

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ УЗКОПОЛОСНЫЙ ЛСЭ-ГЕНЕРАТОР С БРЭГГОВСКИМ РЕЗОНАТОРОМ И ОБРАТНЫМ ВЕДУЩИМ ПОЛЕМ (начальные эксперименты)

*В.А.Богаченков, Н.С.Гинзбург, А.А.Каминский,
А.К.Каминский, Н.Ю.Песков, В.П.Саранцев,
С.Н.Седых, А.П.Сергеев, А.С.Сергеев*

1. Целью настоящей работы было создание узкополосного ЛСЭ-генератора (лазера на свободных электронах) миллиметрового диапазона длин волн, имеющего высокую эффективность. На этом пути мы попытались объединить высокие селективные свойства брэгговских резонаторов [1] с достоинствами режимов работы ЛСЭ с так называемым обратным ведущим полем [2,3]. Предварительные исследования показали возможность формирования в таких режимах винтовых электронных пучков с малой дисперсией параметров и, как следствие, возможность достижения высокого КПД [2,3], а также слабую зависимость КПД от яркости пучка [4].

2. Условия реализации режима одночастотной генерации в ЛСЭ с двухзеркальными брэгговскими резонаторами исследовалась при численном моделировании процесса установления автоколебаний. На рис. 1, а приведена зависимость электронного КПД от времени при параметрах системы, близких к оптимальным экспериментальным значениям. При моделировании использовался пространственно-временной подход, учитывающий дисперсионные характеристики брэгговских зеркал. Из рис. 1, а видно, что на начальной стадии переходный процесс сопровождается сильными осцилляциями КПД и соответственно мощности и частоты выходного излучения. Из анализа частотного спектра (рис. 1, б) и периода осцилляций можно сделать вывод, что на этой стадии происходят бегия различных продольных мод, попадающих в полосу отражений брэгговских зеркал и возбуждаемых на начальном этапе электронным пучком. Однако затем возникает нелинейная конкуренция, в результате которой побеждает одна из этих продольных мод и устанавливается режим стационарной одночастотной генерации на этой моде (рис. 1, в).

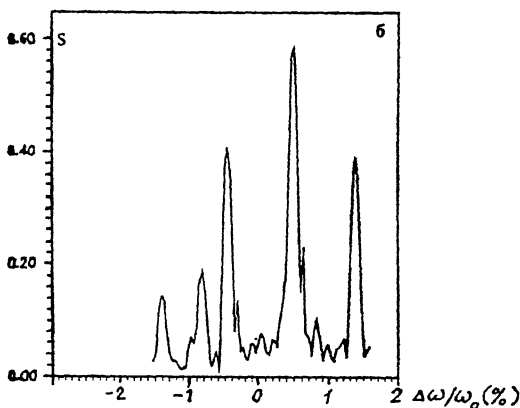
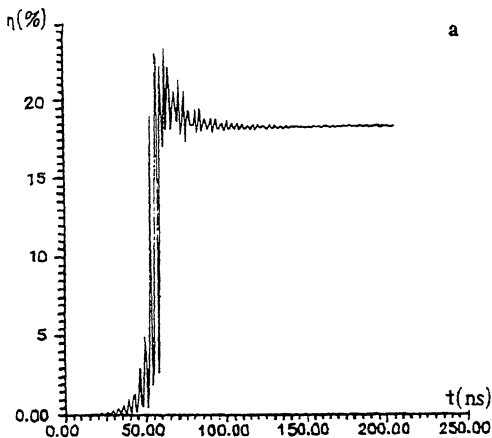


Рис. 1. Компьютерное моделирование процесса установления автоколебаний в ЛСЭ-генераторе с двухзеркальным брэгговским резонатором при параметрах системы, близких к оптимальным ($E_{\text{beam}} = 1$ МэВ, $I_{\text{beam}} = 150$ А, $B_0 = -2$ кГц, $B_w = 1.4$ кГц, $Q = 700$, $f = 31$ ГГц): а — зависимость электронного КПД от времени, б — спектр излучения в процессе установления колебаний ($t < 100$ нс), в — спектр излучения в стационарном режиме генерации ($t > 100$ нс).

