

18-я РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО УСКОРИТЕЛЯМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ (Обнинск, октябрь 2002 г.)

Секция «Источники синхротронного излучения»

УДК 621.384.633.5/6

СОЗДАНИЕ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА НА ТЕСТОВОМ УСКОРИТЕЛЕ TESLA (DESY, Германия)

*Юрков М.В. * (ОИЯИ)*

Перспективы развития исследований с использованием синхротронного излучения связывают с источниками 4-го поколения, которые могут быть созданы на базе лазеров на свободных электронах рентгеновского диапазона. Работы по созданию таких лазеров проводятся международным сообществом ученых на тестовом ускорителе TESLA (DESY) [1—3]. Лазер производит когерентное излучение при однократном прохождении электронного пучка через длинный ондулятор [4—6]. Процесс генерации излучения развивается из дробового шума в электронном пучке, и выходное излучение имеет узкий спектр около резонансной длины волны. В линейном режиме с высоким усилением мощность излучения $P(z)$ увеличивается экспоненциально с длиной ондулятора [7—9]: $P(z) \propto \exp(z/L_g)$, где L_g — длина нарастания по мощности. Впервые излучение лазера в DESY зарегистрировано в 2000 г. [10]. Была показана возможность плавной перестройки излучения в диапазоне от 80 до 180 нм [11]. Осенью 2001 г. были получены предельные характеристики установки при работе в режиме насыщения [12, 13].

Фаза I лазера на свободных электронах. Основные параметры лазеров приведены в таблице. Детальное описание экспериментального оборудования представлено в работах [10—13]. Схема установки показана на рис. 1. Основными элементами установки являются линейный ускоритель с энергией электронов до 270 МэВ и ондулятор длиной 14,1 м. Электронные сгустки формируются в ВЧ-пушке с фотокатодом [14—16]. Далее происходит ускорение до 16 МэВ в сверхпроводящем бустерном ускорителе. На выходе бустера сгусток имеет продольный гауссовский профиль, и при заряде 3 нКл его длина равна 4 мм. Основной ускоритель состоит из двух сверхпроводящих модулей [17], разделенных магнитным компрессором [18]. Ондулятор представляет собой устройство на постоянных магнитах с фиксированным межполюсным зазором 12 мм [19—21]. Встроенные

*От коллектива TESLA.

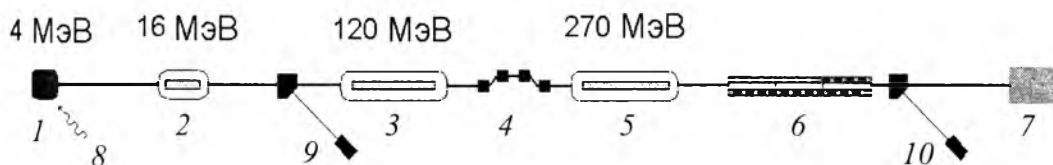
квадрупольи производят градиент поля 12 Тл/м для обеспечения фокусировки электронного пучка в ондуляторе. Ондулятор состоит из трех сегментов длиной по 4,5 м. В зазорах между сегментами ондулятора (0,3 м) расположены элементы диагностики пучка. В вакуумной камере размещены датчики положения пучка и витки коррекции орбиты.

Параметры лазеров, разрабатываемых в рамках проекта TESLA

Характеристики	Фаза I	Фаза II	TESLA
Электронный пучок:			
энергия, ГэВ	0,24—0,27	0,25—1,0	10—25
нормализованный эмиттанс, π -мм-мрад	6	2	1,4
заряд в сгустке, нКл	1—3	1	1
длина сгустка, мкм	30°	48	25
поперечный размер, мкм	110	100	25—40
частота повторения в 1 с	До 70	До 72 000	До 30 000
Ондулятор:			
период, см	2,73	2,73	3,8—8,6
магнитное поле, Тл	0,47	0,47	0,45—1,37
длина, м	14,2	27	60—240
Излучение:			
энергия, эВ	12	10—200	200— $1,2 \cdot 10^4$
длина волны, нм	100	6—100	0,1—6
пиковая яркость, фот./($\text{с} \cdot \text{мрад}^2 \cdot \text{мм}^2$) (0,1% ш.п.)	$4 \cdot 10^{28}$	$4 \cdot 10^{30}$	$6 \cdot 10^{32}$ — $5 \cdot 10^{33}$
средняя яркость, фот./($\text{с} \cdot \text{мрад}^2 \cdot \text{мм}^2$) (0,1% ш.п.)	10^{17}	10^{23}	$3 \cdot 10^{23}$ — $1,6 \cdot 10^{25}$
ширина спектра, %	1	0,5	0,7—0,08
*«Излучающая» часть сгустка.			

