

УДК 621.384.6;621.373

СРАВНЕНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ВЫВОДА НОВОСИБИРСКОГО ЛСЭ

© 2019 г. Я. В. Гетманов^{1,2,*}, Я. И. Горбачёв¹, Н. А. Винокуров^{1,2}, И. В. Давидюк^{1,2}, В. В. Кубарев^{1,2}, О. А. Шевченко¹

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

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

*E-mail: y_getmanov@mail.ru

Схема электронного вывода излучения была предложена для решения проблемы перегрева зеркал оптического резонатора в лазерах на свободных электронах с большой средней мощностью излучения. В такой структуре электронный пучок, первоначально сгруппированный в первой секции ондулятора за счет взаимодействия с модой оптического резонатора, в последующих секциях поворачивается на небольшой угол относительно оптической оси с сохранением группировки, при этом его когерентное излучение выходит за пределы моды резонатора. Система электронного вывода установлена на последнем из трех лазеров Новосибирского ЛСЭ. Она состоит из трех ондуляторов и расположенных между ними двух квадрупольей и дипольных корректоров. Поэтому существуют две возможные конфигурации - электронный пучок можно поворачивать как во втором ондуляторе, так и в третьем. Рассмотрены предварительные оценки мощности излучения и проведено сравнение вариантов конфигурации системы электронного вывода излучения Новосибирского ЛСЭ.

DOI: 10.1134/S0367676519020133

ВВЕДЕНИЕ

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) являются уникальными источниками электромагнитного монохроматического излучения, генерируемого ультрарелятивистскими электронными пучками в знакопеременном магнитном поле ондулятора. В отличие от других типов лазеров, ЛСЭ позволяет получать излучение любой заданной длины волны в рабочем диапазоне, причем эту длину волны можно относительно быстро перестраивать [1].

Несмотря на рекордные значения средней мощности излучения в своем рабочем диапазоне, современные ЛСЭ значительно отстают от промышленных лазеров. На сегодняшний день, максимальная средняя мощность ЛСЭ, полученная на сверхпроводящем ускорителе-рекуператоре (УР) в лаборатории Джефферсона, США (Jefferson Lab, USA) в 2006 г., составляет 14.3 кВт [2]. Это ограничивает распространение таких лазерных систем в промышленности, см., например, [3]. Предельно достижимая мощность ЛСЭ с оптическим резонатором, помимо параметров электронного тока ускорителя, ограничивается перегревом отражающих зеркал. Для предотвращения этого эффекта, при сохранении выходной мощ-

ности электромагнитной волны, была предложена схема электронного вывода излучения [4, 5]. Численные расчеты конфигураций структуры электронного вывода были проведены различными группами исследователей [6–9].

Основная идея системы электронного вывода заключается в выводе основной части электромагнитного излучения под углом к оптической оси резонаторов ЛСЭ, избегая тем самым перегрева зеркал. Принцип работы схемы следующий (см. рис. 1): электронный пучок 1 поворачивается магнитом 2 в ондулятор 3, при пролете которого действием основной моды излучения оптическо-

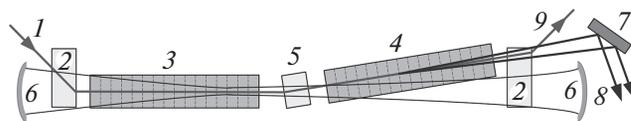


Рис. 1. Схема электронного вывода: 1 – электронный пучок, 2 – поворотный магнит, 3 – группирующий ондулятор, 4 – излучающий ондулятор, 5 – поворотный магнит, 6 – зеркала оптического резонатора и основная оптическая мода излучения, 7 – зеркало электронного вывода, 8 – основная часть мощности излучения, 9 – использованный электронный пучок.

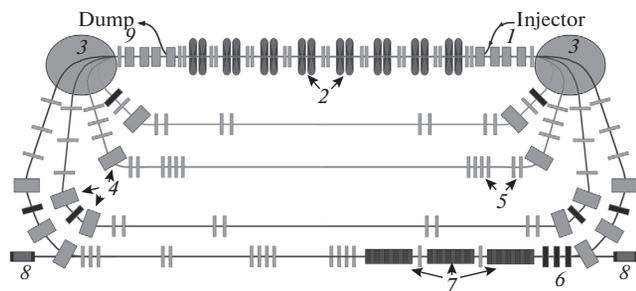


Рис. 2. Схема ЛСЭ, установленного на четырехдорожечный ускоритель-рекуператор: 1 – инжектор электронов, 2 – ВЧ резонаторы, 3 – большие поворотные магниты, 4 – поворотные магниты, 5 – квадрупольные линзы с дипольными корректорами, 6 – квадрупольные линзы, 7 – ондуляторы системы электронного вывода, 8 – зеркала оптического резонатора, 9 – поглотитель электронов.