Заметим также, что при излишне высоких коэффициентах отражения брэгговских зеркал происходило уменьшение среднего электронного КПД. При этом реализовался автомодуляционный режим генерации, в котором после окончания переходного процесса в спектре излучения присутствовало несколько гармоник, соответствующих возбуждению различных продольных мод брэгговского резонатора.

3. Используемая в эксперименте электродинамическая система ЛСЭ представляла собой резонатор, состоящий из участка круглого волновода диаметром 22 мм и двух брэгговских рефлекторов в виде отрезков волноводов того же

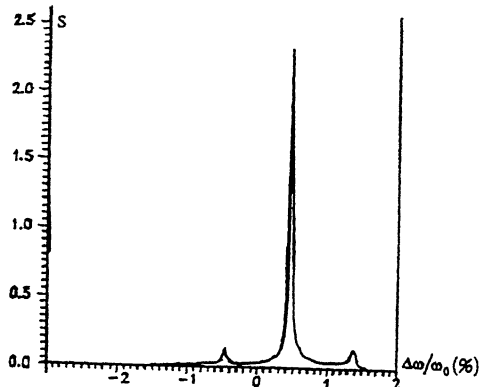


Рис. 1 (продолжение).

диаметра с гофрировкой боковых стенок в форме меандра с периодом 5.4 мм и глубиной 0.3 мм. Длина входного рефлектора (находящегося со стороны катода) составляла 16.2 см, выходного рефлектора (находящегося со стороны коллектора) — 10.8 см. В качестве рабочей была выбрана мода $H_{1,1}$ круглого волновода. В соответствии с расчетом холодные электродинамические измерения показали наличие двух эффективных отражений моды $H_{1,1}$ в брэгговских зеркалах: в волну обратной связи $E_{1,1}$ в окрестности частоты 31 ГГц и в волну обратной связи $E_{1,2}$ в окрестности частоты 37.5 ГГц (рис. 2). Ширина зон указанных отражений составляла около 3%. Максимальный коэффициент отражения рабочей волны (по амплитуде) составлял $R_1 \approx 0.87$ для входного зеркала и $R_2 \approx 0.75$ для выходного зеркала в полосе около 31 ГГц и соответственно $R_1 \approx 0.93$ и $R_2 \approx 0.83$ в полосе около 37.5 ГГц. Резонатор с такими рефлекторами и заключенным между ними отрезком регулярного волновода длиной 40 см имел 4 высокодобротных колебания, соответствующих разным продольным модам в каждой полосе. Максимальная добротность колебаний была около 700 в окрестности 31 ГГц (что соответствовало в компьютерных расчетах оптимальному по КПД режиму генерации) и 1300 в окрестности 37.5 ГГц.

Заметим, что в данном резонаторе существовали еще колебания, соответствовавшие резонансным отражениям рабочей волны $H_{1,1}$ во встречную волну того же типа ($H_{1,1}$) на частоте в окрестности 29 ГГц. Однако коэффициент отражения брэгговских рефлекторов в этом случае не превышал 50-60%, что оказывалось недостаточным для превышения порога самовозбуждения ЛСЭ-генератора.

