

**СВОЙСТВА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ РЕШЁТКИ, ГЕНЕРИРУЕМОГО  
РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

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)

**PROPERTIES OF THZ RADIATION FROM GRATING GENERATED BY RELATIVISTIC  
ELECTRON BEAM**

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 the spectral characteristics of terahertz radiation based on diffraction radiation mechanism from periodic grating using previously written numerical code. The simulation results were analyzed for the possibility of creating a terahertz radiation source.*

**Введение.** Терагерцовое излучение (ТГц) в настоящий момент используется в медицине и биологии, а также в сфере безопасности [1]. Это связано с тем, что излучение в этом частотном диапазоне практически не ионизирует биологические объекты, т.е. не разрушает их. Сейчас уже созданы различные способы генерации ТГц излучения [2], однако продолжают исследоваться и развиваться новые способы. Один из таких способов это применение электронного ускорителя с умеренно релятивистской энергией частиц в пучке, состоящего из коротких сгустков. При длине сгустков  $< 0.1$  мм излучение в ТГц диапазоне будет когерентным, т.е. его интенсивность пропорциональна  $N^2$ , где  $N$  – количество частиц в сгустке. Настоящая работа посвящена исследованию свойств ТГц излучения, генерируемого электронным пучком при пролёте вблизи металлической решётки, такое излучение называется дифракционным излучением (ДИ) [3]. Это один из видов поляризационного излучения, которое возникает в результате динамической поляризации атомов вещества посредством воздействия на него кулоновского поля, пролетающей заряженной частицы.

**Методы исследования.** Спектральные свойства излучения исследовались с помощью моделирования, которое также будет необходимо для дальнейшего сравнения с экспериментальными данными, полученными на ускорителе LUCX. Численный код, используемый в моделировании, более подробно описан в работе [4]. Расчёт спектральных характеристик ДИ проводился с помощью метода Монте-Карло. Расчёты проводились для решётки, состоящей из 15 периодов с профилем, образуемым прямоугольным треугольником. Все параметры решётки указаны на рис. 1а. В моделировании электроны с энергией 8 МэВ движутся вдоль оси  $Z$ , расходимость пучка не учитывалась. Точечный детектор находится на расстоянии 5 м на оси  $X$  ( $Y = Z = 0$ ) (см. рис. 1б). Решётка может поворачиваться вокруг оси вращения на заданный угол  $\theta$  (расстояние от оси до передней грани решётки 9.73 мм). Вертикальный

прицельный параметр и горизонтальный при  $\theta = 0^\circ$  равны 0.5 мм. Зависимость интенсивности ДИ от угла наклона решётки  $\theta$  к траектории пучка называется ориентационной зависимостью. В расчёте учитывалось влияние размеров гауссового сгустка (0.15 мм) на спектр излучения, с помощью форм фактора, который представлен на рис. 1в.

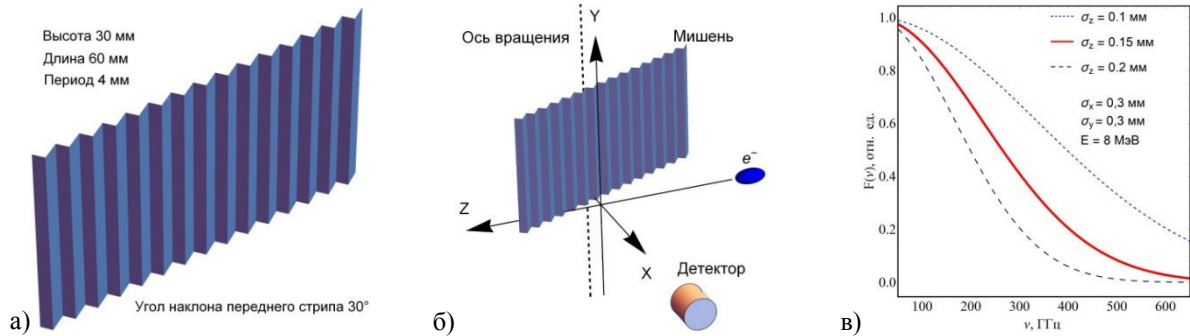


Рис. 1. Решётка (а), схема взаимодействия (б), форм фактор сгустка (в)

