

**УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ**Т.М. Гусвицкий

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н А.П. Потылицын  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: tmg3@tpu.ru

**ANGULAR DISTRIBUTION OF COHERENT OPTICAL TRANSITION RADIATION  
IN THE NEAR FIELD ZONE**T.M. Gusvitskii

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.P. Potylitsyn  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: tmg3@tpu.ru

***Abstract.** The influence of the near field zone condition on the angular distribution pattern of coherent optical transition radiation was studied. The correlation between the form of mentioned distribution and transverse size of the electron beam was defined. The comparison of calculation results for the coherent optical transition radiation for two different formula one of which takes into account the near field zone condition and the other doesn't was carried out. It is shown that the difference between two of them is sufficient only when the certain conditions are met (when the transverse size of the beam approaches to  $\gamma\lambda/2\pi$ ).*

**Введение.** Диагностика электронных пучков по оптическому переходному излучению (ОПИ) является основным методом измерения поперечного профиля пучка. В современных ускорительных установках удается получить электронные сгустки с фемтосекундной и аттосекундной длительностью и поперечным размером порядка длин волн видимого света. При рассмотрении ОПИ от таких пучков нельзя пренебрегать когерентностью этого излучения. Повышенный интерес к использованию когерентного ОПИ обусловлен ещё и тем, что усиление интенсивности от эффекта когерентности, пропорциональное числу частиц в сгустке, может достигать нескольких порядков, что приводит к тому, что ОПИ становится возможным наблюдать от каждого сгустка в пучке, что в случае с некогерентным ОПИ было невозможным из-за низкой интенсивности. Другая проблема, связанная с ОПИ, заключается в том, что не всегда можно считать источник излучения на мишени точечным. Дело в том, что область мишени, участвующая в генерации ОПИ, определяется величиной  $\gamma\lambda$  [1]. Учитывая то, что раствор конуса ОПИ приблизительно равен  $\gamma^{-1}$ , получаем, что источник на поверхности мишени можно считать точечным с расстояний порядка  $\lambda\gamma^2$ . Но в условиях некоторых экспериментов величина  $\lambda\gamma^2$  может достигать таких величин, что расположение детектирующего оборудования становится возможным только в области ближней волновой зоны. Поэтому, в данной работе проводится исследование влияния условий ближней волновой зоны на характер пространственного распределения когерентного ОПИ и определения его зависимости от поперечного размера электронного пучка.

**Методы исследования.** Моделирование распределения когерентного оптического переходного излучения проводился в программе Wolfram Mathematica. Для наглядности расчеты проводятся только для x-компоненты излучения. Распределение когерентного ПИ рассматривается в плоскости предположительного расположения линза, так как, зачастую, в экспериментах между мишенью и детектором помещают оптическую систему в виде, например, линзы. Геометрия эксперимента изображена на рис 1.

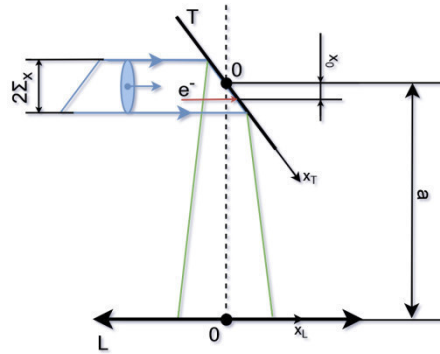


Рис. 1. Геометрия опыта для наблюдения распределения когерентного ПИ на линзе L, расположенной от мишени T на расстоянии a, от пучка электронов размером  $\Sigma_x$ .

Расчет поля ПИ для x-компоненты с учётом влияния ближней волновой зоны проводился по следующей формуле [2]:

$$E_x^L(x_L, y_L, x_0) = const \int dx_T dy_T (x_T - x_0) \frac{K_1 \left( \sqrt{(x_T - x_0)^2 + y_T^2} \right)}{\sqrt{(x_T - x_0)^2 + y_T^2}} \cdot \exp \left[ i \frac{x_T^2 + y_T^2}{4\pi R} \right] \cdot \exp[-i(x_T x_L + y_T y_L)]. \quad (1)$$

В формуле (1) используются безразмерные переменные:  $x_T = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * X_T$  – размер мишени по X;  $y_T = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * Y_T$  – размер мишени по Y;  $x_L = \frac{\gamma}{a} * X_L$  – координата X линзы;  $y_L = \frac{\gamma}{a} * Y_L$  – координата Y линзы;  $R = \frac{a}{\lambda\gamma^2}$  – расстояние до оптической системы;  $x_0 = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * X_0$  – смещение электрона от центра мишени по x. Для расчета когерентного переходного излучения нужно произвести свертку этого поля с выражением для распределения электронов в поперечном сечении сгустка. Зачастую это распределение описывается Гауссианом:

$$F(x_0) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} \right],$$

где  $\sigma_x = \frac{2\pi}{\gamma\lambda} * \Sigma_x$  – размер пучка по x, выраженный в безразмерных единицах.

