

УДК 621.384.6;621.373

КОМПЕНСАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ФОКУСИРОВКИ ОНДУЛЯТОРА ПРИ ПЕРЕСТРОЙКЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ НОВОСИБИРСКОГО ЛСЭ

© 2019 г. А. С. Матвеев^{1,2, *}, О. А. Шевченко¹, Н. А. Винокуров¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

*E-mail: matveev.a.s@ya.ru

Перестройка длины волны излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ) приводит к изменению жесткости фокусировки ондуляторов. В работе рассмотрены два способа компенсации этого эффекта: сохранение транспортной матрицы и согласование параметров Твисса. Проверка этих методов была проведена на первом лазере новосибирского ЛСЭ. В результате удалось сохранить прохождение пучка при перестройке длины волны излучения в диапазоне 120–130 мкм.

DOI: 10.1134/S0367676519020212

ВВЕДЕНИЕ

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) имеют ключевое преимущество перед другими типами лазеров: возможность оперативной и плавной перестройки длины волны монохроматического излучения. Однако этот процесс приводит к изменению жесткости фокусировки ондулятора, а следовательно требует согласования остальной части магнитной системы ЛСЭ. Согласно условию резонанса

$$\lambda = \lambda_w \frac{1 + K^2/2}{2\gamma^2},$$

где λ — длина волны излучения, λ_w — длина периода ондулятора, K — параметр ондулятора, γ — лоренц-фактор. Имеются два способа перестроить длину волны излучения: изменить энергию электронного пучка, либо изменить параметр ондулятора K . Второй способ более предпочтителен, так как требует согласования магнитно-оптической системы локально на участке, содержащем ондуляторы.

Установка Новосибирский ЛСЭ включает в себя три лазера, способных генерировать излучение в трех различных диапазонах длин волн [1]. Данная работа проводилась на первом ЛСЭ, генерирующем ТГц-излучение в диапазоне 90–220 мкм. Дорожка этого ЛСЭ содержит два ондулятора, разделенных пустым промежутком, и 8 квадрупольных линз, по 4 с каждой стороны от ондуляторов (см. рис. 1).

Для компенсации изменения фокусирующей силы ондуляторов при перестройке длины волны излучения было предложено два решения: 1) сохранение неизменной транспортной матрицы отрезка канала, включающего в себя ондуляторы; 2) согласовывание входных и выходных параметров Твисса с оптимальными в ондуляторах, зависящими от их тока.

МЕТОД СОХРАНЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ МАТРИЦЫ

В первом подходе для сохранения транспортной матрицы достаточно 6 квадрупольных линз, так как отсутствует связь поперечных степеней свободы, и, значит, для каждой из них транспортная матрица 2×2 унимодулярная [2]. Таким образом, имеется следующая математическая постановка задачи:

$$M(g_1, \dots, g_6, I) = M_0,$$

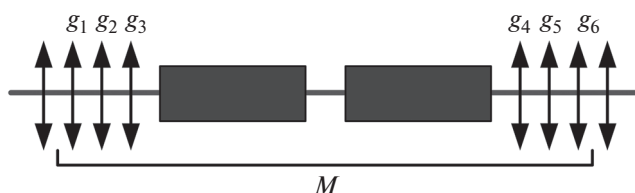


Рис. 1. Схема дорожки ондуляторов первого ЛСЭ.

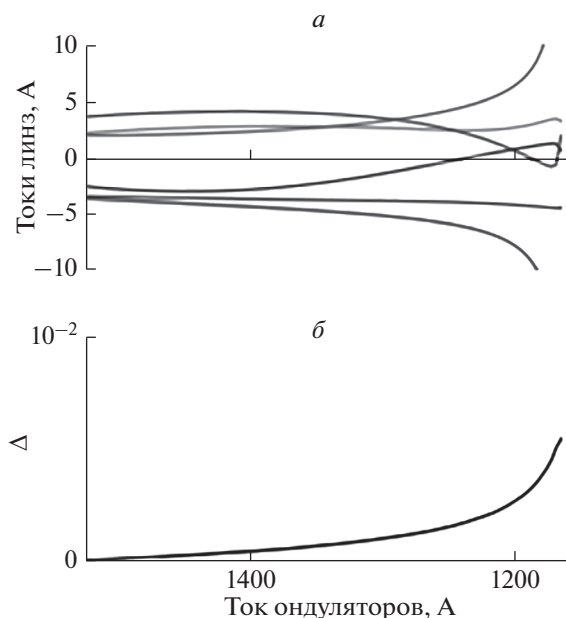


Рис. 2. Зависимость токов квадрупольных линз от тока ондуляторов (а), ошибка в сохранении транспортной матрицы (б).

