

УДК 621.3.038.624

**ЭФФЕКТЫ НЕГАУССОВОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЗАРЯДА В СГУСТКАХ ПРИ
ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**М.М. Токтаганова, М.В. Шевелев

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: mmt8@tpu.ru**NON-GAUSSIAN EFFECTS OF BUNCH CHARGE DISTRIBUTION IN GENERATING COHERENT
TRANSITION RADIATION**M.M. Toktaganova, M.V. Shevelev

Scientific Supervisor: PhD D.A. Shkitov

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

E-mail: mmt8@tpu.ru

Abstract. *In this paper, we simulated the spectral characteristics of transition radiation produced by the spherical and cylindrical bunches using the developed software. The obtained spectra are compared with the spectra from the Gaussian bunch.*

Введение. Переходное излучение (ПИ) возникает при пересечении заряженной частицей (или сгустком частиц) границы раздела двух сред с разными диэлектрическими проницаемостями. На практике ПИ чаще всего используется при диагностике поперечных и продольных размеров пучков заряженных частиц, и чуть менее часто, в качестве источника электромагнитного излучения. В большинстве работ, посвящённых генерации ПИ, исследователи рассматривают сгустки электронов с гауссовым пространственным распределением, в то время как остальные распределения или вообще обделены вниманием, или рассматриваются вскользь. Данная статья ставит целью исследовать характеристики спектров ПИ от сгустков с распределением электронов отличными от распределения по гауссу. В статье приводится аналитический вывод формул форм-фактора (ФФ) ПИ для единичного электронного сгустка сферической и цилиндрической формы с равномерным распределением частиц в объеме. Проведено моделирование спектральных характеристик ПИ от подобных сгустков и представлено сравнение полученных результатов со спектром ПИ от гауссова сгустка.

Методы исследования. Приведем краткий вывод формул ФФ и поясним его значение. Как известно, полное спектрально-угловое распределение интенсивности (СУРИ) ПИ определяется через выражение: $\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = [N + N(N-1) \cdot F] \cdot \frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega}$, где N – число электронов в пучке, F – ФФ сгустка. Данный коэффициент характеризует долю частиц, излучающих когерентно. Аналитическое выражение ФФ в

общем виде записывается следующим образом: $F(\omega, \vec{s}) = \left| \int \rho(\vec{r}) \exp \left[i \frac{\omega}{c} (\vec{s} \cdot \vec{r}) \right] dV \right|^2$, где $\rho(\vec{r})$ –

плотность распределения частиц в сгустке, ω – циклическая частота излучения, $\vec{s} = \{s_x, s_y, s_z\}$ – вектор, определяющий тип излучения (переходное, дифракционное и т.д.), \vec{r} – радиус вектор электрона в сгустке с координатами $\{x, y, z\}$. Найдем ФФ для сгустка с равномерным распределением электронов в сферическом объёме. В данном случае плотность распределения электронов в пространстве будет иметь вид $\rho(\vec{r}) = \begin{cases} Const & x^2 + y^2 + z^2 \leq R_s^2 \\ 0 & x^2 + y^2 + z^2 > R_s^2 \end{cases}$, где R_s – радиус сферы. Нормировочный коэффициент найдем из условия $\iiint_V \rho(\vec{r}) dV = 1$, перейдя для удобства расчетов в сферические координаты. Опуская подробности

расчетов, получим, с учетом якобиана перехода к сферическим координатам, выражение для плотности распределения частиц $\rho(\vec{r}) = \begin{cases} \frac{3}{4\pi R_s^3} & r \leq R_s \\ 0 & r > R_s \end{cases}$. Тогда, аналитическое выражение для ФФ сгустка

сферической формы запишется в виде:

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| \frac{3}{2R_s^3} \int_0^{R_s} \int_0^\pi \exp\left(i \frac{\omega}{c} r \cdot s_z \cos \theta\right) r^2 \cdot J_0\left(\frac{r \cdot \omega \cdot \sin \theta \sqrt{-s_x^2 - s_y^2}}{c}\right) \sin \theta dr d\theta \right|^2$$

формулы ФФ сгустка цилиндрической формы. Плотность распределения электронов в объеме цилиндра

$$\rho(\vec{r}) = \begin{cases} (\pi R_c^2 h)^{-1} & x^2 + y^2 \leq R_c^2 \\ 0 & x^2 + y^2 > R_c^2 \\ (\pi R_c^2 h)^{-1} & z \in \{-h/2, h/2\} \\ 0 & z \notin \{-h/2, h/2\} \end{cases}, \text{ где } h \text{ – высота цилиндра, } R_c \text{ –}$$

радиус основания цилиндра. Тогда, ФФ, с учетом якобиана перехода к цилиндрическим координатам

$$F(\omega, \vec{s}) = \left| -i c \cdot \left(\exp\left[i \frac{h \omega s_z}{c} (\vec{s} \cdot \vec{r})\right] - 1 \right) {}_0F_1\left[; 2; -\frac{R_c^2 (s_x^2 + s_y^2) \omega^2}{4c^2}\right] \right| / (h \omega s_z)^2$$

