Письма в ЖЭТФ, том 103, вып. 11, с. 816 – 821 © 2016 г. 10 июня

Генерация рентгеновского излучения при скользящем взаимодействии 18 МэВ электронов с тонким Si кристаллом в камере бетатрона

М. М. Рычков, В. В. Каплин[1], *К. В. Сухарников, И. К. Васьковский*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

Поступила в редакцию 22 апреля 2016 г.

Представлены результаты исследования генерации рентгеновского излучения при скользящем взаимодействии 18 МэВ электронов с Si кристаллом толщиной 50 мкм и длиной 4 мм вдоль пучка электронов, установленном в гониометре внутри камеры бетатрона Б-18. Результаты демонстрируют сильные изменения угловых распределений тормозного излучения при изменении ориентации кристалла, что отсутствует в случае геометрии перпендикулярного падения электронов на поверхность тонкого кристалла, если нет эффектов каналирования электронов, которые реализуются при его определенных ориентациях. Получены изображения эталонной микроструктуры, которые продемонстрировали высокое разрешение ее деталей за счет малого размера источника излучения. Продемонстрировано изменение контраста изображения от положения микроструктуры в конусе излучения.

DOI: 10.7868/S0370274X16110126

Введение. Скользящее падение заряженных частиц на поверхности мишеней, являющееся особым случаем в физике взаимодействия заряженных частиц с веществом, и в настоящее время демонстрирует в экспериментах новые эффекты, которые не наблюдаются в случае перпендикулярного падения частиц. Так, недавно [1], было экспериментально показано, что при наклонном падении пучка 7.4 МэВ электронов на тонкие фольги из алюминия и меди происходит не только увеличение его поперечных размеров, а также и изменение направления его движения, то есть ранее не наблюдавшийся эффект преломления пучка.

В настоящей работе впервые исследуется генерация излучения при взаимодействии 18 МэВ электронов с тонким Si кристаллом, ориентированным под скользящими углами к внутреннему пучку бетатрона Б-18. Бетатроны, образующие вторичное жесткое рентгеновское излучение при взаимодействии внутреннего пучка электронов с толстой мишенью, площадь которой больше сечения пучка, широко используются в медицине и промышленности. Но около 15 лет назад бетатрон Б-35 был нами использован для экспериментов по исследованию эффектов в генерации мягкого параметрического рентгеновского излучения 35 МэВ электронами в кристаллах [2], многослойных рентгеновских зеркалах [3] и острофокусного излучения в волноводах [4, 5], изготовленных на тонких Si подложках. Генерация этих видов излучения осуществляется при скользящем падении релятивистских электронов на поверхности таких наноструктур. Поэтому, для определения влияния на картину генерации излучения в многослойной наноструктуре возможных "мешающих" эффектов с участием излучения, генерированного быстрыми электронами в кристаллической подложке, был проведен эксперимент [6] по исследованию генерации рентгеновского излучения при скользящем взаимодействии 33 МэВ электронов внутреннего пучка бетатрона Б-35 с Si пластиной толщиной 56 мкм и длиной 1.5 мм вдоль пучка электронов, которая была идентична подложкам рентгеновских зеркал и волноводных структур. Были исследованы ориентационные зависимости спектров и угловых распределений излучения. Было обнаружено, что влияние кристаллической структуры пластины на формирование углового распределения генерированного излучения заключается в концентрировании излучения в направлениях атомных осей и плоскостей, направления которых лежали вблизи направления пучка электронов. Дополнительно к широкому пучку тормозного излучения на фотографиях пучков излучения наблюдались "звездные" картины из тонких полос и пятна интенсивности, которые следовали за направлениями плоскостей (111), (110) и оси кристалла [110] при его наклоне. Это обусловлено излучением электронов [7], захваченных в объеме кристалла в режим каналирования вдоль плоскостей и оси кристалла [8].