Продольной формой электронного сгустка на входе в ондулятор управляют путем настройки магнитного компрессора, фаз ВЧ-пушки и ускоряющего модуля. На входе в ондулятор распределение заряда вдоль сгустка существенно отличается от гауссовского (рис. 2, а). Излучение лазера генерируется головной частью сгустка, имеющей больший ток, в то время как длинная хвостовая часть не вносит вклада в процесс усиления.

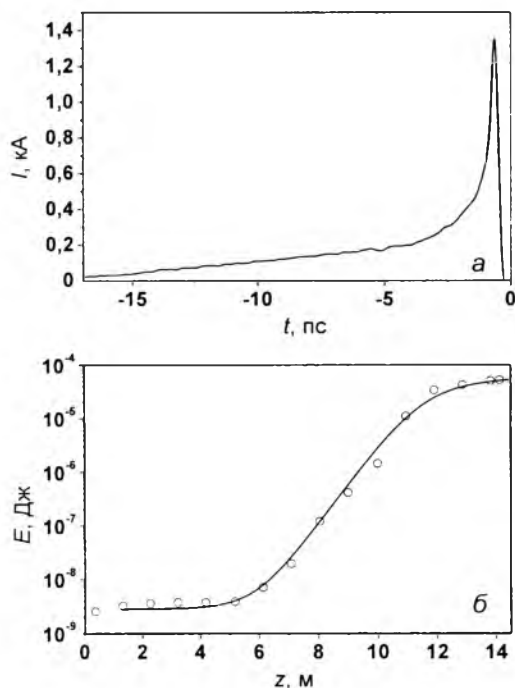
В ходе работ были измерены основные характеристики лазера на свободных электронах: энергия в импульсе излучения, спектральные и угловые характеристики излучения, статистические свойства излучения [12, 13]. На рис. 2, б показана зависимость средней энергии в импульсе излучения как функция активной длины ондулятора (длины области перекрытия электронного сгустка и излучения). Активная длина изменяется путем искажения орбиты электронного пучка с помощью



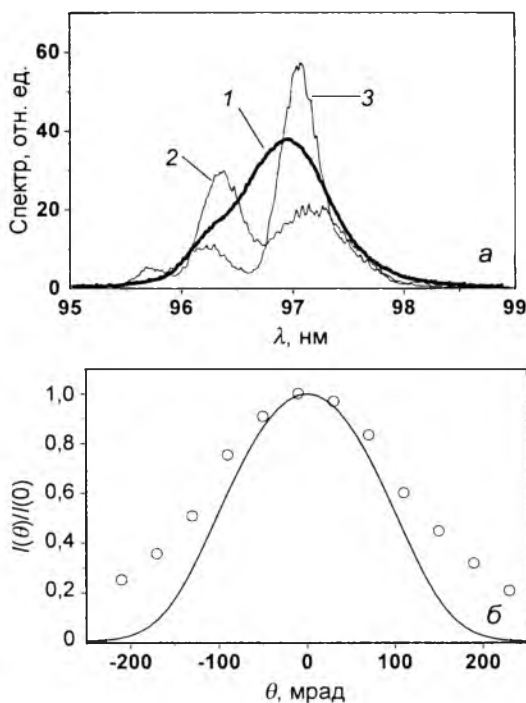
Р и с. 1. Схема лазера на свободных электронах рентгеновского диапазона на тестовом ускорителе TESLA (фаза I): 1 — ВЧ-пушка с фотокатодом; 2 — предускоритель; 3, 5 — сверхпроводящая ВЧ-структура; 4 — магнитный компрессор; 6 — ондулятор; 7 — диагностика фотонного пучка; 8 — лазер, управляющий ВЧ-пушкой; 9, 10 — диагностическая аппаратура электронного пучка

корректирующих обмоток ондулятора. Когда орбита электронов существенно отличается от прямолинейной, процесс усиления излучения подавлен, и датчик излучения фиксирует уровень энергии спонтанного излучения около 2,5 нДж (в апертуре диаметром 10 мм). Последовательное спрямление траектории электронного пучка приводит к включению процесса усиления вдоль длины ондулятора. Начиная с некоторой длины наблюдается экспоненциальный рост энергии излучения. В конце ондулятора кривая усиления выходит на плато на уровне от 30 до 100 мкДж в зависимости от настройки ускорителя. Ширина усредненного спектра излучения составляет 1% (рис. 3, а). Типичный спектр отдельного импульса содержит два пика, что соответствует числу продольных мод (числу волновых пакетов в импульсе излучения [9]) между 2 и 3. Длительность импульса излучения перестраивается в пределах от 30 до 100 фс путем соответствующего профилирования электронного сгустка (см. рис. 2, а). Рис. 3, б показывает диаграмму направленности излучения. С точностью проведенных измерений угловая расходимость излучения соответствует полной поперечной когерентности. Пересчет измеренных характеристик в пиковую яркость дает $4 \cdot 10^{28}$ фот./($\text{с} \cdot \text{мрад}^2 \cdot \text{мм}^2$) (0,1% ш.п.), что в 10^8 раз превышает яркость лучших источников синхротронного излучения 3-го поколения.