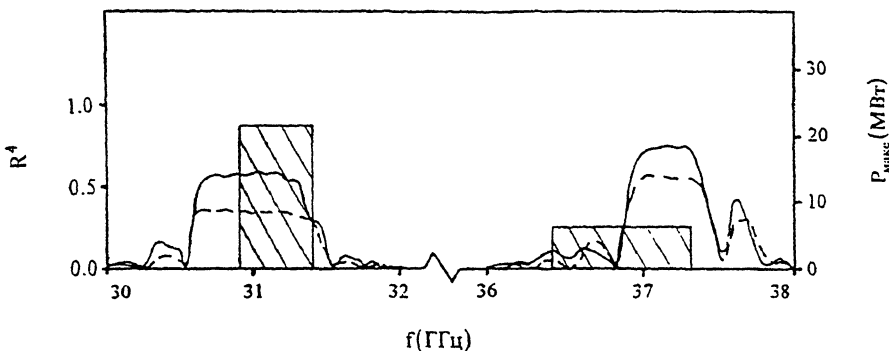


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения брэгговских зеркал от частоты в "холодных" электродинамических измерениях (сплошная линия — входное зеркало, пунктирная — выходное зеркало). Штриховкой обозначены частотные интервалы, в которые попадала зарегистрированная частота излучения ЛСЭ, высота заштрихованных областей соответствует максимальной мощности излучения.

4. Экспериментальное исследование ЛСЭ проводилось на линейном индукционном ускорителе ЛИУ-3000 (ОИЯИ, г. Дубна), формировавшем электронный пучок с током до 200 А, энергией частиц 1 МэВ, длительностью импульса 200 нс и частотой следования импульсов до 2 Гц [2]. Для раскачки поперечных колебаний электронов использовался спиральный вигглер с периодом 6 см и амплитудой поперечного поля B_w на оси до 3.5 кГс. Регулярная часть вигглера содержала 15 периодов, участки плавного включения и выключения ондуляторного поля были выполнены на 6 периодах. Вигглер располагался внутри соленоида, ведущее поле B_0 которого могло регулироваться от 0 до 10 кГс с возможностью изменения направления (знака) поля.

В качестве рабочего режима ЛСЭ в начальных экспериментах был выбран режим с обратным ведущим полем. В этом режиме последнее ориентировано таким образом, что направление вращения электронов в нем противоположно их вращению в спиральном вигглере. Преимуществом работы ЛСЭ в указанном режиме, далеком от циклотронного резонанса, является возможность формирования винтового электронного пучка с малым разбросом параметров при использовании адиабатически-плавного включения ондуляторного поля.

В эксперименте с помощью индукционных и резистивных датчиков регистрировались ток на выходе ускорителя и ток на выходе ЛСЭ, которые в различных режимах работы ускорителя соответственно составляли 130–180 и 80–150 А. Измерения мощности излучения проводились с помощью

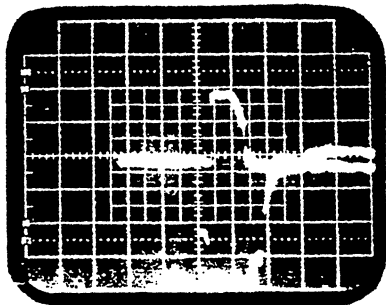


Рис. 3. Типичная осциллограмма мощности излучения (верхний луч, 10 МВт/дел) и осциллограмма тока на выходе ускорителя (нижний луч, 50 А/дел).

калориметра и калиброванных кристаллических детекторов. Спектр излучения измерялся с использованием набора запредельных волноводных фильтров с шагом по диаметру 0.1 мм, позволяющих определять ширину спектра в диапазоне длин волн 6–15 мм с точностью до 1.5%.

В результате экспериментов на выходе ЛСЭ наблюдалось циркулярно поляризованное излучение на рабочей моде $H_{1,1}$. Длительность СВЧ импульса составляла 100–150 нс (рис. 3). При этом были зарегистрированы два режима генерации на частотах, соответствующих указанным выше цепям обратной связи брэгговского резонатора (рис. 2). Настройка режима генерации осуществлялась изменением поля вигглера (приводящим к изменению поступательной скорости частиц). При прошедшем токе пучка 130 А в частотном интервале не шире $30.9 < f_s < 31.4$ ГГц (волна обратной связи $E_{1,1}$) была получена мощность излучения до 21 МВт, в частотном интервале не шире $36.4 < f_s < 37.3$ ГГц (волна обратной связи $E_{1,2}$) была получена мощность излучения до 5.5 МВт. КПД ЛСЭ по отношению к прошедшему току в этих режимах составили (16 ± 3) и $(4 \pm 1)\%$ соответственно. В соответствии с результатами численного моделирования одним из вариантов объяснения уменьшения эффективности ЛСЭ во второй полосе генерации может быть слишком высокая добротность собственных мод брэгговского резонатора в этом случае. Отметим, однако, что в обоих режимах ширина спектра излучения не превышала ширину соответствующей зоны эффективного отражения брэгговского резонатора. Поэтому, исходя из использованной методики измерения спектра излучения (с ошибкой, сравнимой с шириной полосы эффективного отражения брэгговских зеркал), можно утверждать, что излучение на-