[1]e-mail: kaplin@tpu.ru

Позднее [9] была исследована генерация рентгеновского излучения при скользящем взаимодействии 33 МэВ электронов бетатрона Б-35 с Si пластиной толщиной 50 мкм и длиной 4 мм, установленной в гониометре внутри камеры бетатрона вдоль пучка электронов так, что отсутствовали эффекты каналированния электронов вдоль плоскостей (111), (110) и оси [110] кристалла. Эволюция угловых распределений излучения от электронов, проходящих Si пластину при изменении ориентации пластины относительно пучка электронов, показала их асимметрию с преимущественной генерацией излучения на поверхности пластины, которая была внешней относительно центра ускорителя. При скользящем падении электронов на эту поверхность генерировалось поверхностное излучение, эмитируемое в конус, который в несколько раз уже конуса тормозного излучения. При скользящем взаимодействии электронов с поверхностью, обращенной к центру ускорителя, генерации такого пучка излучения не наблюдалось. Было предположено, что за наблюдаемый эффект ответственно магнитное поле ускорителя, которое устанавливает повторяющееся взаимодействие электронов с внешней поверхностью пластины.

В настоящей работе впервые измерены угловые распределения рентгеновского излучения, генерированного при изменении угла ориентации Si кристалла относительно направления пучка 18 МэВ электронов бетатрона Б-18 в области скользящих углов $2^\circ > \theta_o > -2^\circ$. Получены увеличенные изображения эталонной микроструктуры и показано изменение контрастности изображений при изменении положения микроструктуры в конусе излучения.

Условия эксперимента. Si пластина с вертикальным и горизонтальным (вдоль пучка электронов) размерами 5 и 4 мм, соответственно, и толщиной 50 мкм помещалась на вертикальном тонком держателе гониометра внутри равновесной орбиты ускоряемых электронов (рис. 1a). Дополнительное магнитное поле, создаваемое обмоткой сброса в течение 30 мкс, уменьшало радиус орбиты, и электроны попадали на пластину с частотой 50 Гц.

Излучение, генерированное электронами в тонкой Si пластине, установленной вдоль пучка электронов, выходило через 50 мкм лавсановое окно экспериментальной камеры и попадало на рентгеновскую пленку Kodak, установленную на расстоянии 56 см от пластины. Полученные фотографии пучков излучения в рентгеновской области спектра обрабатывались на сканере для последующего анализа. На рис. 1b приведена схема расположения Si пластины относительно направления пучка электронов **e** (стрелки), па-

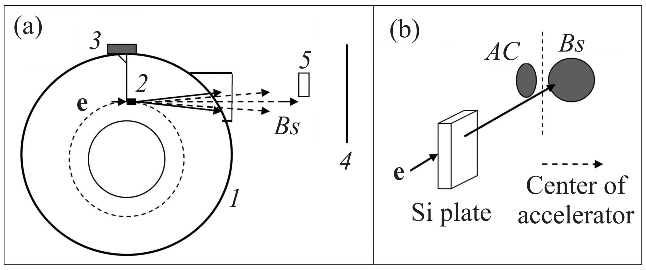

Рис. 1. Схема эксперимента, (a): *1* – камера бетатрона; *2* – кристалл на пучке электронов **e**; *3* – гониометр; Bs – тормозное излучение (Bremsstrahlung); *4* – фотопленка, *5* – микроструктура. (b) – Расположение 50 мкм Si пластины относительно пучка электронов и центра ускорителя. Вертикальная штриховая линия – направление плоскости пластины; AC – дополнительная к Bs компонента излучения