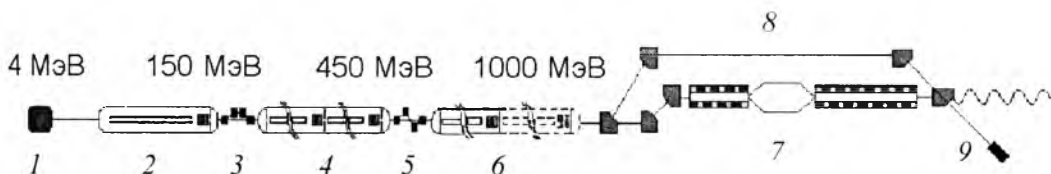
Фаза II лазера на свободных электронах. Это следующий шаг в развитие фазы I в сторону уменьшения длины волны до 6 нм [1—3]. Основные дорогостоящие элементы фазы I, такие, как ондулятор, с незначительными модификациями используются в фазе II. Реализация этой части проекта будет проведена в два этапа. Первый этап планируется как непосредственное развитие фазы I в область корот-



Р и с. 2. Распределение тока вдоль сгустка (а) и зависимость средней энергии в импульсе излучения от длины ондулятора (б): $\circ$ — экспериментальные результаты; — — расчеты с помощью кода FAST [22] (длина волны излучения 98 нм)



Р и с. 3. Спектр излучения лазера на свободных электронах (а) и диаграмма направленности излучения (б): 1 — усредненный спектр; 2, 3 — спектры отдельных импульсов



Р и с. 4. Схема лазера на свободных электронах рентгеновского диапазона на тестовом ускорителе TESLA (фаза II): 1 — ВЧ-пушка с фотокатодом; 2, 4, 6 — ускоряющие секции; 3, 5 — магнитные компрессоры; 7 — ондулятор; 8 — канал транспортировки электронного пучка; 9 — сброс электронного пучка

кой длины волны. Для достижения насыщения длина ондулятора будет увеличена в 2 раза (до 30 м). Второй этап предполагает пуск двухкаскадного лазера на свободных электронах с увеличенной яркостью излучения [23]. На этом этапе будут установлены два ондулятора, разделенные монохроматором и дисперсионной секцией. Начало ввода в строй фазы II планируется на 2003 г.

Схема фазы II лазера на свободных электронах приведена на рис. 4. Электронный сгусток формируется в ВЧ-пушке с фотокатодом и ускоряется до энергии 1 ГэВ в шести сверхпроводящих ускоряющих модулях. При энергии 150 и 450 МэВ сгусток проходит через магнитные компрессоры, что обеспечивает его сжатие от 2 мм на выходе ВЧ-пушки до 50 мкм на входе в ондулятор. Пиковый ток составляет $\sim 2,5$ кА. Схема установки допускает обход ондулятора, что является важным при настройке ускорителя. Дипольный магнит отклоняет электронный сгусток в поглотитель, излучение лазера направляется в экспериментальный зал для пользователей (рис. 5).

Рентгеновский лазер на свободных электронах на TESLA. В рамках проекта TESLA планируется строительство рентгеновской лаборатории [24—27]. Пиковая яркость излучения составит $\sim 10^{34}$ фот./((с·мрад²·мм²)) (0,1% ш.п.). Энергия фотонов будет плавно перестраиваться в диапазоне от 200 эВ до 12 кэВ. Излучение будет поперечно когерентным. Возможность генерации сверхкоротких импульсов откроет дополнительные перспективы для проведения экспериментальных исследований. Рентгеновская лаборатория будет располагаться в 16 км к северо-востоку от DESY [27]. Ядром лаборатории являются ондуляторы для генерации когерентного излучения. Излучение по каналам транспортировки доставляется в экспериментальный зал, допускающий размещение до 20 пользовательских станций.

Авторы выражают признательность за техническую поддержку при проведении экспериментов коллективу TESLA, объединяющему 44 института из 10 стран.