го резонатора *б* в пучке появляется микрогруппировка на длине волны излучения; далее сгруппированный пучок ахроматически поворачивается магнитом *5* в ондулятор *4*, находящийся под углом к оптической оси, и излучает основную часть мощности *8*, которая с помощью зеркала *7* направляется на пользовательские станции; после этого использованный пучок *9* выводится из системы магнитом *2*.

ВАРИАНТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ НА НОВОСИБИРСКОМ ЛСЭ

Новосибирский ЛСЭ является источником высокоомощного терагерцевого и инфракрасного излучений [10]. Генерация излучения возможна тремя различными ЛСЭ, использующими электронный пучок трех различных конфигураций

УР. Третий ЛСЭ, запущенный в 2015 г., установлен на четырехдорожечный УР и состоит из трех ондуляторов на постоянных магнитах с регулируемым зазором (см. рис. 2) и оптического резонатора. Такое разделение ондулятора на три части было, в частности, сделано для экспериментов с электронным выводом излучения. Для этого в пустые промежутки между ондуляторами поставлены квадрупольные линзы, а на концах ондуляторов установлены дополнительные дипольные корректоры. Один из вариантов расчета и оценка возможности запуска системы электронного вывода на Новосибирском ЛСЭ изложен в [11].

Создание рабочей модели для численных расчетов и поиск возможных решений осложняются структурой магнитных полей элементов, которые накладываются друг на друга. Поэтому вначале для поиска приблизительного решения использовалась модель линейной оптики в программе *Elegant* [12] с хорошо отлаженными возможностями оптимизации. Затем полученные решения проверялись с помощью трекинга в измеренных полях элементов магнитной структуры.

Возможны два принципиально разных варианта реализации схемы электронного вывода – отклонение электронов во втором или третьем ондуляторах (см. рис. 3). В первом варианте (см. рис. 3*а*) для получения генерации излучения необходимо в первую очередь отклонить заряженные частицы во втором ондуляторе, сохраняя микросгустковую структуру сгруппированного электронного пучка, после чего для образования обратной связи и усиления генерации вернуть сфазированный со световой волной сгусток на ось оптического резонатора в третьем. Эти условия накладывают достаточно жесткие требования на магнитные поля дипольных корректоров и квадрупольных линз. На рис. 4*а* показан вариант

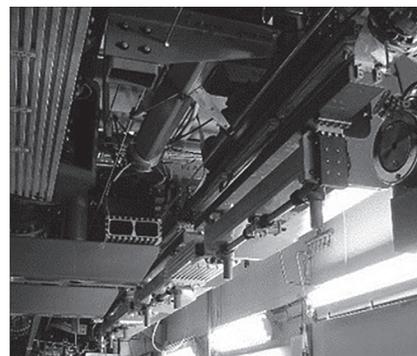
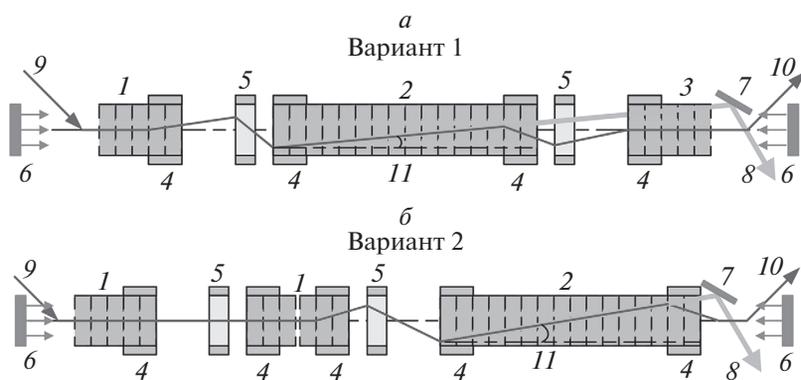


Рис. 3. Два варианта схемы электронного вывода излучения (*а, б*) и фотография структуры (справа): 1 – группирующий ондулятор, 2 – излучающий ондулятор, 3 – разгруппирующий ондулятор, 4 – дипольный корректор, 5 – квадрупольная линза с дипольным корректором, 6 – зеркала оптического резонатора и основная мода излучения, 7 – зеркало вывода излучения электронного вывода, 8 – излучение электронного вывода, 9, 10 – направление движения электронного пучка, 11 – угол излучения из системы электронного вывода.

