theory of electromagnetic radiation of charged particles in a crystal // *Phys. Lett. A.* 1976. Vol. 57. No. 1. Pp. 17–18.
5. Andersen J.U., Bonderup E., Pantell R.H. Channeling radiation // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 1983. Vol. 33. Pp. 453–504.
6. Bak J., Ellison J.A., Marsh B., Meyer F.E., ..., Suffert M. Channeling radiation from 2–55 GeV/c electrons and positrons: (I). Planar case // *Nucl. Phys. B.* 1985. Vol. 254. Pp. 491–527.
7. Bak J., Ellison J.A., Marsh B., Meyer F.E., ..., Suffert M. Channeling radiation from 2 to 20 GeV/c electrons and positrons (II): Axial case // *Nucl. Phys. B.* 1988. Vol. 302. Pp. 525–558.
8. Базылев В.А., Жеваго Н.К. Генерация интенсивного электромагнитного излучения релятивистскими частицами // *Успехи физических наук.* 1982. Т. 137. Вып. 4. С. 605–662.
9. Kumakhov M.A., Komarov F.F. Radiation from charged particles in solids. New York: AIP, 1989.
10. Tsyganov E.N. Estimates of cooling and bending processes for charged particles penetration through a monocrystal. Fermilab preprint TM-682, Fermilab, Batavia, 1976. Fermilab Preprint TM-684. Fermilab, Batavia, 1976.
11. Kaplin V.V., Vorobev S.A. On the electromagnetic radiation of channeled particles in a curved crystal // *Phys. Lett. A.* 1978. Vol. 67. No. 2. Pp. 135–137.
12. Bashmakov Yu.A. Radiation and spin separation of high-energy positrons channeled in bent crystals // *Radiat. Effects and Defects in Solids.* 1981. Vol. 56. No. 1-2. Pp. 55–60.
13. Taratin A.M., Vorobiev S.A. Quasi-synchrotron radiation of high-energy positrons channeled in bent crystals // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 1989. Vol. 42. No. 1. Pp. 41–45.
14. Arutyunov V.A., Kudryashov N.A., Samsonov V.M., Strikhanov M.N. Radiation of ultrarelativistic charged particles in a bent crystal // *Nucl. Phys. B.* 1991. Vol. 363. Pp. 283–300.
15. Таратин А.М. Каналирование частиц в изогнутом кристалле // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 1998. Т. 29. Вып. 5. С. 1063–1118.
16. Korol A.V., Solov'yov A.V., Greiner W. Coherent radiation of an ultrarelativistic charged

particle channeling in a periodically bent crystal // J. Phys. G.: Nucl. Part. Phys. 1998. Vol. 24. No. 5. Pp. L45–L53.

17. **Korol A.V., Solov'yov A.V., Greiner W.** Photon emission by an ultrarelativistic particle channeling in a periodically bent crystal // Int. J. Mod. Phys. E. 1999. Vol. 8. No. 1. Pp. 49–100.

18. **Korol A.V., Solov'yov A.V., Greiner W.** Channeling and radiation in periodically bent crystals. 2nd ed. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.

19. **Baranov V.T., Bellucci S., Biryukov V.M., Britvich G.I., ..., Zapolsky V.N.** Preliminary results on the study of radiation from positrons in a periodically deformed crystal // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2006. Vol. 252. No. 1. Pp. 32–35.

20. **Backe H., Krambrich D., Lauth W., Buonomo B., Dabagov S.B., Mazzitelli G., Quintieri L., Lundsgaard H.J., Uggerhoj U.I., Azadegan B., Dizdar A., Wagner W.** Future aspects of X-ray emission from crystal undulators at channeling // Nuovo Cimento. C. 2011. Vol. 34. No. 4. Pp. 175–180.

21. **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. 2008. Vol. 266. No. 17. Pp. 3835–3851.

22. **Backe H., Krambrich D., Lauth W., Lundsgaard H.J., Uggerhoj U.I.** X-ray emission from a crystal undulator – Experimental results at channeling of electrons // Nuovo Cimento. C. 2011. Vol. 34. No. 4. Pp. 157–165.

23. **Backe H., Krambrich D., Lauth W., Andersen K.K., Lundsgaard H.J., Uggerhoj U.I.** Channeling and radiation of electrons in silicon single crystals and Si_{1-x}Ge_x crystalline undulators // J. Phys.: Conf. Series. 2013. Vol. 438. Conf. 1. P. 012017.

24. **Sushko G.B., Korol A.V., Greiner W.,**

Solov'yov A.V. Sub-GeV electron and positron channeling in straight, bent and periodically bent silicon crystals // J. Phys.: Conf. Series. 2013. Vol. 438. Conf. 1. P. 012018.