Р и с. 5. Экспериментальный зал для пользователей излучения (фаза II, передний план). туннель ускорителя. здание фазы I (дальний план)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brefeld W., Faatz B., Nikitina Y.M. e.a.** Parameter study on phase I of the VUV-FEL at the TESLA test facility. — Nucl. Instrum. Meth., 1997, v. A393, p. 119—124.
2. **Aberg T., Al-Shamery K., Bacher R. e.a.** A VUV FEL at the TESLA Test Facility at DESY (Conceptual Design Report). DESY Print TESLA—FEL 95-03. 1995.
3. **Rossbach J.** A VUV free electron laser at the TESLA test facility at DESY. — Nucl. Instrum. Meth., 1996, v. A375, p. 269—273.
4. **Kondratenko A.M., Saldin E.L.** Generating of coherent radiation by a relativistic electron beam in an undulator. — Part. Accelerators. 1980, v. 10, p. 207—216.
5. **Derbenev Ya.S., Kondratenko A.M., Saldin E.L.** On the possibility of using a free electron laser for polarization of electrons in storage rings. — Nucl. Instrum. Meth., 1982, v. 193, p. 415—421.
6. **Bonifacio R., Pellegrini C., Narducci L.M.** — Opt. Commun., 1984, v. 50, p. 373.
7. **Kim K.** Three-dimensional analysis of coherent amplification and self-amplified spontaneous emission in free-electron lasers. — Phys. Rev. Lett., 1986, v. 57, p. 1871—1874.
8. **Krinsky S., Yu L.H.** Output power in guided modes for amplified spontaneous emission in a single-pass free-electron laser. — Phys. Rev., 1987, v. A35, p. 3406—3423.
9. **Saldin E.L., Schneidmiller E.A., Yurkov M.V.** The Physics of Free Electron Lasers. Berlin. Springer-Verlag. 1999.
10. **Andruszkow J., Aune B., Ayvazyan V. e.a.** First observation of self-amplified spontaneous emission in a free-electron laser at 109 nm wavelength. — Phys. Rev. Lett., 2000, v. 85, p. 3825—3829.
11. **Rossbach J.** Observation of self-amplified spontaneous emission in the wavelength range from 80 to 180 nm at the TESLA test facility FEL at DESY. — Nucl. Instrum. Meth., 2001, v. A475, p. 13—19.
12. **Ayvazyan V., Baboi N., Bohnet I. e.a.** Generation of GW radiation pulses from a VUV free-electron laser operating in the femtosecond regime. — Phys. Rev. Lett., 2002, v. 88, p. 10482—10485.
13. **Ayvazyan V., Baboi N., Bohnet I. e.a.** A new powerful source for coherent VUV radiation: demonstration of exponential growth and saturation at the TTF free-electron laser. — Europ. Phys. J., 2002, v. D20, p. 149—157.
14. **Carneiro J. e.a.** RF-gun for the TESLA test facility. — In: Proc. 1999 Part. Acc. Conf., 1999, p. 2027—2029.
15. **Sertore D., Schreiber S., Floettmann K. e.a.** First operation of cesium telluride photocathodes in the TTF injector RF gun. — Nucl. Instrum. Meth., 2000, v. A445, p. 422—426.
16. **Will I., Schreiber S., Liero A. e.a.** Running experience with the laser system for the RF gun based injector at the TESLA test facility linac. — Ibid., p. 427—431.
17. **Weise H.** Status of the TESLA test facility. — In: Proc. 1998 Linac Conf., 1998, p. 674—678.
18. **Limberg T., Weise H., Molodozhentsev A. e.a.** The bunch compression system at the TESLA test facility FEL. — Nucl. Instrum. Meth., 1996, v. A375, p. 322—325.
19. **Pflueger J.** Undulators for SASE FELs. — Ibid., 2000, v. A445, p. 366—372.
20. **Hahn U., Pflueger J., Schmidt G.** Concept of electron beam diagnostic for the VUV SASE FEL at the TESLA Test Facility (TTF FEL) at DESY. — Ibid., 1999, v. A429, p. 276—280.
21. **Hahn U., Hartog P., Pflueger J. e.a.** Design and performance of the vacuum chambers for the undulator of the VUV FEL at the TESLA test facility at DESY. — Nucl. Instrum. Meth., 2000, v. A445, p. 442—447.
22. **Saldin E.L., Schneidmiller E.A., Yurkov M.V.** FAST: a three-dimensional time-dependent FEL simulation code. — Ibid., 1999, v. A429, p. 233—237.
23. **Feldhaus J., Saldin E., Schneider J. e.a.** Possible application of X-ray optical elements for reducing the spectral bandwidth of an X-ray SASE FEL. — Opt. Commun., 1997, v. 140, p. 341—352.
24. **Wiik B.** The TESLA project: an accelerator facility for basic science. — Nucl. Instrum. Meth., 1997, v. A398, p. 1—17.
25. **Conceptual Design of 500 GeV $e+e$ -Linear Collider with Integrated X-ray Facility.** Ed. R. Brinkmann e.a. DESY 1997-048. ECFA 1997-182. Hamburg, May 1987.
26. **TESLA Technical Design Report. Part V The X-ray free electron laser.** DESY 2001-11. ECFA 2001-209, TESLA Report 2001-23. TESLA-FEL 2001-05.
27. **Тринес Д.** Статус проекта TESLA (Германия). — Атомная энергия. 2002. т. 93, вып. 6, с. 421—425.