

**ВЕРИФИКАЦИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО КОДА ДЛЯ РАСЧЁТА  
ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

А.А. Дышеков, М.М. Токтаганова

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Д.А. Шкитов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aad52@tpu.ru](mailto:aad52@tpu.ru)

**VERIFICATION AND IMPROVEMENT OF NUMERICAL CODE FOR THE CALCULATION OF  
DIFFRACTION RADIATION CHARACTERISTICS**

A.A. Dyshekov, M.M. Toktaganova

Scientific Supervisor: PhD D.A. Shkitov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [aad52@tpu.ru](mailto:aad52@tpu.ru)

***Abstract.** In the present study, we have calculated diffraction radiation using previously written numerical code. The simulation result (angular distribution) was compared with experimental data. The descriptions of the last code improvements are also presented.*

**Введение.** Дифракционное излучение (ДИ) [1] это один из видов поляризационного излучения, которое возникает в результате динамической поляризации атомов вещества посредством воздействия кулоновским полем заряженной частицы. Это излучение называется широко известным переходным излучением, в случае, когда частица пересекает границу раздела двух сред, и дифракционным излучением, когда частица пролетает рядом с мишенью и только поле взаимодействует с ней. Сейчас ДИ применяется для диагностики [2, 3] пучков заряженных частиц в ускорителях, а также для создания источников [4] электромагнитного излучения. Однако в настоящее время у экспериментаторов существует возможность использовать для расчёта характеристик ДИ либо аналитические формулы (с многочисленными допущениями), либо коммерческие пакеты моделирования (требующие времени на освоение и опыта применения). Поэтому есть необходимость создать простое и понятное в использовании программное обеспечение для расчёта характеристик ДИ [5].

В настоящей работе изложены ограничения разрабатываемого численного кода, связанные с подходами электродинамики и допущениями используемого метода [6, 7]. Помимо этого в работе приведены описания последних изменений функционала, по сравнению с предыдущими версиями [5, 8], и сделано сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

**Методы исследования.** Разрабатываемый численный код основан на математической модели, полученной с помощью обобщённого метода поверхностных токов (является частным случаем метода поляризационных токов для мишеней с идеальной проводимостью), и написан на языке Wolfram Language [5, 8]. Метод поляризационных токов основывается на макроскопических уравнениях Максвелла, поэтому на него накладываются ограничения макроскопического подхода. Метод не применим при нерелятивистских энергиях или при условии скользящего пролёта. Также метод не

применим: для сверхпроводников при низких температурах, для веществ под высокими температурами, для сред с высокочастотными электромагнитными полями, для плазмы, для газа и для неоднородных сред. Ограничения накладываются и на толщину границы поверхности мишени, она должна быть во много раз меньше длины волны излучения [6]. В настоящее время код не учитывает переотражения излучения, генерируемого от предыдущих пластин на последующих в мишени. Точность численных расчетов определяются внутренними алгоритмами функции NIntegrate.

Поле излучения в модели имеет вид:

$$E_R^D(r_D, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \iint \delta(\lambda) \left[ [n(r_T - r_S), E_e^T(r_T - r_S, \lambda)], \nabla G(r_T - r_S, r_D, \lambda) \right] dS_T$$

где  $n$  – единичный вектор нормали к поверхности мишени,  $E_e^T$  – поле электрона,  $\nabla G$  – градиент функции Грина,  $r_T = \{x_T, y_T, z_T\}$  – координаты точки на поверхности мишени,  $r_D = \{x_D, y_D, z_D\}$  – координаты точки на поверхности детектора (точки наблюдения),  $dS_T$  – элементарная площадь поверхности мишени,  $\delta$  – коэффициент учитывающий чувствительность детектора на определенной длине волны. Для учёта сдвига частиц относительно оси  $Z$ , достаточно задать вектор сдвига  $r_S = \{x_S, y_S, 0\}$ . Определив поле излучения, можно рассчитать его спектрально-угловое

распределение интенсивности от одного электрона:  $\frac{d^2 W_e}{d\omega d\Omega} = cL^2 |E_R^D(r_D, \lambda)|^2$ , где  $L$  – расстояние от мишени до точки наблюдения.

Для проведения моделирования сначала нужно задать геометрию мишени. На рис. 1а, в качестве примера, изображена щелевая мишень, где  $a_{y,x}$  – размеры пластин,  $\psi_{y,x}$  – углы наклона,  $h$  – ширина щели. Для удобства и наглядности представления и подбора необходимых параметров различных геометрии мишеней к коду прилагается CDF файл, который содержит визуализированные интерактивные схемы мишеней с возможностью регулирования параметров (см. рис. 1б).