Свертка распределения электронов с полем ПИ для получения поля от всего сгустка:

$$Ecoh_x^L(x_L, y_L) = \int_{-3,5\sigma_x}^{3,5\sigma_x} E_x^L(x_L, y_L, x_0) \cdot F(x_0) dx_0.$$

Интенсивность когерентного ПИ вычисляется следующим образом:

$$Icoh_x^L(x_L, y_L) = |Ecoh_x^L(x_L, y_L)|^2. \quad (2)$$

Выражение для углового распределения интенсивности когерентного переходного излучения в дальней зоне при  $y_L = 0$  с использованием форм-фактора пучка записывается следующим образом [3]:

$$Icoh_x(x_L) = const * \exp \left[ -\frac{4\pi^2}{\gamma^2 \lambda^2} * x_L^2 * \Sigma_x^2 \right] * \frac{x_L^2}{(1+x_L^2)^2} \quad (3)$$

где  $\Sigma_x$  – характерный размер пучка;  $x_L = \theta_x \gamma$ .

**Результаты.** На рисунке 2а приведены результаты расчета по формуле (2), иллюстрирующие зависимость распределения когерентного ОПИ от поперечного размера пучка. На рисунке 2б приведена зависимость расстояния между пиками распределения  $d$  от размера пучка  $\Sigma_x$ .

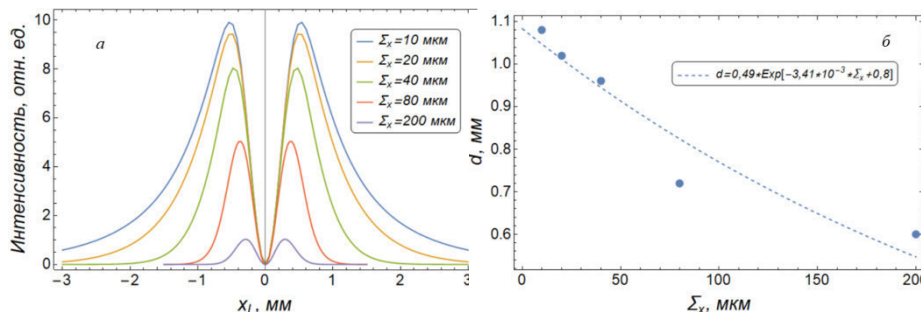


Рис. 2. Распределение интенсивности когерентного ОПИ в плоскости предполагаемой линзы для различных размеров пучка электронов (а) и зависимость ширины между пиками этого распределения  $d$  от размера пучка, аппроксимированная экспоненциальной функцией (б). Параметры моделирования: Лоренц-фактор электронов  $\gamma = 1000$ ; длина волны ПИ  $\lambda = 0,5$  мкм; расстояние от мишени до плоскости наблюдения ПИ  $a = 500$  мм

На рисунке 3 приведено сравнение расчётов распределения когерентного ОПИ по формулам (2) и (3).

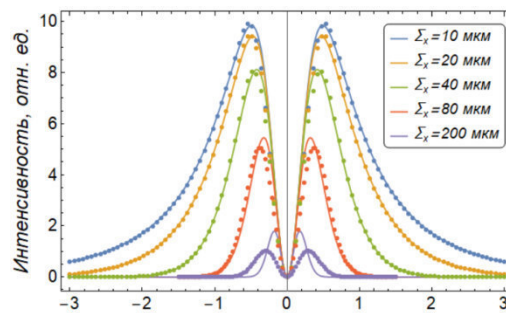


Рис. 3. Сравнение результатов расчёта когерентного ОПИ по формулам (2) и (3). Сплошные кривые отвечают за расчёт ОПИ по формуле (3), точечные графики – за расчёт по формуле (2). Параметры моделирования соответствует параметрам, указанным под рисунком 2

**Заключение.** Как можно видеть из приведенных выше результатов при увеличении размера пучка электронов распределение когерентного ОПИ сужается, а его интенсивность понижается. К тому же, различие подходов к описанию углового распределения когерентного ОПИ по формулам (2) и (3) становится значительным тогда, когда поперечный размер электронного пучка приближается к значению величины  $\gamma\lambda/2\pi$ , характеризующей область мишени, участвующую в генерации ПИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.A. Verzilov, Transition radiation in the pre-wave zone // Physics Letters A 273, 1-2, 135-140 (2000).
2. Potylitsyn A., "Image of Optical Diffraction Radiation (Odr) Source and Spatial Resolution of Odr Beam Profile Monitor", *Advanced Radiation Sources and Applications*, NATO Science Series, Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, **199**, ed. Wiedemann H., Springer, 2006, 149–163.
3. А. П. Потылицын, "Пространственная когерентность в переходном излучении коротких электронных сгустков", *Письма в ЖЭТФ*, 103:11 (2016), 762–766; *JETP Letters*, 103:11 (2016), 669–673.