

Новый вариант теории нанофокусировки пучков жесткого синхротронного излучения составной преломляющей линзой

В.Г. Кон

НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Россия, г. Москва, пл. Курчатова, 1

В [1] было показано, что для получения минимального поперечного размера пучка синхротронного излучения (СИ) в фокусе составной преломляющей линзы (СПЛ) необходимо уменьшать апертуру СПЛ A и длину волны СИ λ . При этом аналитическая теория, представленная в [2] становится неточной, так как она не учитывает апертуру СПЛ. Апертура не влияет на результат в том случае, когда пучок СИ на выходе из СПЛ имеет размер меньше апертуры вследствие поглощения, а источник СИ находится на очень большом расстоянии. Если указанные выше условия не выполняются, то апертуру необходимо учитывать.

В новом варианте теории для планарных СПЛ с малой апертурой и при высоких энергиях фотонов апертура учитывается разными способами в зависимости от конкретных условий. В [3] рассмотрен вариант, когда СПЛ является первым элементом экспериментальной схемы и получает СИ непосредственно от источника через монохроматор. В этом случае волновая функция (ВФ) СИ определяется двумя параметрами: расстоянием до источника z_s и поперечным сдвигом x_s источника от оптической оси.

При этом ВФ на выходе из СПЛ имеет аналитический вид $\exp(ia_0 + ia_1x + ia_2x^2)$ с комплексными коэффициентами a_0, a_1, a_2 , которые вычисляются в рамках аналитической теории [2]. В [3] получены аналитические формулы для действительных и мнимых частей этих коэффициентов в линейном по малому параметру $\gamma = \beta/\delta$ приближении. При этом коэффициент преломления равен $n = 1 - \delta + i\beta$. Такой результат получается без учета апертуры. Учет апертуры в [3] выполняется в рамках геометрической оптики, которая получается в том же приближении, что и теория в [2]. Траектория определяется поперечной координатой x и углом θ между направлением ее распространения и оптической осью. Нужно выбрать такие траектории, которые в точке поворота касаются апертуры с двух сторон. Концы этих траекторий определяют размер пучка на выходе из СПЛ.

Фактически достаточно определить только координаты входа таких траекторий x_{0d} и x_{0u} , а все остальное зависит от них. Так угол $\theta_0 = (x_0 - x_s)/z_s$. А координата выхода траектории равна $x_1 = x_0 \cos(u) - \theta_0 \sin(u)$, $u = L/L_c$, $L_c = (LR/2N\delta)^{1/2}$. Здесь L – длина СПЛ, R – радиус кривизны параболических поверхностей, N – число элементов в СПЛ. Для вычисления координат x_{0d} и x_{0u} необходимо решать трансцендентное уравнение методом итераций. Такой подход позволяет получить правильный ответ при любых значениях параметров z_s и x_s . В частности была вычислена кривая качания СПЛ, то

есть зависимость интегральной интенсивности после СПЛ от угла между осью СПЛ и оптической осью. В расчете угол определяется отношением x_s/z_s .

Также рассмотрен случай длинной СПЛ, когда $L = 7.54$ см, $z_s = 1$ мм и фокусное расстояние $z_f = 1.01$ мм. В этом случае СПЛ принимает очень узкий интервал поперечного сечения СИ, расширяется внутри СПЛ до размеров апертуры, а потом сжимается в фактически такой же узкий интервал. Вычислить такой случай другими методами весьма сложно.

ВФ на выходе из СПЛ имеет вид экспоненты от квадратного трехчлена, обрезанной внутри интервала от x_{1d} до x_{1u} . По этой причине интеграл свертки ВФ с пропагатором Френеля аналитически не вычисляется. Стандартно нужно использовать метод быстрого преобразования Фурье (БПФ). Альтернативно предложен вариант выразить интеграл свертки через комплексные интегралы Френеля (КИФ) от комплексного аргумента. А сам такой интеграл можно вычислять суммированием степенного ряда и асимптотики.

Как показала практика, время расчета у методов БПФ и КИФ примерно одинаковое, но новый метод КИФ в некоторых случаях может оказаться более устойчивым и точным, так как для него не требуется вычислять результат на очень большой сетке точек с мелким шагом.

Если СПЛ не является первым элементом экспериментальной схемы, то рассмотренный выше метод не применим. Точнее вычислить траектории в общем случае очень сложно. Для этих случаев можно применить 3 итерационных метода. Один из них ориентирован на ВФ в виде экспоненты, в котором соответствие конечных интервалов на входе и на выходе вычисляется методом стационарной фазы. Если интервал на выходе больше апертуры, то он уменьшается до размеров апертуры. Два других метода требуют численного вычисления интеграла свертки ВФ с пропагаторами СПЛ. Итерации состоят в том, что длина линзы делится на куски и после прохождения каждого куска, часть ВФ, которая выходит за пределы апертуры, обнуляется.

Рассмотренные 4 метода реализованы в программе XRWP, написанной на языке программирования VKACL. Получить программу для работы можно на ее сайте [4].

1. V.G. Kohn, M.S. Folomeshkin. J. Synchrotron Radiation (2021) 28, 419-428.
2. В.Г. Кон. ЖЭТФ (2003) 124, 224-236.
3. В.Г. Кон. Российские нанотехнолог. (2025) 20, 282–288.
4. В.Г. Кон. Программа XRWP. (2026) <https://xray-optics.ucoz.ru/XR/xrwp.htm>