блюдалось либо на одной из собственных продольных мод резонатора (в соответствии с результатами численного моделирования), либо, по крайней мере, на совокупности указанных мод.

При фокусировке выходного излучения сферическим зеркалом, расположенным на расстоянии около 1.5 м от выходного окна, наблюдался пробой атмосферы. Измеренная по фотографии пробоя длина волны соответствовала предшествующим измерениям спектра излучения.

5. Таким образом, в экспериментах с ЛСЭ-генератором с брэгговскими зеркалами в режимах с обратным ведущим полем были реализованы два неперекрывающихся по спектру режима генерации в окрестностях 31 и 37.5 ГГц с шириной полос около 1.5 и 3% соответственно. Измеренная максимальная выходная мощность в них составляла 21 МВт (КПД около 16%) и 5.5 МВт (КПД 4%). Параметры ЛСЭ, при которых наблюдалась генерация, и измеренные значения КПД с хорошей точностью соответствуют величинам, полученным при численном моделировании процесса возбуждения ЛСЭ-генератора, частоты и полосы излучения совпадают с результатами холодных измерений брэгговского резонатора.

Разработанный ЛСЭ-генератор несколько превосходит по эффективности лучшие известные нам аналоги [5,6]. К сожалению, использованная нами методика измерения с применением набора запредельных волноводных фильтров не позволяла разрешить спектры уже 1.5%, поэтому полученные значения ширины спектра излучения являются оценкой сверху. Тем не менее зарегистрированная ширина спектра излучения оказалась существенно уже, чем в проведенных ранее экспериментах с ЛСЭ-генераторами миллиметрового диапазона с брэгговскими зеркалами, работающими в режимах с прямым ведущим полем [6-8], где была использована подобная методика измерения спектра излучения.

Отметим также, что на данном этапе экспериментов не были оптимизированы условия нижекритичности пучка в область взаимодействия, не проводилась оптимизация по длине области взаимодействия и коэффициентам отражения брэгговских зеркал. Оптимизация параметров ЛСЭ и уточнение спектральных характеристик будут целью дальнейших экспериментов.

Данная работа поддерживается Международным научным фондом (грант № R8B300) и Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 94-02-04481 и № 95-02-05697).

Список литературы

- [1] *Bratman V.L., Denisov G.G., Ginsburg N.S., Petelin M.I.* // IEEE J. of Quant. Electr. 1983. V. QE-19. P. 282.
- [2] *Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Rubin S.B. et al.* // Particle Accelerators. 1990. V. 33. P. 189.
- [3] *Conde M.E., Bekefi G.* // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 3082.
- [4] *Kaminsky A.A., Kaminsky A.K., Sarantsev V.P. et al.* // Nuclear Instr. and Meth. 1994. V. A341. P. 105.
- [5] *Chu T.S., Hartemann F., Legorburu P.P. et al.* // Nuclear Instr. and Meth. 1992. V. A318. P. 94.
- [6] *Wang M., Wang Z., Chen J. et al.* // Nuclear Instr. and Meth. 1991. V. A304. P. 116.
- [7] *Mima K., Akiba T., Imasaki K. et al.* // Nuclear Instr. and Meth. 1991. V. A304. P. 93.
- [8] *Zambon P., Witteman W.J., van der Slot P.J.M.* // Nuclear Instr. and Meth. 1994. V. A341. P. 88.

Объединенный институт
ядерных исследований
Дубна

Институт прикладной
физики РАН
Н. Новгород

Поступило в Редакцию
23 августа 1995 г.