расчета ахроматического поворота между ондуляторами. Однако сил дипольных корректоров и квадрупольной линзы второго промежутка оказывается недостаточно для возвращения отклоненного электронного пучка на оптическую ось.

Во втором случае (см. рис. 3б) нет необходимости в возвращении электронного пучка. Этот вариант был взят в качестве основного для проведения вычислений и эксперимента на установке. Оптические функции и дисперсия, посчитанные в программе Elegant, показаны на рис. 4. Для получения дополнительной дипольной коррекции квадрупольную линзу второго промежутка пришлось сдвинуть на 4 см от оси движения. Параметры электронного пучка и структуры указаны в табл. 1.

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ В ОПТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ И ЗЕРКАЛЕ ЭЛЕКТРОННОГО ВЫВОДА

Для определения режима электронного вывода излучения необходимо получить стабильный режим генерации, условием возникновения которого является равенство усиления и потерь основной моды оптического резонатора. Потери складываются из нескольких частей – отражения от зеркала электронного вывода (скрепера), вывода из отверстий оптического резонатора, рассеивания и поглощения на диафрагмах вакуумной камеры. Геометрические потери скрепера, расположенного на расстоянии $h = 20$ мм от оптической оси, имеют вид

$$c_g = \frac{1}{2} (1 - \operatorname{erf}(\sqrt{2}h/r_0)) \cong 1.107 \cdot 10^{-3},$$

где характерный размер моды $r_0 = \sqrt{\beta\lambda/\pi [1 - (z/\beta)^2]}$, $\lambda = 9$ мкм – ее длина волны, $\beta = 6$ м – длина Рэлея, $z = \frac{L_0}{2} - 2 = 17.94$ м – расстояние от области перетяжки, $L_0 = 39.884$ м – длина оптического резонатора. Полные потери на скрепере равняются $c_s = 1 - (1 - c_g)^2 \cong 2.213 \cdot 10^{-3}$, или, примерно, двойным геометрическим потерям. Геометрические потери на диафрагмах f_d и щелях f_c вакуумной камеры соответственно равны:

$$f_{di} = \exp \left[-\pi \Phi_i^2 \frac{1}{2\lambda\beta \left(1 + (z_i/\beta)^2 \right)} \right],$$

$$f_{cj} = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{h_j}{\sqrt{\frac{2\lambda\beta}{\pi} \left(1 + \left(\frac{z_j}{\beta} \right)^2 \right)}} \right],$$

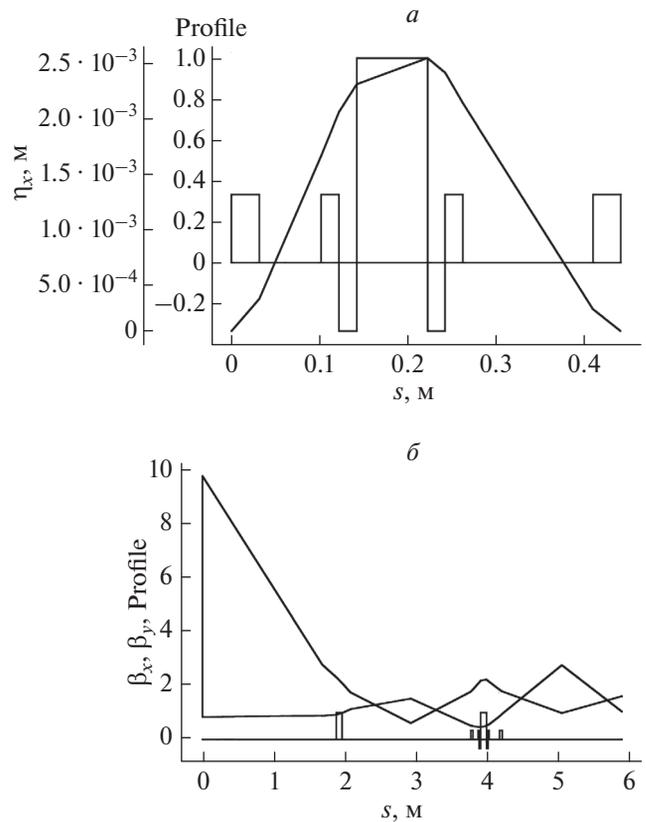


Рис. 4. Вариант-2, Ахроматический поворот и дисперсия (а) Оптические функции для вывода излучения из 3-го ондулятора (б).