25. **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.

26. **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. 2016. Vol. 387. Pp. 41–53.

27. **Lauth W., Backe H., Baret R., et al.** Channeling experiments with electrons at the Mainz Microtron MAMI // 4th Intern. Conf. “Dynamics of Systems on the Nanoscale” (DySoN 2016). October 03 – 07, 2016. Bad Ems, Germany. Book of Abstracts, 2016. P. 63.

28. **Molière G.** Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen I Einzelstrahlung am abgeschirmten Coulomb-Feld // Z. Naturforsch. A. 1947. Bd. 2a. S.133–145.

29. **Gemmel D.S.** Channeling and related effects in the motion of charged particles through crystals // Rev. Mod. Phys. 1974. Vol. 46. No. 1. Pp. 129–227.

30. **Baier V.N., Katkov V.M., Strakhovenko V.M.** Electromagnetic processes at high energies in oriented single crystals. Singapore: World Scientific, 1998.

31. **Korol A.V., Solov'yov A.V., Greiner W.** Channeling of positrons through periodically bent crystals: on the feasibility of crystalline undulator and gamma-laser // Int. J. Mod. Phys. E. 2004. Vol. 13. No. 5. Pp. 867–916.

Статья поступила в редакцию 23.03.2018, принята к публикации 23.03.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АГАПЬЕВ Кирилл Борисович – студент Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
syr96@mail.ru

ИВАНОВ Вадим Константинович – доктор физико-математических наук, профессор Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
ivanov@physics.spbstu.ru

КОРОЛЬ Андрей Владимирович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Научно-исследовательского центра мезобионаносистем (MBN), г. Франкфурт-на-Майне, Германия.
60438, Germany, Frankfurt am Main, Altenhoferallee, 3
korol@mbnexplorer.com

СОЛОВЬЕВ Андрей Владимирович — доктор физико-математических наук, директор Научно-исследовательского центра мезобионаносистем (MBN), г. Франкфурт-на-Майне, Германия.
60438, Germany, Frankfurt am Main, Altenhoferallee, 3
solovyov@mbnresearch.com

REFERENCES

- [1] **I.A. Solov'yov, A.V. Yakubovich, P.V. Nikolaev, I. Volkovets, A.V. Solov'yov**, MesoBioNano explorer — a universal program for multiscale computer simulations of complex molecular structure and dynamics, *J. Comp. Chem.* 33 (30) (2012) 2412–2439.
- [2] **G.B. Sushko, V.G. Bezchastnov, I.A. Solov'yov, et al.**, Simulation of ultrarelativistic electrons and positrons channeling in crystals with MBN explorer, *J. Comp. Phys.* 252 (2013) (November 1) 404–418.
- [3] **J. Lindhard, A. Winther, K. Dan**, Influence of crystal lattice on motion of energetic charged particles, *Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd.* 34 (14) (1965) 1–64.
- [4] **M.A. Kumakhov**, On the theory of electromagnetic radiation of charged particles in a crystal, *Phys. Lett. A.* 57 (1) (1976) 17–18.
- [5] **J.U. Andersen, E. Bonderup, R.H. Pantell**, Channeling radiation, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 33 (1983) 453–504.
- [6] **J. Bak, J.A. Ellison, B. Marsh, F.E. Meyer, ..., M. Suffert**, Channeling radiation from 2–55 GeV/c electrons and positrons: (I). Planar case, *Nucl. Phys. B.* 254 (1985) 491–527.
- [7] **J. Bak, J.A. Ellison, B. Marsh, F.E. Meyer, ..., M. Suffert**, Channeling radiation from 2 to 20 GeV/c electrons and positrons (II): Axial case, *Nucl. Phys. B.* 302 (1988) 525–558.
- [8] **V.A. Bazylev, N.K. Zhevago**, Intense electromagnetic radiation from relativistic particles, *Sov. Phys. Usp.* 25 (8) (1982) 565–595.
- [9] **M.A. Kumakhov, F.F. Komarov**, Radiation from charged particles in solids, AIP, New York, 1989.
- [10] **E.N. Tsyganov**, Estimates of cooling and bending processes for charged particles penetration through a monocrystal, Fermilab preprint TM-682, Fermilab, Batavia, 1976. Fermilab Preprint TM-684. Fermilab, Batavia, 1976.
- [11] **V.V. Kaplin, S.A. Vorobev**, On the electromagnetic radiation of channeled particles in a curved crystal, *Phys. Lett. A.* 67 (2) (1978) 135–137.
- [12] **Yu.A. Bashmakov**, Radiation and spin separation of high energy positrons channeled in bent crystals, *Radiat. Effects and Defects in Solids.* 56 (1-2) (1981) 55–60.
- [13] **A.M. Taratin, S.A. Vorobiev**, Quasi-synchrotron radiation of high-energy positrons channeled in bent crystals, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 42 (1) (1989) 41–45.
- [14] **V.A. Arutyunov, N.A. Kudryashov, V.M. Samsonov, M.N. Strikhanov**, Radiation of ultrarelativistic charged particles in a bent crystal, *Nucl. Phys. B.* 363 (1991) 283–300.
- [15] **A.M. Taratin**, Particle channeling in a bent crystal, *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei.* 29 (5) (1998) 437–462.
- [16] **A.V. Korol, A.V. Solov'yov, W. Greiner**, Coherent radiation of an ultrarelativistic charged particle channeling in a periodically bent crystal, *J. Phys. G.: Nucl. Part. Phys.* 1998. Vol. 24 (5) (1998) L45–L53.
- [17] **A.V. Korol, A.V. Solov'yov, W. Greiner**, Photon emission by an ultrarelativistic particle channeling in a periodically bent crystal, *Int. J. Mod. Phys. E.* 8 (1) (1999) 49–100.
- [18] **A.V. Korol, A.V. Solov'yov, W. Greiner**, Channeling and radiation in periodically bent crystals, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [19] **V.T. Baranov, S. Bellucci, V.M. Biryukov, G.I. Britvich., ..., V.N. Zapolsky**, 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.
- [20] **H. Backe, D. Krambrich, W. Lauth, et al.**, Future aspects of X-ray emission from crystal undulators at channeling, *Nuovo Cimento. C.* 34 (4) (2011) 175–180.
- [21] **H. Backe, P. Kunz, W. Lauth, A. Rueda**, Planar channeling experiments with electrons at the 855 MeV Mainz Microtron MAMI, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 266 (17) (2008) 3835–3851.
- [22] **H. Backe, D. Krambrich, W. Lauth, et al.**, X-ray emission from a crystal undulator — experimental results at channeling of electrons, *Nuovo Cimento. C.* 34 (4) (2011) 157–165.

