УДК 621.384

ДРАЙВЕР ТЕРАГЕРЦОВЫХ ЛСЭ НА БАЗЕ 20 МЭВ-НОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЕрФИ

Э.О. АЛЕКСАНЯН¹, Э.М. ЛАЗИЕВ¹, М.Л. МОВСИСЯН²

¹Ереванский физический институт им. А.И.Алиханяна, Армения

²Ереванский государственный университет, Армения

(Поступила в редакцию 1 апреля 2008 г.)

Рассмотрена возможность использования линейного ускорителя элек-тронов на энергию 20 МэВ ЕрФИ (ЛУЭ-20) в качестве драйвера комплекса лазеров на свободных электронах терагерцового диапазона. Приведены структурная схема и основные параметры ЛУЭ-20. Определены требования к электронному пучку и системам ЛУЭ.

1. Введение

В соответствии с программой модернизации Ереванского электрон-ного синхротрона, разработанной в конце 1980-х годов [1], предполагалось создание нового инжектора – линейного ускорителя электронов на энергию 120 МэВ. Был разработан проект такого ускорителя и изготовлены головные образцы оборудования. В силу известных причин проект не был в целом реализован, однако изготовленное оборудование позволило создать в ЕрФИ стенд, включающий в себя линейный ускоритель на энергию 20 МэВ (ЛУЭ-20) [2]. Поскольку надеяться на создание нового инжектора в настоящее время нельзя, то в ЕрФИ разрабатывается концептуальный проект лазера на свободных электронах терагерцового диапазона (ТГц-ЛСЭ) на базе ЛУЭ-20. В настоящей работе приводятся краткое описание ЛУЭ-20, его параметры, формулируются требования к электронному пучку и основным системам ЛУЭ, позволяющие реализовать поставленную задачу.

2. ЛСЭ терагерцового диапазона

Терагерцовые волны (Т-лучи) охватывают область частот $^{-10^{11}-10^{14}}$ Гц, т.е. занимают промежуток между микроволновым ($\lambda ~ 3$ мм) и инфра-красным ($\lambda ~ 3$ мкм) областями электромагнитного спектра. Огромный ин-терес к этому диапазону обусловлен целым рядом свойств, присущих Т-лучам, которые и объясняют «терагерцовый бум», охвативший исследова-тельские центры во многих странах. Отметим некоторые из этих свойств, уже получивших широкое применение как в прикладных, так и фундамен-тальных исследованиях [3,4]. В этом диапазоне лежат спектры многих важных органических молекул, включая белки и ДНК. Фононные резонансы кристаллических решеток также попадают в эту область частот. Благодаря своей неинвазивности терагерцовые волны, в отличие от

рентгеновских, позволяют проводить безвредную для человека диагностику, в том числе раковых опухолей, глубины и степени ожогов, не нанося вреда биологическим объектам. Особое место занимают Т-лучи в системах контроля и обнаружения оружия и наркотиков. Несмотря на наличие такого широкого спектра потенциальных возможностей Т-лучей, эта область длин волн является наименее освоенной. Проблема в том, что методы как электроники, характерные для генерации микроволнового излучения, так и фотоники неэффективны в области ТГц.

В настоящее время наиболее распространенными методами генерации в этой области частот являются оптическое параметрическое усиление, гене-рация разностной частоты, параметрическая флуоресценция.

Для получения терагерцового излучения высокого качества решающую роль играют лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) [5], использующие электронные пучки релятивистских энергий, полученные в ускорителях. В настоящее время в мире функционирует, проектируется и сооружается ряд таких ЛСЭ [6].

3. Схема ЛСЭ и требования к электронному пучку

На рис.1 приведена классическая схема ЛСЭ, основными элементами которого являются электронный пучок, ондулятор (виглер), создающий пространственнопериодическое магнитное поле, и оптический резонатор. Когда релятивистский электронный пучок пролетает через пространственно-периодическое магнитное поле, то он излучает электромагнитные волны (магнитотормозное излучение, которое в нашем случае называется ондуляторным излучением). Это излучение накапливается в оптическом резонаторе, образованном двумя зеркалами. Часть излучения выводится через одно из зеркал. Максимум спонтанного ондуляторного излучения приходится на частоту, соответствующую длине волны

$$\lambda_r = \frac{\Lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right),\tag{1}$$

где Λ_u – период ондулятора, γ – энергия электронов, K – параметр ондуляторности, равный $K = eB_0\Lambda_u/2\pi mc^2 = 0.943\Lambda_u$ [cm] B_0 [T]. Здесь B_0 – магнитное поле ондулятора. Величина K определяет характер спектра излучения: если K 1, то излучение монохроматично на длине волны, определяемой (1); с увеличением $K(K \approx 1)$ мощность излучения на длине волны (1) максимально и в спектре излучения начинают появляться высшие гармоники. При дальнейшем увеличении K(K = 1) спектр излучения становится непрерывным. Условно принято, что если K < 1, то периодическая магнитная структура является ондулятором, если же K > 1 – виглером. Перестройка частоты излучения осуществляется как изменением энергии пучка, так и изменением параметров ондулятора.