где Φ_i – размер i -й диафрагмы, h_j – размер j -й щели, z_i и z_j – соответствующие расстояния до места перетяжки. Полные потери на проход оптического резонатора

$$F = 1 - \prod_i (1 - f_{di})^4 \prod_j (1 - f_{cj})^4 = 0.134.$$

Таблица 1. Параметры электронного пучка и излучения ЛСЭ

Параметры	Величины
Энергия, МэВ	39
Длина волны излучения, мкм	9
Средний электронный ток, мА	4
Частота следования сгустков, МГц	3.75
Пиковый ток, А	50
Нормализованный эмиттанс, мкм	30
Энергетический разброс, %	0.2
Параметр ондуляторности	1.22
Период ондулятора, м	0.06
Число периодов ондулятора	28
Угол отклонения электронного пучка, мрад	3

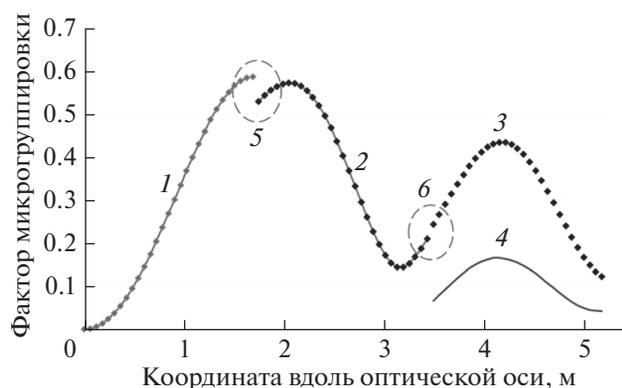


Рис. 5. Группировка электронного пучка в ондуляторах электронного вывода: 1 — первый ондулятор, 2 — второй ондулятор, 3 — группировка в третьем ондуляторе, посчитанная относительно оси движения электронного пучка, 4 — группировка, вычисляемая относительно оптической оси программой Genesis, 5 — пустой промежуток между 1-м и 2-м ондуляторами, 6 — ахроматический поворот между 2-м и 3-м ондуляторами.

Подробное описание расчета потерь в оптических резонаторах Новосибирского ЛСЭ, их оптимизация и настройка представлены в работе [13].

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ВЫВОДА

Численное моделирование излучения электронного пучка проводилось в программе Genesis [14]. В начале первого ондулятора генерировался непрерывный негруппированный электронный пучок с параметрами, рассчитанными в режиме, представленном на рис. 4, и внешняя резонансная световая волна. После пролета ондулятора полученный электронный пучок преобразовывался матрицей поворота из рассчитанного режима электронной оптики и вместе с электромагнитным полем передавался в следующий ондулятор, где повторялось моделирование движения. Излучение, полученное моделированием движения отклоненного электронного пучка в поле внешней электромагнитной волны в третьем ондуляторе, раскладывалось на основную моду оптического резонатора и остаточное поле, которое будем называть излучением электронного вывода. Вычисляя таким образом мощность основной моды P_g на выходе из ЛСЭ и варьируя начальную P_{in} в первом ондуляторе, подбирали коэффициент усиления, компенсирующий потери в оптическом резонаторе $P_g/P_{in} = 1 + F$, т.е. стабильный режим генерации ЛСЭ. После подбора необходимого коэффициента усиления, вычислялось распространение полученного электромагнитного поля до плоскости скрепера. Полученная в моделировании с непрерывным электронным пучком

полная запасенная мощность основной моды оптического резонатора $P_g = 1.417 \cdot 10^8$ Вт; ее часть, попадающая на скрепер и равна $P_{skr}/P_g \approx 6.5 \cdot 10^{-4}$, по порядку величины соответствует оценкам потерь, сделанным ранее. Относительная мощность электронного вывода равна $P_{el}/P_g \approx 4.14 \cdot 10^{-3}$. Мощность излучения электронного вывода превышает рассеивание основной моды на скрепере в $P_{el}/P_{skr} \approx 6.4$ раза.

