

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ

М.М. Токтаганова, А.А. Дышеков

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](mailto:mmt8@tpu.ru)SPECTRAL CHARACTERISTICS SIMULATION OF TERAHERTZ RADIATION SOURCES BASED  
ON ELECTRON BUNCH TRAINS

М.М. Toktaganova, A.A. Dyshekov

Scientific Supervisor: PhD D.A. Shkitov

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

E-mail: [mmt8@tpu.ru](mailto:mmt8@tpu.ru)

**Abstract.** *In the present work, we simulated the spectral characteristics of real terahertz radiation sources based on the transition radiation mechanism using the application we developed. The analysis of the parameters affecting the spectrum is carried out and recommendations are given for creating a source of high-intensity monochromatic radiation of the terahertz spectral range.*

**Введение.** В мире в настоящий момент особый интерес представляют разработки источников электромагнитного излучения в терагерцовом (ТГц) частотном диапазоне, применяемые, например, в биологии и медицине для диагностики различных заболеваний. Перспективным вариантом видятся источники на основе, так называемого переходного излучения. Переходное излучение (ПИ) это один из видов поляризационного излучения, возникающее при пересечении заряженной частицей границы раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями. В работе смоделированы спектральные характеристики ПИ реальных последовательностей электронных сгустков (ПЭС), проведён анализ данных характеристик, предложены параметры ПЭС для генерации монохроматического излучения ТГц диапазона высокой интенсивности.

**Методы исследования.** 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  $\frac{d^2W_0}{d\omega d\Omega}$  – СУРИ ПИ от одного электрона,  $N$  – число электронов в пучке,  $F$  – форм фактор (ФФ) сгустка. ФФ это коэффициент, характеризующий долю частиц, излучающих когерентно. Для моделирования СУРИ ПИ был произведён расчёт ФФ ПЭС и СУРИ ПИ от одного электрона для шести реальных ПЭС, найденных в статьях [1-6], описывающих новые методы генерации ТГц излучения на основе ПИ. СУРИ ПИ от одного электрона рассчитывалось в максимуме углового распределения, и было нормировано на максимальную интенсивность среди полученных спектров. Итоговый вид СУРИ ПИ (см. рис. 1) получен, как произведение ФФ ПЭС и СУРИ ПИ от одного электрона, в приближении  $N(N-1) \gg N$ . В приведенной модели (см. рис. 2а) ПЭС движется в вакууме ( $\epsilon_1 = 1$ ) вдоль оси  $Z$ , пересекая плоскую металлическую мишень ( $\epsilon_2 = \infty$ ), 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  $\theta_y$ , определяемый средней энергией электронов  $E$  в ПЭС. Таким образом, детектор расположен в максимуме углового распределения ПИ. Распределение электронов в сгустках описывается трёхмерным гауссовым распределением. Заряд между сгустками в ПЭС распределен равномерно.

**Результаты и обсуждения.** На рис. 1 можно видеть результаты моделирования спектров в зависимости от частоты излучения для реальных ПЭС. Здесь  $m$  – количество сгустков в ПЭС,  $\sigma_{\perp}$  и  $\sigma_z$  – средние поперечные и продольные размеры сгустков,  $l$  – среднее расстояние между сгустками. Также во вставках на рис. 1а-е изображены схематические виды каждой исследованной ПЭС. Наша задача проанализировать спектры на возможность применения в качестве источника терагерцового излучения.

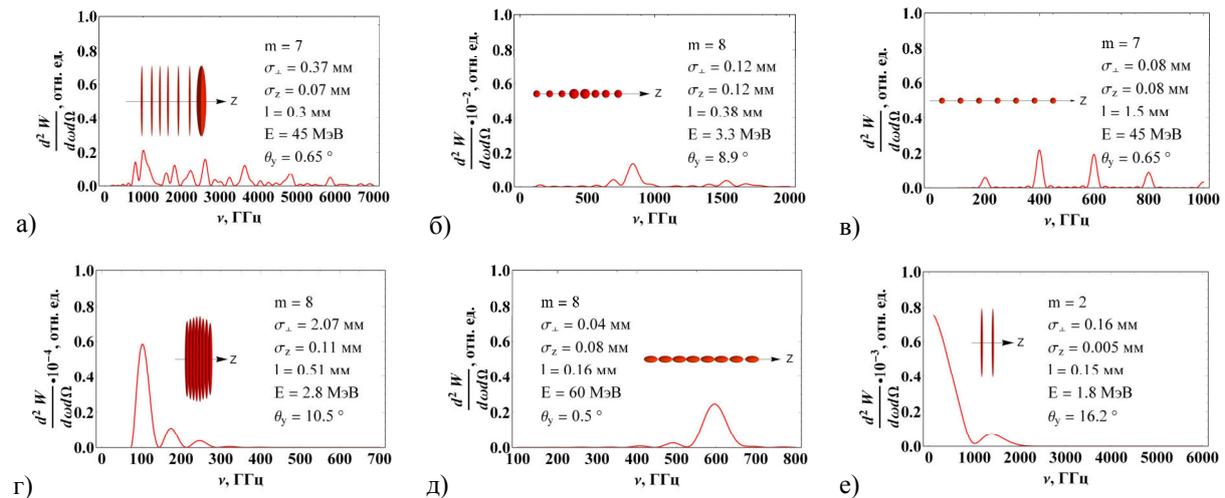


Рис. 1. Спектры излучения для различных последовательностей сгустков (а – е)

