

УДК 621.3.038.624

МОНОХРОМАТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СМИТА-ПАРСЕЛЛА В ПРЕДВОЛНОВОЙ ЗОНЕ

М.И. Волков

Научный руководитель: профессор д.ф.-м.н. А.П. Потылицын
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: miv5@tpu.ru

MONOCHROMATIC SMITH-PURCELL IN "PRE-WAVE" ZONE

M.I. Volkov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.P. Potylitsyn
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: miv5@tpu.ru

***Abstract.** In the present paper were described effects of pre-wave zone of Smith-Purcell radiation generated moving electron beams parallel to the conductive target. Formulas for the calculation of the SPR spectrum from flat target with strips, which located in the same plane, are presented. Spectra were computed according these formulas with different values of distance to the detector are presented.*

Введение. При проведении экспериментов, связанных с генерацией излучения, важным фактором, значительно влияющим на результаты измерения является расстояние между источником излучения и детектором. В связи с этим были введены понятия дальней, ближней и предволновой зон. Однако, несмотря на наличие четкого определения, зоны не имеют точной границы и в зависимости от решаемой задачи могут иметь различные критерии, что затрудняет изучение этого вопроса.

В данной работе будут представлены результаты расчета монохроматичности излучения Смита-Парселла (ИСП), образующегося при движении электронного сгустка параллельно периодической проводящей мишени, при разных расстояниях между источником ИСП и детектором излучения.

Экспериментальная часть. Классическая электродинамика определяет дальнюю зону, как расстояние, на котором излучение можно рассматривать как суперпозицию сферических волн от точечного источника, а ближняя зона соответствует расстоянию, соизмеримому с длиной волны излучения. В случае, когда расстояние до детектора существенно превышает длину волны излучения, но недостаточно велико, чтобы рассматривать источник как точечный, используют понятие «предволновая зона». В работе [1] получена оценка расстояния R_{ff} между решеткой и детектором, соответствующего дальней волновой зоне для ИСП релятивистской частицы:

$$R_{ff} \gg N^2 d(1 + \cos \theta)n, \quad (1)$$

где N – число проводящих пластин (стрипов) мишени, d – период мишени, θ – угол между плоскостью мишени и прямой, соединяющей центры мишени и детектора, n – порядок дифракции. Если условие 1 не выполняется, то расстояние соответствует или ближней, или предволновой зоне. Для расчета спектрального распределения ИСП была выбрана мишень в виде периодически расположенных стрипов шириной a с длиной M . Электронный пучок с энергией 5 МэВ, движется с относительной скоростью

$\beta = \frac{v}{c}$ параллельно проводящей мишени на расстоянии h от нее и взаимодействует с ней посредством кулоновского поля, размер которого $\sim \gamma\lambda$ [2]. Схема генерации ИСП для данного случая представлена на рисунке 1. Для удобства были использованы две декартовы системы координат: для мишени и для детектора, координаты которых обозначены индексами «Т» и «D» соответственно.

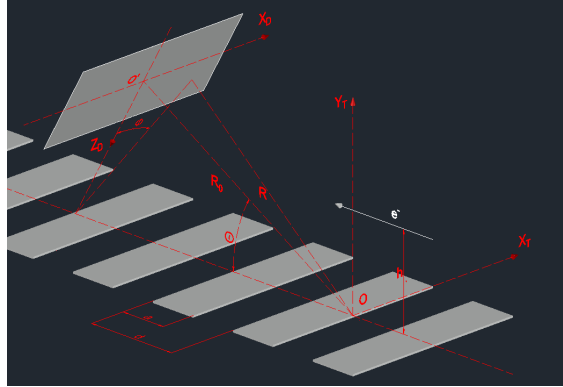


Рис. 1. Схема генерации ИСП для плоской мишени

Излучение от мишени характеризуется азимутальным и ориентационными углами Φ и θ , отсчитываемыми от центра мишени. Детектор на схеме представляет из себя прямоугольную плоскость, расположенную под углом θ относительно мишени. Выражение для компонент электрического поля E_x^D и E_y^D ИСП на детекторе в декартовых координатах для мишени, представленной на рисунке 1, запишется в виде:

$$\begin{pmatrix} E_x^D \\ E_y^D \end{pmatrix} = const \int_{-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \int_{-\frac{Nd}{2}}^{\frac{Nd}{2}} \left(\frac{X_T}{h}\right) \chi(Z_T) \frac{K_1 \left[\frac{2\pi}{\beta\gamma\lambda} \sqrt{X_T^2 + h^2} \right]}{\sqrt{X_T^2 + h^2}} \text{Exp}[i\Delta\varphi] dX_T dZ_T \quad (2)$$

где N – число стрипов в решетке; K_1 – модифицированная функция Бесселя 1-го порядка второго рода, $\Delta\varphi$ – набег фазы; i – мнимая единица; γ – Лоренц фактор; λ – исследуемая длина волны излучения; $\chi(Z_T)$ – функция, равная 1 на поверхности стрипов и равная 0 в остальных точках.