дающего на боковую грань пластины под скользящим углом. Гониометр позволял вращать пластину вокруг вертикальной оси так, что электроны могли попадать на ту или иную ее боковую поверхность. Угол ориентации кристалла относительно направления пучка электронов мог изменяться в области $5^\circ > \theta_0 > -5^\circ$. Область отрицательных углов θ_o соответствует падению пучка электронов на поверхность пластины, которая обращена к центру ускорителя. При изменении угла θ_o изменялось также и расстояние между изображением пучка генерированного излучения и проекцией плоскости пластины (вертикальная штриховая линия на рис.1b) на фотографии углового распределения. Особенности в угловых распределениях излучения наблюдались при скользящих углах падения электронов на кристалл, то есть когда направление плоскости кристалла лежало внутри конуса излучения. Для измерения размера фокуса источника излучения использовался микроструктурный прибор Duplex IQI EN462-5/ASTM E2002-98, который изготовлен фирмой Computerised Information Technology Ltd. [10]. Прибор устанавливался на расстоянии 38 см от кристалла и мог перемещаться относительно оси пучка излучения, чтобы получать рентгенограммы (негативные изображения) его элементов в различных участках конуса излучения. Для регистрации рентгенограмм использовалась рентгеновская пленка Kodak, установленная на расстоянии 114 см от кристалла. Полученные рентгенограммы обрабатывались на сканере для получения позитивных изображений структуры прибора и получения кривых почернения на полученных позитивах, то есть снимках с рентгенограмм-негативов, которые дают изображения, светлые и тёмные части

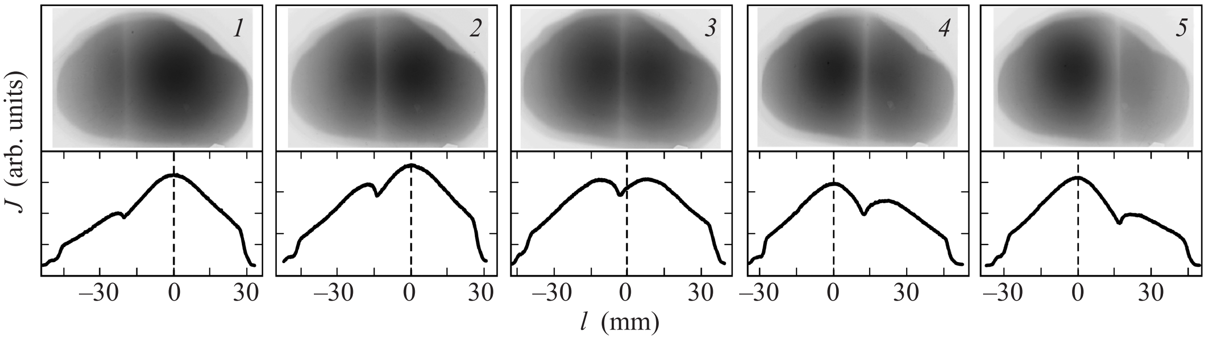

Рис. 2. Фотографии пучков излучения, генерированного 18 МэВ электронами при углах ориентации Si пластины $\theta_o = 1.9°$ (*1*); $1.25°$ (*2*); $0.05°$ (*3*); $1.25°$ (*4*) и $-1.8°$ (*5*). Ниже приведены профили плотностей почернения вдоль горизонтальных линий, проходящих через центры пятен почернения. Интервал в 1 мм на фотографиях соответствует $0.05°$ в угловом распределении

которых отвечают их распределениям в действительности.