Для поставленной задачи спектр «а» не является приемлемыми, т.к. содержит множество шумов и не имеет чёткой структуры. Спектр от ПЭС «б» даёт широкий пик около 0,8 ТГц, степень когерентности которого мала. Наиболее перспективным представляется использование источника «в», т.к. пики спектра достаточно узкие, высокие и практически лишены шумов на боковых частотах. Спектр «г» имеет спадающие по интенсивности пики в пределах 0,1-0,3 ТГц с высоким первым пиком, однако, это относительно низкие частоты. Спектр «д» имеет единственный широкий пик в районе 0,6 ТГц с небольшой амплитудой, но в принципе может быть использован на практике. Спектр «е» дает хороший результат на единицах ТГц диапазона, с потенциалом к модификации. Дальнейшие исследования ФФ позволяют выделить некоторые рекомендации к пространственным параметрам ПЭС для получения излучения с желаемыми характеристиками. Необходимо увеличить количество сгустков в пучке, чем их больше – тем более монохроматическое излучение мы получаем. Энергию электронов можно довести до 10 МэВ для незначительного сдвига пиков в более высокочастотный диапазон без потери их интенсивности, увеличение энергии практически не приводит к дальнейшему смещению, также это повлияет на вид СУРИ ПИ от одного электрона и позволит быстро выйти на плато с максимальной интенсивностью. Необходимо стараться, чтобы сгустки в последовательности распределялись равномерно, так можно избежать появления паразитных боковых пиков. Высота пиков (степень когерентности излучения) в ТГц диапазоне тем больше, чем меньше продольные и поперечные размеры сгустков. Также для регулировки положения пиков по частотной шкале можно варьировать расстояние между сгустками, однако, при

смещении в высокие частоты высота пиков будет уменьшаться (из-за когерентного порога излучения), а их плотность на шкале увеличиваться, хотя это не представляется проблемой в случае использования фильтров излучения. Распределение заряда в ПЭС оптимально задавать равномерным, поскольку остальные (например, гауссово, треугольное) распределения приводят к уширению пиков. На рис. 2б, представлен вид спектра от ПЭС из рис. 1в, модифицированный с учетом вышеописанных рекомендаций для тех же условий моделирования. Видно, что уже существующие ПЭС можно модифицировать так, чтобы получить желаемый спектр излучения в ТГц диапазоне частот.

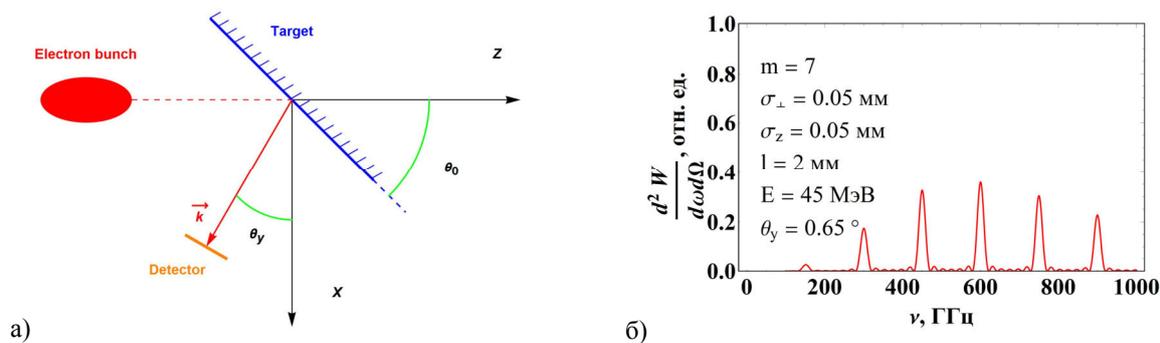


Рис. 2. Схема взаимодействия (а), модельный спектр излучения (б)

**Заключение.** В работе произведено моделирование спектров существующих источников ТГц излучения на основе ПИ. Выделены основные параметры, влияющие на их вид, а также предложены способы модификации ПЭС, посредством которых можно получить монохроматическое излучение высокой интенсивности в ТГц диапазоне. Дальнейшая работа будет направлена на исследование влияния более сложных характеристик ПЭС на спектр излучения, таких как пространственный наклон и смещения сгустков в последовательности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Z. Zhang et al. Tunable High-Intensity Electron Bunch Train Production Based on Nonlinear Longitudinal Space Charge Oscillation // Phys. Rev. Lett. – 2016. – Vol. 116. – P. 184801.
2. Z. Ma et al. Generating quasi-single-cycle THz pulse from frequency-chirped electron bunch train and a tapered undulator // High Power Laser Science and Engineering. – 2016. – Vol. 4. – P. E1.
3. L. Yan et al. UV pulse trains by  $\alpha$ -BBO crystal stacking for the production of THz-rap-rate electron bunches // J. Plasma Physics. – 2012. – Vol. 78. – P. 429-431.
4. Christopher M. S. Sears et al. Production and characterization of attosecond electron bunch trains // Phys. Rev. ST Accel. Beams. – 2008. – Vol. 11. – P. 061301.
5. L. Yan et al. Ultrashort Electron Bunch Train Production by UV Laser Pulse Stacking // Particle Accelerator Conf. (IPAC'10). – Kyoto, Japan, 2010. – P. 3210-3212.
6. Kimura W.D. et al. Subpicosecond Double Electron Bunch Generation // AIP Conference Proceedings. – 2006. – Vol. 877. – P. 527-533.