Здесь ${}_0F_1$ – гипергеометрическая функция. Вывод формулы ФФ единичного сгустка с гауссовым распределением подробно описан, например, в работе [1]. Используя полученные формулы, перейдем к моделированию излучения. Поскольку СУРИ ПИ от одного электрона в максимуме углового распределения очень быстро выходит на плато, характер поведения спектральных линий на графике, в целом, будет зависеть только от ФФ. Потому, в данной статье ограничимся только его моделированием. Код для моделирования ФФ сферического и цилиндрического сгустка реализован в среде Wolfram Mathematica на основе более ранних версий для сгустков с гауссовым распределением электронов [2]. Схема взаимодействия электронного сгустка с мишенью представлена на рис. 1а. В представленной модели сгусток движется в вакууме ($\varepsilon_1 = 1$) вдоль оси Z, пересекая плоскую металлическую мишень ($\varepsilon_2 = \infty$), повернутую вокруг оси Y на угол $\theta_0 = 45^\circ$ (правая система координат). Точечный детектор удален от центра мишени на фиксированное расстояние (дальняя зона) вдоль оси X и повернут вокруг оси Y на угол θ_y , определяемый средней энергией электронов E в сгустке.

Результаты и обсуждения. На рис. 1б представлен ФФ для сгустков разной формы. Здесь σ_\perp и σ_z – поперечные и продольные размеры гауссова сгустка. Из результатов моделирования следует, что и в случае сферической, и в случае цилиндрической формы сгустка порог когерентности смещается в

сторону более низких частот, по сравнению с гауссовым сгустком, причем, для цилиндрического сгустка это тенденция выражена сильнее. Также при изменении формы сгустка на цилиндрическую наблюдается появление дополнительного пика низкой интенсивности около частоты 750 ГГц, что вызывает интерес, т.к. ранее возникновение дополнительных пиков связывали только с увеличением количества сгустков в последовательности. Данный анализ является логическим продолжением статьи [2], где исследовалось влияние различных характеристик последовательностей электронных сгустков на спектр выходного излучения для выявления оптимальных параметров электронных пучков при генерации ТГц излучения высокой интенсивности. В дальнейшем планируется обобщить полученные результаты на случай последовательностей электронных сгустков, рассмотреть сгустки эллипсоидальной формы, а также сопоставить результаты исследования с результатами статьи [3]. Кроме того, необходимо разобраться в причине появления модуляции в спектре излучения от сгустка цилиндрической формы.

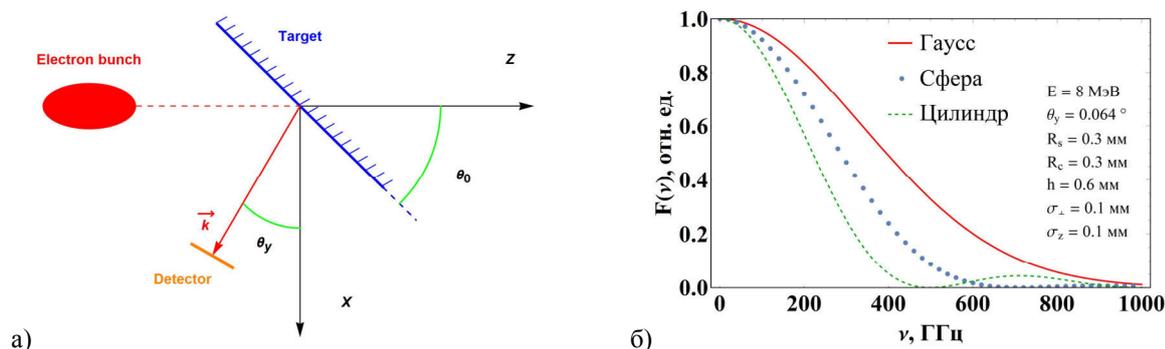


Рис. 1. Схема взаимодействия условного электронного сгустка с мишенью (а), форм-фактор в зависимости от частоты излучения для сгустков разной формы (б)

Заключение. Представлен вывод формулы ФФ ПИ для электронного сгустка сферической и цилиндрической формы. На основании полученных формул был создан код и проведено моделирование спектральных характеристик ПИ. Анализ результатов моделирования показал, что при изменении характера распределения частиц в сгустке когерентный порог излучения смещается в низкочастотную часть спектра, по сравнению со сгустком с гауссовым распределением частиц в объёме. В некоторых случаях может наблюдаться появление дополнительных низкоинтенсивных пиков в высоких частотах, природу которых предстоит выяснить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Науменко Г.А. Форм-факторы релятивистских электронных сгустков в когерентном излучении // Изв. вузов. Физика. – 2007 – Т. 50., № 10/3 – С. 199-206.
2. Токтаганова М.М., Дышеков А.А. Моделирование спектральных характеристик источников терагерцового излучения на основе последовательностей электронных сгустков // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XVII конференции. – Томск: ТПУ, 2020. – Т. 1. Физика. – С. 206-208.
3. Нагорный В.А., Потылицын А.П. Угловые характеристики когерентного переходного излучения от сгустков ультрарелятивистских электронов различной формы // Изв. ТПУ. – 2004. – Т. 307, № 1. – С. 15-23.