Результаты моделирования движения непрерывного электронного пучка ввиду полученной огромной внутрирезонаторной мощности необходимо сравнить с работающим на установке квазинепрерывным режимом. Заряд электронного сгустка при среднем токе около 4 мА и частоте следования 3.75 МГц близок к 1 нКл, его длительность составляет примерно 20 пс, что соответствует пиковому току 50 А. Длительность импульса излучения при нулевой расстройке частоты следования от частоты оптического резонатора приблизительно совпадает с длительностью электронного сгустка. Тогда скважность излучения равна $7.5 \cdot 10^{-5}$. Учитывая полную внутрирезонаторную мощность излучения, полученную в моделировании, выводимую мощность излучения при частоте следования пучка 3.75 МГц можно оценить, как 640 Вт. Если принять, что электронный КПД составляет 0.004, то мощность электронного пучка, полученная из КПД излучения $640 \text{ Вт}/0.004 \approx 1.6 \cdot 10^5$ Вт, получается сравнимой с мощностью, полученной из энергетических соотношений $3.75 \text{ мА} \times 40 \text{ МэВ} \approx 1.5 \cdot 10^5$ Вт.

Невысокие значения мощности излучения отклоненного электронного пучка, попадающего на зеркало электронного вывода, можно объяснить, в первую очередь, снижением микрогруппировки электронов, достигающей максимального значения, как и планировалось изначально, на входе во второй ондулятор. На рис. 5 показано изменение этого параметра, рассчитанного в программе Genesis и вычисленного непосредственно из распределения электронов в моделируемом пучке, при движении заряженных частиц вдоль структуры. Несмотря на то, что повороты являются ахроматическими (области 5 и 6 на рис. 5), группировка в них полностью не сохраняется из-за ненулевого значения продольной дисперсии пустых промежутков, т.е. элемента транспортной матрицы R_{56} . Также рис. 5 показывает отличие значения микрогруппировки электронного пучка, вычисленной по его направлению движения (область 3), от величины, определяемой с помощью программы Genesis, вдоль оптической оси резонатора (область 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанных вычислений был получен режим ахроматического поворота электронного пучка в третий ондулятор, осуществляемого в том числе с помощью дополнительного дипольного поля, создаваемого специально сминутой квадрупольной линзой относительно траектории движения электронов. Данное изменение в магнитной структуре не вносит дополнительных неудобств в работу ЛСЭ для пользователей, так как значения токов в квадрупольных линзах между ондуляторами в обычных режимах генерации достаточно малы.

В 2018 г. перед летней профилактической остановкой ускорителя был проведен эксперимент, в качестве начальных параметров которого использовались данные из проделанных расчетов. Была получена генерация основной моды излучения в режиме с отклоненным электронным пучком в третьем ондуляторе и зарегистрировано излучение, попадающее в зеркало электронного вывода. Как показывают проделанные расчеты, его основную часть должно составлять именно излучение электронного вывода, превышающее рассеянную основную моду в 6 раз. Однако на данный момент полученные экспериментальные данные не позволяют это однозначно утверждать. Для этого в последующих экспериментах будет изучаться детектируемое излучение. Исследования по запуску системы электронного вывода будут продолжены.

Настоящее исследование было поддержано грантом 14-50-00080 Российского научного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Винокуров Н.А., Шевченко О.А.* // УФН. 2018. № 188. С. 493.
2. *Douglas D. et al.* // Proc. of IPAC 2012. New Orleans. Louisiana. USA. 2012. P. 2111.
3. *Socol Y. et al.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2011. V. 14. P. 040702.
4. *Gavrilov N.G. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 1991. V. 304. P. 63.
5. *Kulipanov G.N., Sokolov A.S., Vinokurov N.A.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 1996. V. 375. P. 576.
6. *Quick D.D. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 1994. V. 341. P. ABS92.
7. *Blau J. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 1994. V. 341. P. ABS94.
8. *Hahn S.J. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 1995. V. 358. P. 167.
9. *Hahn S.J., Fawley W.M.* // Proc. of SPIE. 1995. V. 2376. P. 116.
10. *Matveenko A.N. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 603. P. 38.
11. *Kulipanov G.N. et al.* // IEEE Trans. on THz Sci. and Techn. 2015. V. 5. №. 5. P. 798.
12. *Borland M.* Advanced Photon Source LS-287, 2000.
13. *Кубарев В.В.* Дисс. д-ра физ.-мат. наук. ИЯФ СО РАН. 2015.
14. *Reiche S.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 429. P. 243.