Рис.1. Упрощенная структура ЛСЭ. 1 – лазерный пучок; 2 – зеркало; 3 – электронный пучок; 4 – ондулятор; 5 – оптический резонатор.

Качество излучения ЛСЭ в самом общем случае определяется всеми его компонентами: параметрами электронного пучка, параметрами ондулятора и параметрами оптического резонатора. В этой работе мы сформулируем требования к электронному пучку и, исходя из этих требований, определим, какие нужно сделать изменения в существующем ЛУЭ для того, чтобы удовлетворить эти требования. Будем исходить из критериев, приведенных в [7-10].

Коэффициент усиления мощности излучения за один пролет планар-ного ондулятора определяется следующей формулой [7]:

$$g_0 = \frac{4\pi}{\gamma} \frac{\lambda_r L_u}{\Sigma_e} \frac{I_e}{I_\alpha} F\xi \left(\frac{\Delta r_{rad}}{r_{rad0}}\right)^{-2}, \qquad (2)$$

где I_e – ток микросгустка, $\xi = \frac{1}{4} \frac{K^2}{(1+K^2/2)} [J_0(Q) - J_1(Q)], Q = (1+K^2/2), I_e$ – альфеновский ток, $L_u = \lambda_r N_u$ – длина, N_u – число периодов ондулятора, F – коэффициент перекрытия электронного и оптического пучков, r_{rad} – радиус оптического пучка, r_{rad0} – то же в области сужения пучка. Обычно поперечное сечение электронного пучка много меньше поперечного сечения опти-ческого пучка и тогда (2) может быть записано в виде

$$g_0 = \frac{16\pi}{\gamma} \frac{\lambda_r L_u}{\Sigma} \frac{I_e}{I_\alpha} N^2 \xi , \qquad (3)$$

где $\Sigma = 2\pi \sqrt{\left(\frac{r_{rad}^2}{4} + \sigma_x^2\right)\left(\frac{r_{rad}^2}{4} + \sigma_y^2\right)}$ – свертка поперечных сечений оптического и

электронного пучков, $\sigma_{x,y}$ – поперечные размеры электронного пучка по *x* и *y*. Поскольку поперечное сечение гауссовского оптического пучка меняется вдоль ондулятора, то r_{rad} является усредненным значением по L_u . С учетом энергетического разброса электронного пучка коэффициент усиления будет равен [10]

$$G = \frac{0.85g_0 + 0.19g_0^2}{1 + (1.7 + 0.32g_0)\Delta_e^2}.$$
 (4)

В этой работе мы оцениваем возможности реализации ТГц-ЛСЭ на базе ЛУЭ-20. Из предварительно выполненного анализа следует, что ЛУЭ-20 может служить драйвером комплекса ЛСЭ, перекрывающих диапазон от 15 мкм до 500 мкм: ЛСЭ-1 (100–500 мкм); ЛСЭ-2 (30–120 мкм) и ЛСЭ-3 (15–40 мкм). Обратимся теперь к критериям оценки качества электронного пучка как драйвера ЛСЭ [8-10].

Как было отмечено выше, энергетический разброс и эмиттанс электронного пучка ограничивают коэффициент усиления ЛСЭ. Ограничение на энергетический разброс определяется следующим неравенством:

$$\frac{\delta E}{E} << \left(\frac{\Delta r_{rad}}{r_{rad0}}\right) = \frac{1}{N_u} \,. \tag{5}$$

Максимальное значение N_u этого диапазона не превышает 100 (см. табл.1), и, следовательно, можно принять $\delta E/E \ll 0.01$. Эмиттанс электронного пучка должен удовлетворять условию $\varepsilon \leq \lambda_r/\pi$.