Результаты. *Угловые распределения излучения.* На рис. 2 приведены фотографии угловых распределений излучения, генерированного 18 МэВ электронами в Si пластине, которая была ориентирована относительно электронного пучка под углами $\theta_o = 1.9°$; $1.25°$; $0.05°$; $-1.25°$ и $-1.8°$, фотографии *1–5* соответственно. Изображения на пленке Kodak формировались, в основном, рентгеновским излучением с энергией фотонов в области 5–50 кэВ. Ниже, приведены распределения интенсивностей почернения на фотографиях, полученных с использованием сканера. Фотографии 1 и 5 показывают, что при значительном и примерно равном угловом расстоянии между пучком электронов и направлением плоскости пластины при падении электронов на внешнюю или внутреннюю поверхности кристалла виды угловых картин подобны. На фотографиях присутствует пятно почернения от тормозного излучения в направлении пучка электронов и светлая полоса в направлении плоскости пластины, образованная поглощением излучения в пластине и дополнительным преломлением тех частей излучения, которые выходят через боковые поверхности пластины. Различие только в том, что в случае, изображенном на фотографии 1, пучок электронов пересекает пластину "слева–направо", а в случае, изображенном на фотографии 5, "справа–налево". Фотографии *2–4*, полученные при меньших скользящих углах падения электронов на внешнюю и внутреннюю поверхности пластины, показывают резкое изменение формы углового распределения при наклоне кристалла. При ориентациях $\theta_o = 1.25°$ и $-1.24°$ фотографии демонстрируют асимметричные распределения интенсивности излучения с максимумами в направлении пучка электронов. Картина угловых распределений при этих ориентациях состоит из основного широкого пятна, профиль интенсивности которого похож на профили пятен от тормозного излучения на фотографиях *1* и *5* (рис. 2), и дополнительной компоненты по другую сторону от направления плоскости кристалла. Но, при ориентации кристалла $\theta_o = 0.05°$ угловое распределение состоит из двух широких пятен интенсивности, расположенных по обе стороны от светлой полосы в направлении проекции пластины, которые образованы двумя пучками тормозного излучения, если принять во внимание угловые ширины этих компонент, составляющих общее угловое распределение излучения.

Эти две компоненты общего углового распределения равноценны, а небольшое различие в их интенсивности определяется небольшим наклоном кристалла относительно его расположения строго вдоль пучка электронов. Это угловое распределение ясно показывает, что распределения, полученные при углах $\theta_o = 1.25°$ и $-1.25°$, следует также рассматривать как состоящие из двух компонент – основной и дополнительной, которые расположены по разные стороны от направления пластины. Вероятно, эти компоненты излучения генерируются двумя частями электронного пучка, на которые делится первоначальный пучок при взаимодействии с кристаллом. Например, при $\theta_o = 0.05°$, за счет бетатронных колебаний электроны могут попадать на обе стороны кристалла, а электроны, попавшие на торец кристалла, могут, за счет многократного рассеяния, выйти через ту или иную поверхность, генерируя при этом излучение в направлении своего выхода.

Изображения микроструктуры. В процессе исследования генерации излучения в тонкой Si пластине, установленной вдоль бетатронного пучка, были получены изображения микроструктуры для оценки размера источника излучения по контрастности рентгенограмм. В качестве микроструктуры использовался вышеупомянутый прибор IQI, который предназначен для тестирования качества индустриальной радиографии. Качество рентгенограмм определяется количеством выявляемых деталей прибора, который может эффективно использоваться с энергией фотонов излучения до 400 кэВ и состоит из 13 пар проволок, встроенных в держатель из жесткого пластика толщиной 4 мм и размером $15 \times 70\,\text{мм}^2$. Pt или W проволоки с диаметрами, изменяющимися от пары к паре в области 0.8×0.05 мм, точно разнесены на величину диаметра проволок, которые принадлежат определенной паре. Качество рентгенограммы характеризуется числом пар проволок, промежутки которых могут быть видны. При увеличении размера источника излучения, изображения проволок все большего числа пар сливаются в единый образ. В [11] был разработан метод для оценки размера используемого источника излучения по параметрам профиля почернения на рентгенограмме пары, изображения проволок которой почти сливаются в единый образ.

Для тестирования горизонтального размера источника был использован 13-й элемент прибора IQI, который предназначен для индикации наилучшего качества изображения и состоит из пары платиновых проволок диаметром 50 мкм и промежутком 50 мкм между ними. Плоскость прибора при измерениях была перпендикулярна оси конуса излучения, а проволоки этого элемента при измерениях располагались параллельно плоскости кристалла. Поэтому изображение этой (как и других) пары проволок было параллельно светлой полосе на рентгенограмме.