[23] **H. Backe, D. Krambrich, W. Lauth, et al.**, Channeling and radiation of electrons in silicon single crystals and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ crystalline undulators, *J. Phys.: Conf. Series.* 438 (2013) 012017.

[24] **G.B. Sushko, A.V. Korol, W. Greiner, et al.**, Sub-GeV electron and positron channeling in straight, bent and periodically bent silicon crystals, *J. Phys.: Conf. Series.* 438 (2013) 012018.

[25] **R.G. Polozkov, V.K. Ivanov, G.B. Sushko, et al.**, Channeling of ultrarelativistic positrons in bent diamond crystals, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* No. 2(218) (2015) 167–178.

[26] **A.V. Korol, V.G. Bezchastnov, G.B. Sushko, A.V. Solov'yov**, 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 (2016) 41–53.

[27] **W. Lauth, H. Backe, R. Barrett, et al.**, Channeling experiments with electrons at the Mainz

Microtron MAMI, In: 4th Intern. Conf. “Dynamics of Systems on the Nanoscale” (DySoN 2016), October 03–07, 2016, Bad Ems, Germany, *Book of Abstracts*, 2016, P. 63.

[28] **G. Molière**, Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen I Einzelstruung am abgeschirmten Coulomb-Feld, *Z. Naturforschg. A* 2 (1947) 133–145.

[29] **D.S. Gemmel**, Channeling and related effects in the motion of charged particles through crystals, *Rev. Mod. Phys.* 46 (1) (1974) 129–227.

[30] **V.N. Baier, V.M. Katkov, V.M. Strakhovenko**, Electromagnetic processes at high energies in oriente d single crystals, World Scientific, Singapore, 1998.

[31] **A.V. Korol, A.V. Solov'yov, W. Greiner**, Channeling of positrons through periodically bent crystals: on the feasibility of crystalline undulator and gamma-laser, *Int. J. Mod. Phys. E.* 13 (5) (2004) 867–916.

Received 23.03.2018, accepted 23.03.2018.

THE AUTHORS

AGAPEV Kirill B.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
cyr96@mail.ru

IVANOV Vadim K.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
ivanov@physics.spbstu.ru

KOROL Andrey V.

MBN Research Center UG
Altenhoferallee 3, 60438 Frankfurt am Main, Germany
korol@mbnexplorer.com

SOLOV'YOV Andrey V.

MBN Research Center UG
Altenhoferallee 3, 60438 Frankfurt am Main, Germany
solovyov@mbnresearch.com