Перейдем теперь к оценке требуемой длительности микросгустков. При излучении в ондуляторе оптический импульс "скользит" относительно электронного сгустка. Длина "проскальзывания" (slippage) равна $\Delta_{sl} = (c - v_0)\Delta t = N_u\lambda_r$, откуда длина микросгустка $\sigma_e > N\lambda_r$. С другой стороны, от длительности микросгустка зависят как ток сгустка I_e , так и $\delta E/E$, поэтому принимаем, что $N\lambda_r < \sigma_e < 1.5N\lambda_r$.

Предварительные требования к электронным пучкам комплекса ЛСЭ приведены в табл.1. Импульс излучения при параметрах, приведенных в табл.1, будет иметь плато насыщения порядка 3-4 мкс.

Параметры	ЛСЭ-1	ЛСЭ-2	ЛСЭ-3
Длина волны излучения, мкм	100–500	30–120	15–40
Энергия электронного пучка, МэВ	1.5–3.0	5.0-10.0	10.0-20.0
Энергетический разброс, $\delta E/E$	0.015	0.01	0.007
Длина микросгустка, σ_e , псек	~9	~7	~5
Заряд в сгустке, пК	~300	~300	~300
Пиковый ток микросгустка, А	~30	~40	~60
Нормализованный эмиттанс, π мм мрад	~25		
Максимальная частота следования микросгустков, МГц	~ (466 или 3000)		
Максимальная длительность макроимпульса, мкс	7.5		
Частота следования макроимпульсов, Гц	6.25; 12.5; 25; 50; 100		

Табл.1. Параметры электронных пучков комплекса ЛСЭ.

4. ЛУЭ-20 и параметры электронного пучка

Упрощенная структурная схема ЛУЭ-20 приведена на рис.2.

Рис.2. Структурная схема ЛУЭ-20. 1 – источник электронов; 2 – форин-жектор; 3 – инжекторная секция; 4 – основная ускоряющая секция; 5 – магнитные линзы; 6 – мониторы пучка; 7 – распределительный магнит – анализатор спектра энергии электронов; 8 – ахроматическая система параллельного переноса электронного пучка; 9 – консоли датчиков пучка; 10 – поглотитель электронного пучка; 11 – мощная (20 МВт) клистронная станция с волноводным трактом; 12, 13 – консоли 7 и 8, соответственно; 14 – СВЧ нагрузка на выходе 3 и 4; А, В, С, D – выведенный электронный пучок; ИМ – импульсный модулятор источника электронов.



Рис.3. Временная структура тока ускоренного пучка ЛУЭ-20.

Временная структура тока ускоренного пучка электронов I_e показана на рис.3. Частота следования сгустков $\delta \sim 3$ ГГц ($T_0 \sim 300$ псек), длительность микросгустков ~ 30 псек соответствует фазовой протяженности $\sim 36^\circ$ ((18°) на частоте ~ 3 ГГц, что подтверждается измеренным энергетическим разбросом электронного пучка (5.0%. Максимальная длительность макроимпульса составила 7.5 мксек при максимальной частоте следования 100 Гц. Как следует из сказанного, при скважности 10 последовательности микро-сгустков в макроимпульсе, ускоренный заряд, переносимый микросгустком, составляет 0.3 нК, что соответствует току 10 А. Таким образом, исходя из сказанного, мы сможем оценить характеристики излучения ЛСЭ и сформу-лировать требования к отдельным системам ЛУЭ-20. Следует отметить, что ЛУЭ-20 создавался как головная часть нового инжектора синхротрона и что требования к электронному пучку, диктуемые условиями инжекции в син-хротрон, и требования к пучку драйвера ЛСЭ различны.

Для того, чтобы обеспечить требуемые параметры электронного пучка (табл.2) необходимо ввести в структуру ЛУЭ-20 ряд существенных изменений: 1) заменить существующий источник электронов на ВЧ-пушку с термокатодом на частоте 466 МГц или 3000 МГц, которая позволит получить ускоренные сгустки с энергией 2–3 МэВ с относительно малой фазовой протяженностью и малым энергетическим разбросом. Выбор частоты 466 МГц связан с тем, что в ЕрФИ имеется в наличии генераторно-ускоряющий модуль на эту частоту, изготовленный в рамках программы модернизации синхротрона; 2) создать системы компрессии сгустков после источника элек- тронов и первой ускоряющей секции; 3) полностью модернизировать сис-тему СВЧ питания ЛУЭ, имея в виду, в первую очередь, замену задающего генератора с большей стабильностью поддержания частоты и низким уров-нем амплитудных и фазовых шумов, которые вызывают недопустимый для драйвера ЛСЭ джиттер (jitter) частоты следования микросгустков. Должна быть модернизирована также система импульсного питания мощных клис-