В случае протяженного вдоль пучка электронов источника излучения, контрастность изображения определенной пары проволок определяется проекцией источника в направлении этой пары. При ориентации 50 мкм Si пластины вдоль пучка электронов следует ожидать высокого разрешения деталей микроструктуры, которые расположены вблизи направления плоскости пластины. В нашем случае эффективный горизонтальный размер S_H источника излучения можно оценить как $S_H = t + T|\theta_H|$, где t – толщина пластины, T – длина пластины вдоль пучка электронов, θ_H – горизонтальный угол эмиссии излучения из пластины в направлении выбранной пары проволок прибора IQI.

В эксперименте были получены рентгенограммы прибора IQI при различных его положениях в конусе излучения. На рис. 3 приведены фрагменты изображений прибора, полученные из рентгенограмм, обработанных на сканере, которые показывают увеличенные позитивные изображения 13-й пары Pt проволок прибора. Рентгенограммы с увеличением $\times 3$ получены при ориентации Si пластины $\theta_o = 0.05°$ и угловых положениях этой пары $\theta = -1.45°$; $-0.89°$; $-0.15°$; $0.82°$ и $1.25°$ относительно направления пучка электронов (фотографии *1–5*, соответственно). Точки с координатой $l_o = 0$ на приведенных изображениях отстоят от светлой полосы на рентгенограммах на расстояниях 27.9; 16.8; 2.1 мм (слева от полосы) и 17.3; 25.8 мм (справа от полосы) (фотографии *1–3* и *4–5*, соответственно). Ниже приведены профили плотностей почернения на изображениях вдоль горизонтальных линий, перпендикулярных полосам почернения.

Согласно вышеприведенной формуле, эффективный горизонтальный размер S_H источника излучения, соответствующий вышеприведенным угловым положениям θ этой пары в конусе излучения, составляет $S_H = 147$, 108, 57, 110 и 140 мкм, так как угловые положения этой пары относительно направления плоскости пластины $\theta_H = -1.4°$; $-0.84°$; $-0.1°$; $0.87°$ и $1.3°$, соответственно. Приведенные изображения показывают, что наилучшее разрешение 13-й пары проволок прибора IQI демонстрирует фотография *3*, которое соответствует минимальному эффективному размеру источника. Как видно, качество изображения 13-й пары уменьшается при смещении объекта от оси конуса излучения из-за увеличения эффективного размера источника. Кривые фотометрирования, представляющие собой двойные максимумы, демонстрируют при этом уменьшение глубины центрального минимума.

Согласно подхода [11], разработанного для анализа полученных изображений прибора IQI, горизонтальный размер источника можно оценить, используя приведенную в [11] формулу (8) для расчета размера источника излучения по параметрам той пары проволочек, глубина минимума в центре двойного пика на кривой фотометрирования изображения которой составляет около $K = 20\,\%$ от высоты пика. Критерию K соответствует изображение *1* на рис. 3, где $K \approx 19\,\%$ от средней высоты двойного пика. Расчет по формуле (8) работы [11] дает величину горизонтального эффективного размера источника $S_{H\,\text{exp}} = 148$ мкм для этого положения прибора IQI в конусе излучения. Эта величина согласуется с расчетной величиной $S_H = 147$ мкм, рассчитанной по вышеприведенной формуле. Так как в этом случае $T|\theta_H| = 97$ мкм, то имеем $t = S_{H\,\text{exp}} - 97\,\text{мкм} = 51$ мкм, что хорошо согласуется с реальной толщиной кристалла. Размер источника излучения являет-