где g_k — градиент магнитного поля квадрупольной линзы k , I — ток ондулятора, M_0 — исходная транспортная матрица. Мы имеем систему из 6 независимых уравнений для элементов матрицы M . Однако их выбор в общем случае не произволен: если имеется нулевой элемент, то диагональный к нему не может быть найден из условия унимодулярности. Поэтому в качестве независимых выбираются элементы той диагонали (главной или побочной), произведение элементов которой минимально по абсолютной величине, и один элемент с другой диагонали. В этом случае вычислительные ошибки в определении независимых элементов не приведут к существенной ошибке в оставшемся элементе, вычисляемом из условия унимодулярности.

Взяв полную производную по току ондулятора, получим систему уравнений:

$$\frac{\partial m_i}{\partial g_1} \frac{\partial g_1}{\partial I} + \dots + \frac{\partial m_i}{\partial g_6} \frac{\partial g_6}{\partial I} = -\frac{\partial m_i}{\partial I}, \quad i = 1, \dots, 6.$$

Разрешая ее относительно производных градиентов квадрупольных линз по току, получаем задачу Коши, решение которой может быть найдено численными методами [3]:

$$\frac{\partial g_i}{\partial I} = f(g_1, \dots, g_6, I), \quad i = 1, \dots, 6.$$

Пример численного решения для энергии пучка 11.9 МэВ приведен на рис. 2. В верхней части рисунка представлены зависимости токов квадрупольных линз от тока ондуляторов, в нижней —

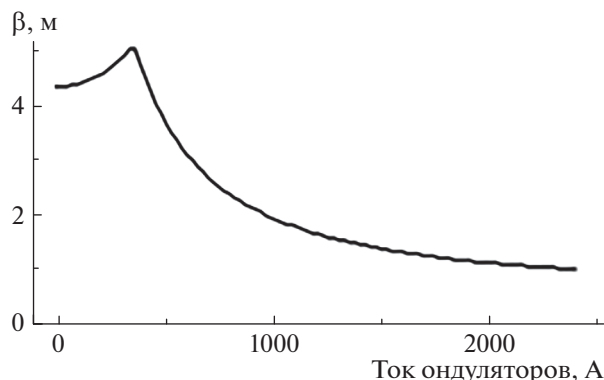


Рис. 3. Оптимальное значение бета-функции в центре между ондуляторами в зависимости от их тока.

ошибка сохранения транспортной матрицы, которая определяется следующим образом:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i,j} (M - M_0)_{ij}^2}.$$

Данный подход обеспечивает точное решение, однако на практике не для всех начальных условий оно существует.

МЕТОД СОГЛАСОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТВИССА

В основе второго метода лежит согласование входных и выходных параметров Твисса. В настоящее время диагностика для измерения параметров Твисса на дорожке ондуляторов отсутствует, поэтому было использовано следующее предположение. Пусть имеется режим магнито-оптической системы ЛСЭ, для которого получена устойчивая генерация излучения, тогда считаем, что параметры Твисса в ондуляторах являются оптимальными. Отсюда находим входные и выходные параметры для начального режима.

Оптимальные параметры Твисса в центре пустого промежутка между ондуляторами были определены следующим образом. В виду симметрии альфа- и гамма-функции равны нулю, а бета-функция находится из условия минимума ее максимального значения в ондуляторах. Полученная зависимость оптимальной бета-функции в центре между ондуляторами от их тока представлена на рис. 3.