380

Параметры	Значения	
Номинальная энергия, МэВ	20	
Номинальный импульсный ток, А	1.0	
Диапазон регулирования энергии, МэВ	5–40	
Диапазон регулирования импульсного тока, А	0.01–1.5	
Длительность импульсного тока, мксек	0.5–7.5	
Частота повторения импульсов, Гц	12.5; 25; 50; 100	
Частота повторения электронных сгустков, МГц	2796.6	
Энергетический разброс для 80% электронов (%) при 1.0 А	± 5.0	
Стабильность тока, %	±5.0	
Нормализованный эмиттанс, π мм мрад	50	
Длина секции, м	2	
Входная СВЧ мощность, МВт	18	
КПД ускоряющей структуры, %	60	
Число ускоряющих секций	2	
Число клистронов	2	
Источник электронов (триодный, термокатод), кВ	150	

Табл.2. Основные параметры ускоренного электронного пучка ЛУЭ-20.



Рис.4. Структурная схема комплекса терагерцовых ЛСЭ на базе ЛУЭ-20. 1 – ВЧ источник электронов (3 МэВ); 2 – компрессор сгустка; 3 – распределительный магнит; 4 – зеркало; 5 – поглотитель электронного пучка; 6 – линейный ускоритель на 10 МэВ; 7 – линейный ускоритель на 20 МэВ.

тронов и введена система стабилизации цепи питания промежуточного усилителя на КИУ-18. Система СВЧ питания ЛУЭ должна быть охвачена цепью обратной связи для обеспечения требуемой стабилизации параметров СВЧ импульса, подаваемого на вход ускоряющих секций ЛУЭ; 4) разработать систему диагностики ускоренных сгустков (длительность и фазовая протяженность сгустков, положение центра сгустка относительно ускоряющей волны, распределение заряда в сгустке и др.).

На рис.4 приведена предлагаемая упрощенная структурная схема комплекса терагерцовых ЛСЭ.

В заключение считаем нужным отметить, что из нашего предварительного рассмотрения следует, что ЛУЭ-20 вполне может служить базой драйвера комплекса ЛСЭ ТГц диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

- A. Amatuni, E. Laziev, et al. "The Prospects of Improvement and Development of Accelerator Installations at Yerevan Physics Institute". Proc. of the European Particle Accelerator Conference, Rome, June 7-11, 1, 305 (1988). http://accelconf.web.cern.ch /AccelConf/e88/PDF/EPAC1988 0305.PDF.
- 2. E.M. Laziev et al. "Yerevan 20 MeV Linac Test-Facility". Proc. of the LINAC-94, Tsukuba, 2, 926 (1994).
- 3. Opportunities in THz Science. Report of a DOE-NSF-NIH Workshop held February 12–14, 2004, Arlington, VA. http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/THz_rpt.pdf.
- "Генерация и применение терагерцового излучения". Материалы первого рабочего совещания, 24– 25 ноября 2005 г., Новосибирск, 2006.
- 5. "THz output from 4GLS and its prototype ERLP", 4GLS Conceptual Design Report, 2006, http://www.4gls.ac.uk.
- W.B. Colson et al. Free Electron Lasers in 2004. Proc. of the 27th International Free Electron Lasers Conference, 21–26 August 2005, Stanford, California, USA, pp.347–350, 2005. http://cern.ch/AccelConf/f04/papers/THPOS58/THPOS58.PDF.
- 7. E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller, M.V. Yurkov. The Physics of Free Electron Lasers. Berlin, Springer-Verlag, 2000.
- 8. A.F. Wrulich. Free Electron Lasers. CAS, 1–13 October 2006, Zakopane, Poland, 2006. http://cas.web.cern.ch/cas/Zakopane-2006/PDFs/Wrulich-FEL.pdf.
- 9. A. Gover, E. Dyunin. Coherence of e-Beam Radiation Sources and FELs. Proc. of FEL-2006, BESSY, Berlin, Germany, 2006, pp.1–12. http://cas.web.cern.ch/cas/ Zakopane-2006/PDFs/Wrulich-FEL.pdf.
- 10. T. Tomimasu. NIM in Physics Research A, **393**, 230 (1997).

DRIVER OF THZ-FELS BASED ON THE YERPHI 20 MeV LINEAR ACCELERATOR

E.O. ALEKSANYAN, E.M. LAZIEV, M.L. MOVSISYAN

An opportunity of using the 20 MeV Linac at YerPhI as a driver of THz-FELs is considered. The basic parameters of the Linac and FELs are given. Requirements to the electron beam and Linac systems are determined.