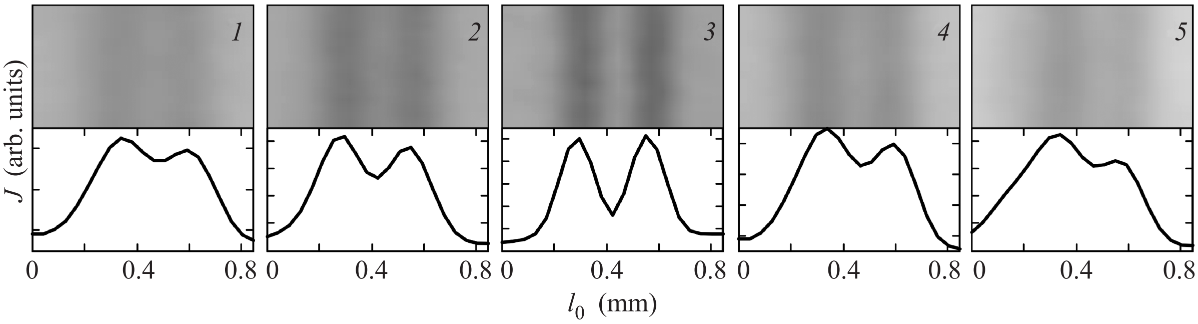

Рис. 3. Изображения 13-й пары проволочек прибора IQI и профили плотностей почернения, полученные при обработке рентгенограмм, измеренных при увеличении ×3, $\theta_o = 0.05°$ и угловых положениях этой пары $\theta = -1.45°$ (*1*); $-0.89°$ (*2*); $-0.15°$ (*3*); $0.82°$ (*4*) и $1.25°$ (*5*) относительно пучка электронов

ся важным параметром, так как он определяет такую характеристику источника как яркость (*brilliance*), которая пропорциональна светимости (*brightness*) и обратно пропорциональна размеру источника. Яркость характеризует качество излучения в определенной области его конуса. В нашем случае все положения 13-й пары проволок были в области вершины максимума углового распределения излучения – от $l = -9.7$ до 11.6 мм (рис. 2, фотография *3*). Ясно, что в этой области углового распределения яркость источника излучения зависит, в основном, не от его светимости, а от горизонтального эффективного размера S_H источника.

Используя прибор IQI, был измерен и вертикальный размер пучка электронов, взаимодействующего с кристаллом. Для этого было получено изображение IQI, когда пары проволок были перпендикулярны светлой полосе на фотографии, и можно было по размытию их изображений оценить вертикальный размер источника излучения. Вертикальный размер источника d_V излучения равен диаметру пучка электронов d_e, который гораздо больше толщины использованной Si пластины. Эффективный вертикальный размер источника $S_V = d_V \cos\theta_V$ слабо зависит от вертикального углового положения θ_V точки наблюдения в конусе излучения, так как раствор конуса излучения составляет около 3°. Поэтому яркость источника будет зависеть, в основном, от его светимости, а не от его эффективного вертикального размера.

На рис. 4 приведен фрагмент изображения прибора IQI, где присутствуют изображения первых пяти пар проволок, диаметры которых и промежуток между ними равны 0.8; 0.63; 0.5; 0.4; 0.32 мм. Видно, что с разным контрастом достоверно разрешаются детали первых трех пар проволок. Согласно подходу [11], в этом случае вертикальный размер источника можно оценить в 1.48 мм по параметрам третьей пары проволок, для которой глубина минимума в центре двойного пика на кривой фотометрирования составляет $K \approx 26\,\%$ от его высоты.