По аналогии с предыдущим методом получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\left(\frac{\partial M_{St}}{\partial g_k} \frac{\partial g_k}{\partial I} + \frac{\partial M_{St}}{\partial I} \right) \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \alpha_0 \\ \gamma_0 \end{pmatrix} = \frac{\partial}{\partial I} \begin{pmatrix} \beta^* \\ \alpha^* \\ \gamma^* \end{pmatrix},$$

где $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ и $(\alpha^*, \beta^*, \gamma^*)$ — параметры Твисса на входе (выходе) и в центре пустого промежутка

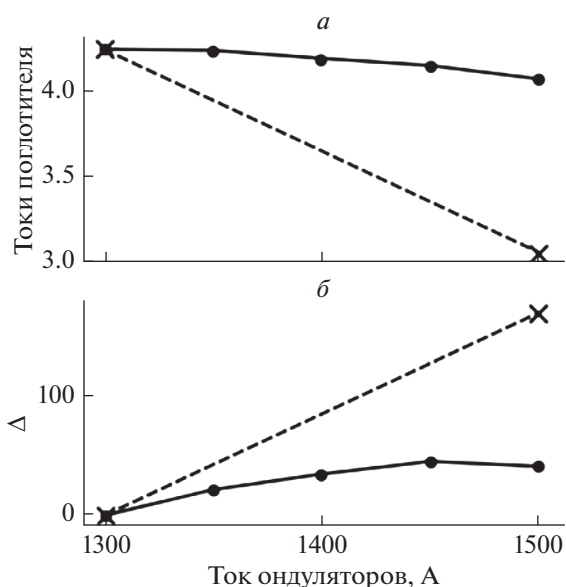


Рис. 4. Эксперимент: сохранение транспортной матрицы: *a* – измеренный сигнал, пропорциональный току пучка в поглотителе; *б* – параметр, характеризующий изменение измеренной матрицы отклика. Штриховая линия соответствует отсутствию компенсации фокусировки.

между ондуляторами соответственно, а M_{St} – матрица Штеффена [2]. Таким образом, решение данной системы для левой и правой частей дорожки ондуляторов даст правило перестройки токов 8 квадрупольных линз, при котором параметры Твисса на входе и выходе будут согласованы с оптимальными параметрами в ондуляторах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлены результаты эксперимента для энергии пучка 12.7 МэВ, в котором перестраивалась длина волны излучения ЛСЭ: с компенсацией изменения фокусирующей силы ондуляторов (сплошная линия), без изменения токов квадрупольных линз (штриховая линия). Ток ондуляторов варьировался в пределах 1300–1500 А, что соответствует изменению длины волны излучения в диапазоне 120–130 мкм. Наблюдалось изменение тока пучка в поглотителе, который определяет прохождение пучка в канале. Компенсацией фокусирующей силы ондуляторов удалось сохранить прохождение почти на начальном уровне, для сравнения при ее отсутствии было потеряно более четверти пучка (см. рис. 4а). В ходе эксперимента сохранение транспортной



Рис. 5. Эксперимент: согласование параметров Твисса.

матрицы контролировалось диагностикой матрицы откликов [4]. Для ее построения использовались 4 корректора (2 по каждой поперечной оси) и 2 датчика положения пучка (ДПП). Ошибка в сохранении матрицы откликов Δ в ходе перестройки длины волны излучения показана на рис. 4б.

Метод согласования параметров Твисса с оптимальными в ондуляторах также был экспериментально проверен, однако сохранить прохождение пучка при перестройке тока ондуляторов не удалось (см. рис. 5). Причиной данного результата может являться некорректность предположения об оптимальных параметрах Твисса для рассмотренного режима оптической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге удалось компенсировать изменение фокусирующей силы ондуляторов и сохранить прохождение пучка при перестройке длины волны излучения в диапазоне 120–130 мкм путем сохранения транспортной матрицы. Метод согласования параметров Твисса пучка требует дальнейшего развития диагностики параметров пучка в канале дорожки ондуляторов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “СЦСТИ” на базе НЛСЭ ИЯФ СО РАН, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shevchenko O.A. et al.* // Proc. RUPAC 2012. St. Petersburg, Russia. 2012. P. 136.
2. *Штеффен К.* Оптика пучков высокой энергии. М.: Мир, 1989. 23 с.
3. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978. 237 с.
4. *Safranek J.* // Proc. of the Joint US–CERN–Japan–Russia School on Particle Accelerators. Switzerland, 1998. 298 p.