**Результаты и обсуждения.** В ходе моделирования производился расчёт спектрального распределения для разных углов наклона решетки для двух компонент поляризации поля: горизонтальной (вдоль оси OZ) и вертикальной (вдоль оси OY). Поворот осуществлялся от  $0^\circ$  до  $30^\circ$ . При больших углах подробный расчёт не производился, так как предварительное моделирование показало, что для  $\theta > 30^\circ$  интенсивность излучения крайне мала и не представляет интереса. Типичный спектр ДИ от решетки представляет собой несколько пиков, разделенных между собой (это разные порядки дифракции). Порядки дифракции в спектре горизонтальной компоненты имеют свойство расщепляться, начиная с некоторых углов наклона мишени, поэтому в данной работе проведён анализ именно этой компоненты. На рис. 2а представлены результаты моделирования спектров для горизонтальной компоненты поля для трёх углов  $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ . При нулевом угле нет расщепления пиков, при углах  $2^\circ-3^\circ$  начинается расщепление у высших порядков, а для первых порядков примерно с  $4^\circ-5^\circ$ . При повороте решетки коэффициент асимметрии расщепленных пиков изменяется практически линейно (см. рис. 2б). Угол наклона линейной части в зависимости параметра асимметрии от  $\theta$  увеличивается с ростом порядка дифракции, то есть асимметрия более быстро изменяется для высших порядков. Для первого порядка при угле наклона мишени  $5^\circ$  происходит резкий спад асимметрии, предположительная причина этого, что расщепление происходит намного раньше, однако из-за слияния пиков мы не можем зафиксировать это. Резкое уширение пика, которое было зафиксировано при углах  $2^\circ-5^\circ$  подтверждает данную гипотезу. С увеличением  $\theta$  положение пиков смещается в область более высоких частот (рис. 2а). Данную закономерность аналитически описывает дисперсионное соотношение, которое связывает частоту максимума данного порядка с углом наклона решётки, но данное соотношение, не учитывает множество факторов, поэтому реальное излучение имеет немного отличную закономерность. К подтверждению этому, на основании результатов моделирования были получены зависимости частоты пиков от угла наклона решётки для первых пяти порядков спектра (рис. 2в). На рис. 2в пунктирными линиями изображено дисперсионное соотношение, и как видно, оно не способно описать положение максимумов, однако хорошо описывает положение минимумов между двумя пиками одного порядка. Характер полученных в моделировании зависимостей совпадает с линиями дисперсионного соотношения. При

анализе данных, также была зафиксирована зависимость интенсивности излучения от угла наклона решётки. Сначала происходит рост интенсивности до углов  $14^{\circ}$ - $15^{\circ}$  (угол зеркального отражения) В дальнейшем происходит спад интенсивности, обусловленный тем, что всё больше излучения летит не в детектор, а в другую сторону. Исследуя монохроматичность излучения, было зафиксировано, что относительная ширина пиков практически не зависит от угла наклона решётки вплоть до  $24^{\circ}$ - $26^{\circ}$  (для первых трёх порядков), а при больших углах происходит резкое уширение, что обусловлено тем, что максимум углового распределения сильно отделился от положения детектора. Относительная ширина пиков уменьшается с ростом порядка, для первых трёх порядков равна 6, 4 и 2% соответственно.

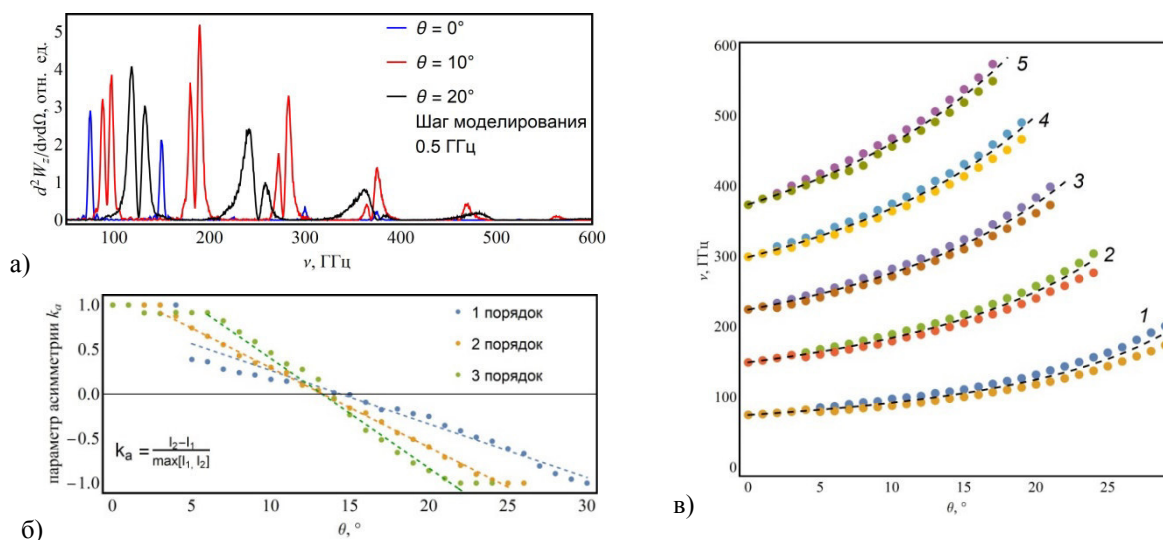


Рис. 2. Спектр горизонтальной компоненты поля при разных углах  $\theta$  (а), зависимость параметра асимметрии от угла наклона решётки (б), зависимости частоты пиков от угла наклона решётки (в)

**Закключение.** Полученные результаты моделирования подтверждают возможность создания хорошо регулируемого источника на основе механизма ДИ. Регуляции подлежат: энергия, монохроматичность и интенсивность генерируемого излучения. Регулирование непосредственно можно производить с помощью поворота мишени и выделением нужного порядка излучения.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ, научный проект №18-52-50002.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терагерцевое излучение: использование в системах досмотра [Электронный ресурс] – URL: <http://www.bezopasnost.ru/about/articles/detail/253/1465/> (дата обращения 28.02.2020).
2. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. Освоение терагерцевого диапазона: источники и приложения // УФН. – 2011. – Т. 181. – № 8. – С. 867-874.
3. Болотовский Б.М. и др. Дифракция и дифракционное излучение // УФН. – 2000. – Т. 170. – №8. – С. 809.
4. Дышеков А.А., Токтаганова М.М. Верификация и совершенствование численного кода для расчёта характеристик дифракционного излучения // ПРФН. – Томск: ТПУ, 2019. – Т. 1. Физика. – С. 133-135.