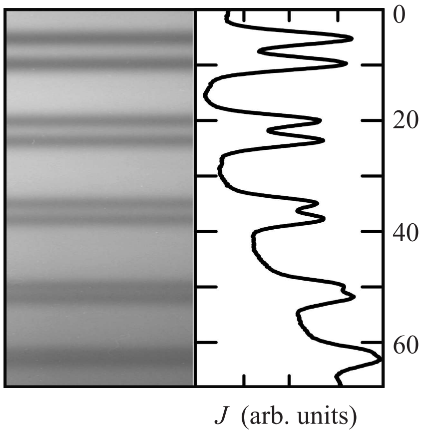

Рис. 4. Фрагмент изображения прибора IQI. Справа – кривая почернения на позитиве рентгенограммы

Заключение. В работе показано, что при скользящем взаимодействии 18 МэВ электронов с тонкой Si пластиной, установленной вдоль внутреннего пучка электронов бетатрона Б-18, изменение угла падения электронов на пластину сильно изменяет вид углового распределения генерируемого излучения. При достаточно малых углах имеет место излучение, не только в конус с осью в направление пучка электронов, но и в "отраженный" конус с примерно такой же угловой шириной и интенсивностью.

В случае исследования параметрического рентгеновского излучения и острофокусного излучения, которые генерируются быстрыми электронами в слоистых рентгеновских зеркалах и волноводах, тормозное излучение из их Si подложек будет являться существенным фоном, так как необходимые углы падения электронов на такие структуры и углы эмиссии генерированного излучения близки к угловым размерам конуса тормозного излучения. Ясно, что такой сложный, изменяющийся с углом ориентации кристалла, фон тормозного излучения необходимо учитывать при исследовании ориентационных зависимостей характеристик этих видов излучения.

Результаты также показали, что можно успешно генерировать излучение в мишени, толщина которой примерно в 30 раз меньше диаметра пучка электронов бетатрона, и использовать это излучение для получения увеличенных изображений микроструктур с высоким разрешением. Зависимость контраста изображения микрообъекта от его положения в конусе излучения от источника, протяженного вдоль пучка электронов, дополнительно показывает, что яркость источника излучения будет сильно зависеть от эффективного размера источника, величина которого связана с направлением эмиссии излучения, что не имеет места при перпендикулярном падении электронов на тонкие радиаторы.

Работа поддержана Национальным исследовательским Томским политехническим университетом в рамках проекта ВИУ # 66-2014.

1. А. В. Кольцов, А. В. Серов, Письма в ЖЭТФ **99**(1), 3 (2014).
2. V. V. Kaplin, S. R. Uglov, V. N. Zabaev, M. A. Piestrup, C. K. Gary, N. N. Nasonov, and M. K. Fuller, Appl. Phys. Lett. **76**, 3647 (2000).
3. V. V. Kaplin, V. V. Sohoreva, S. R. Uglov, O. F. Bulaev, A. A. Voronin, M. Piestrup, C. Gary, and M. Fuller, Nucl. Instr. Meth. B **267**, 777 (2009).
4. V. V. Kaplin, V. V. Sohoreva, S. R. Uglov, O. F. Bulaev, A. A. Voronin, M. Piestrup, and C. Gary, Nucl. Instr. Meth. B **269**, 1518 (2011).
5. V. V. Kaplin and S. R. Uglov, *Proceedings of the 7th International Forum on Strategic Technology* (IFOST2012), IEEE, cat. # CRP12786-PRT, **2**, 422 (2012).
6. V. V. Kaplin and S. R. Uglov, J. Phys.: Conf. Ser. **357**, 012012 (2012).
7. J. O. Kephart, R. H. Pantell, B. L. Berman, S. Datz, H. Park, and R. K. Klein, Phys. Rev. B **40**, 4249 (1989).
8. V. I. Gridnev, V. V. Kaplin, V. G. Khlabutin, E. I. Rozum, and S. A. Vorobiev, Phys. Stat. Sol. (b) **152**, 61 (1989).
9. V. V. Kaplin, Nucl. Instr. Meth. B **355**, 257 (2015).
10. www.cituk.com.
11. K. Bavendiek, U. Ewert, A. Riedo, U. Heike, and U. Zscherpel, *Proceedings of the 18th world conference on nondestructive testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa* (http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/346_wcndtfinal00346.pdf).