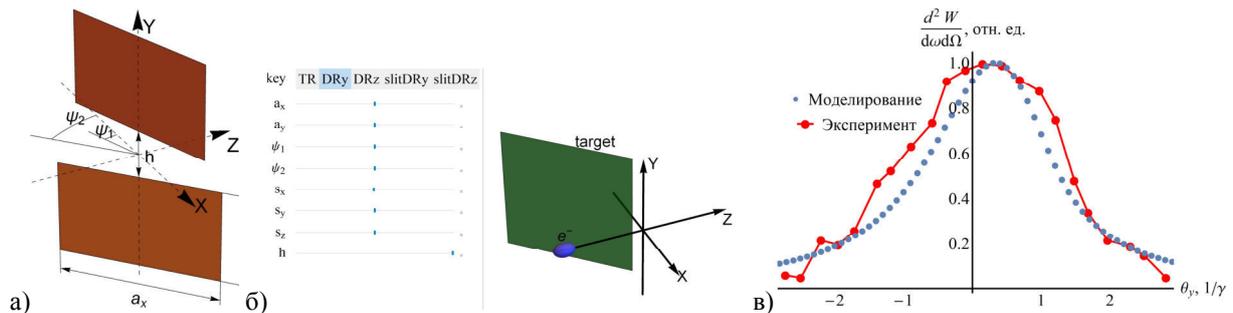


Рис. 1. Пример щелевой мишени с обозначением параметров (а), вид CDF (б), сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными (в)

**Результаты и обсуждения.** В последней версии кода добавлен параметр учитывающий зависимость чувствительности детектора от длины волны излучения  $\delta(\lambda)$ . Данный коэффициент задается, исходя из характеристик конкретного детектора. Также добавлен учет когерентности. Полное спектрально-угловое распределение излучения вычисляется через форм-фактор сгустка  $F(k)$  по

следующей формуле [1]:  $\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = [N + N(N-1)F(k)] \frac{d^2W_e}{d\omega d\Omega}$ , где  $\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}$  – полное спектрально-угловое распределение излучения,  $N$  – число электронов в сгустке,  $k$  – волновой вектор излучения и  $F(k) = \exp\left\{-4\pi^2\lambda^{-2}\left[\sigma_x^2(\cos\theta_y\cos\theta_x + (\cos\theta_y\sin\theta_x - \beta^{-1})/\operatorname{tg}\psi)^2 + \sigma_y^2\sin^2\theta_y + \sigma_z^2\beta^{-2}\right]\right\}$ , где  $\sigma_{x,y,z}$  – размеры сгустка,  $\theta_{y,x}$  – углы, задающие направление вектора  $k$ ,  $\psi$  – угол наклона мишени [1].

Для верификации кода было проведено сравнение результатов моделирования дифракционного излучения с экспериментальными данными, представленными в статье. Для этого были рассчитаны угловые распределения интенсивности ДИ для 4 различных длин волн (300, 400, 500, 600 нм), после чего с учётом чувствительности детектора было получено среднее распределение. На рис. 1в представлено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Из сравнения видно, что максимумы интенсивности излучения в эксперименте и в моделировании практически совпадают. Характер поведения графиков идентичны друг другу. Отличие лишь заключается в ширине кривых, экспериментальная кривая более широкая в отличие от кривой моделирования. Это объясняется тем, что в модели не учитывается апертура детектора, то есть детектор являлся точечным. Так как в реальности детектор имеет размеры, то это приводит к уширению углового распределения интенсивности ДИ. Ширина на полувысоте в эксперименте составила 2.7, а в расчёте 2.1 (76% от экспериментальной).

**Заключение.** Из проведённого сравнительного анализа результатов моделирования и данных эксперимента можно заключить, что численный код позволяет осуществить моделирование, правильно описывающее характеристики дифракционного излучения. Положительные результаты сравнения позволяют и дальше совершенствовать код, в том числе учесть апертуру детектора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потылицын А.П. и др. Дифракционное излучение релятивистских частиц: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 347 с.
2. Beam Diagnostics // Proceedings of the CERN Accelerator School Course. <http://cdsweb.cern.ch/record/1071486/files/cern-2009-005.pdf>
3. L. Bobb et al. Feasibility of diffraction radiation for noninvasive beam diagnostics as characterized in a storage ring // Journal of physical review accelerators and beams. – 2018. – V. 21. – P. 032801.
4. Забаев В.Н. Применение ускорителей в науке и промышленности: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008 – 195 с.
5. Shkitov D.A. Code for simulation of diffraction radiation from flat finite surfaces // Proceedings of RuPAC2018, Protvino. – 2018. – P. 510.
6. Коньков А.С. Характеристики поляризационного излучения заряженных частиц и магнитных моментов: диссертация на соискание уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. – Томск, 2015. – 134 с.
7. Karlovets D.V., Potylitsyn A.P. Generalized surface current method in the macroscopic theory of diffraction radiation // Physics Letters A. – 2009. – V. 373. – P. 1988.
8. Дышеков А.А. Оптимизация и тестирование численного кода для расчёта характеристик дифракционного излучения от плоских // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск, 2018 – С. 46.