В случае дальней волновой зоне для R_0 (расстояние между центрами O и O') выполняется условие:

$$R_0 \gg X_T, Z_T, X_D, Z_D \quad (3)$$

С учетом условия (3) выражение для набег фазы $\Delta\varphi$ определяется следующим образом:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi R_0}{\lambda} \left(\frac{(Z_T \sin(\theta))^2 + X_T^2}{2R_0^2} - \frac{Z_T}{R_0} \cos(\theta) - \frac{Z_T Z_D}{R_0^2} \sin(\theta) - \frac{X_T X_D}{R_0^2} + \frac{Z_T}{\beta R_0} \right), \quad (4)$$

Для оценки расстояния, соответствующего дальней зоне и углу $\theta = 90$ градусов, был произведен расчет критерия выполнения дальней зоны по формуле (1) для $N = 25$ и $d = 5$ мм, значение которого оставило 3125 мм. Подставляя формулу (4) в формулу (2) и производя численное интегрирование при заданных значениях параметров эксперимента, было получено спектральное распределение интенсивности ИСП для мишени в виде плоских стрипов в диапазоне длин волн от 4 до 6 мм ($n = 1$). Для оценки предволновой зоны дополнительно был приведен расчет для расстояний 1562 мм и 312 мм. Значения параметров и полученные зависимости представлены на рисунке 2а. Степень монохроматичности линий ИСП для предволновой зоны составила $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 3,70\%, 3,86\%$ и $11,60\%$ для спектров с $R_0 = 3125$ мм, 1562 мм и 312 мм, соответственно. Теоретическое значение монохроматичности для дальней зоны составляет $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{0,89}{N} 100\% = 3,55\%$. Из представленных

зависимостей видно, что при уменьшении расстояния до детектора ухудшается монохроматичность спектральной линии, которая становится менее симметричной.

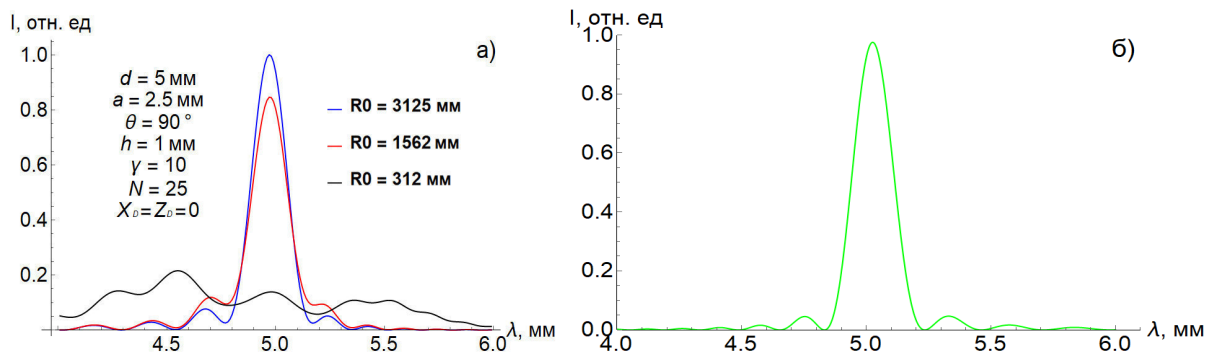


Рис. 2. Спектральные распределения интенсивности, полученные с учетом предволновой зоны (а) и для дальней зоны по модели поверхностных токов (б)

На рисунке 2б представлено спектральное распределение интенсивности для дальней волновой зоны по модели поверхностных токов при тех же условиях [3]. Из рисунка 2 видно, что спектры при больших значениях R_0 практически совпадают со спектром, полученным для дальней волновой зоны, поскольку эффекты предволновой зоны практически перестают влиять на распределения.

Результаты. Проведено сравнение результатов расчета спектрального распределения ИСП в предволновой зоне и в дальней зоне. Получены спектры при различных расстояниях между решеткой и детектором для оценки влияния эффектов предволновой зоны, приведен спектр, соответствующий дальней зоне. Была вычислена монохроматичность спектральной линии ИСП, которая составила $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 3,70\%$, $3,86\%$ и $11,60\%$ для спектров с $R_0 = 3125$ мм, 1562 мм и 312 мм соответственно, и теоретическое значение монохроматичности $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 3,55\%$.

Заключение. Монохроматичность спектральной линии ИСП в ближней зоне ухудшается в несколько раз по сравнению со значением в дальней зоне. Теоретическое значение монохроматичности хорошо согласуется со значениями, полученными для предволновой зоны для спектров с $R_0 > 0,5 \cdot N^2 d(1 + \cos(\theta))n$. Для достижения требуемой монохроматичности ИСП следует либо увеличить расстояние до детектора R_0 либо применять оптическую схему подавления эффектов ближней зоны [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карловец Д.В., Потылицын А.П. Излучение Смита – Парселла в «предволновой» зоне // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 84. – С. 579-583.
2. Болотовский Б. М. Путь формирования и его роль в излучении движущихся зарядов // Труды ФИАН. – 1982. – Т. 140. – С. 95-139.
3. Потылицын А.П. Излучение электронов в периодических структурах. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – 280 с.
4. Karataev P.V. Pre-wave effect in transition and diffraction radiation: Problems and solutions // Physics Letters A. – 2005. – P. 428–438.