

Работы по запуску инфракрасного ЛСЭ в ФИАНе

В.А. Агафонов, А.И. Букин, А.В. Кольцов, В.Г. Куракин, А.Н. Лебедев
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия

Приводятся описание и результаты исследования лазера на свободных электронах на 100 мкм, представляющего первую очередь многоцелевого излучательного комплекса ФИАН.

Введение

В начале-середине 90-х годов в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН были начаты работы по созданию многоцелевого излучательного комплекса на основе действующего высоко-точного разрезного микротрона. Целью этих работ, которые в значительной мере способствуют обновлению экспериментальной базы института и расширению программы научных исследований, является создание на пучках разрезного микротрона нескольких ЛСЭ, перекрывающих диапазон 10–100 мкм. Программа исследований на комплексе [1, 2, 3, 4] охватывает ряд фундаментальных и прикладных направлений, среди которых физика и техника ускорителей и ЛСЭ, а также радиофизические и оптико-физические исследования на пучках электромагнитного излучения.

За последние 2–3 года, благодаря поддержке проекта в рамках межотраслевой научно-технической программы “Физика микроволн”, нам удалось значительно продвинуться вперед по реализации первой очереди комплекса. Завершены создание и монтаж основных элементов ЛСЭ-100 — перестраиваемого лазера на свободных электронах в далекой инфракрасной области (80–160 мкм). Была проведена тщательная настройка линейного ускорителя, в результате которой найдены новые режимы, обеспечивающие необходимые яркостные характеристики пучка-драйвера. Осуществлена юстировка тракта транспортировки и элементов лазера оптическим методом с использованием полупроводникового лазера, проведена настройка трехмагнитного ахроматического поворота, обеспечивающего эффективную инжекцию пучка в ЛСЭ. Исследована динамика электронов в поле импульсного спирального ондулятора. Ток до 350 мА на выходе из ондулятора, что соответствует току в отдельном сгустке на уровне 5–7 А, обеспечивает коэффициент усиления до 10% за проход при энергетическом разбросе в пучке 1,5% и эмиттансе 10^{-3} см*рад, что представляется достаточным для получения генерации. После установки в ЛСЭ зеркал и их юстировки был проведен первый сеанс, имеющий целью проверить надежную работу всего комплекса, провести настройку измерительной аппаратуры и, по возможности, попытаться обнаружить генерацию ЛСЭ. Хотя зафиксировать генерацию в первом сеансе (конец мая 2000 г.) не удалось, опыт сеанса и определенный запас по ключевым параметрам пучка, ондулятора и оптического резонатора обеспечивают оптимистический взгляд на перспективы успешной реализации первой очереди и переход к оптической части всей программы.

1. Описание первой очереди комплекса

Для возбуждения ЛСЭ в далекой инфракрасной области используется электронный пучок с энергией 6–8 МэВ, однократно ускоренный в разрезном микротроне (РМ) и выведенный через канал в вакуумной камере обесточенного поворотного электромагнита в тракт инжекции лазера (рис. 1). Иными словами, для формирования пучка-драйвера используется, за немногими исключениями, обычная схема линейного ускорителя. Такая конфигурация позволяет в максимальной степени совместить работы на микротроне и на ЛСЭ, при этом многие элементы

разрезного микротрона используются для работы в составе ЛСЭ. Например, поворотный магнит используется для спектрометрии электронного пучка. Тракт транспортировки образован оптическими элементами и системами диагностики РМ (соленоид, квадрупольный дублет, системы индикации пучка) и собственно трактом инжекции ЛСЭ, состоящего квадрупольного дублета и поперечного корректора и ахроматической системы инжекции, переводящей пучок с оси линака на оптическую ось ЛСЭ. Ахроматический поворот обеспечивается тремя магнитами с однородным полем, два крайние из которых обеспечивают поворот пучка на 30 град., а средний — на 60. Такая система инжекции ввиду ее оптических свойств обеспечивает простую экспериментальную настройку.

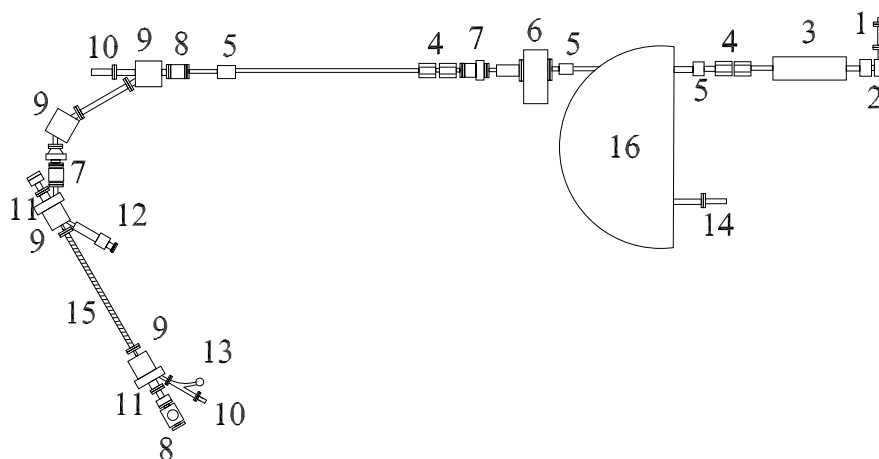


Рис. 1: Компоновка 1-й очереди излучательного комплекса ФИАН. 1 – электронная пушка, 2 – магнитный инфлектор, 3 – секция линейного ускорителя, 4 – квадрупольный дублет, 5 – электромагнитный корректор, 6 – вакуумный затвор, 7 – магнитоиндукционный датчик тока, 8 – люминесцентная вставка, 9 – поворотный электромагнит, 10 – цилиндр Фарадея, 11 – узел зеркала, 12 – привод системы перемещения зеркала для наблюдения, 13 – привод системы управления положением люминесцентного экрана в ондуляторе, 14 – монитор пучка магнитного спектрометра, 15 – спиральный ондулятор, 16 – поворотный электромагнит разрезного микротрона.

Система диагностики состоит из магнитоиндукционных датчиков тока и управляемых люминесцентных экранов. Собственно ЛСЭ образован спиральным электромагнитным ондулятором и оптическим резонатором, образованным двумя медными сферическими зеркалами с радиусом около 180 см и расстоянием 165 см между ними (10 длин волн ускорителя). Зеркала расположены в специальных вакуумных контейнерах, обеспечивающих перемещение и юстировку зеркал в рабочих условиях. Двухзаходная обмотка ондулятора состоит из 35 витков с периодом 32 мм и выполнена медным проводом диаметром 2,2 мм, уложенным в пазы в капралоновом каркасе, который плотно насажен на тонкостенную вакуумную камеру из нержавеющей стали. Внешний диаметр конструкции 37,5 мм, апертура вакуумного канала — 27 мм. На входе ондулятора обмотки соединены специальным жестким кольцом, кольцо аналогичной конструкции на выходе ондулятора служит для возбуждения ондулятора через коаксиальный фидер, соединенный на другом конце с импульсным источником питания [5]. Полная длина ондулятора около 120 см.

Компактная конструкция ЛСЭ позволила разместить в пространстве между зеркалами также вводной и выводной электромагниты и элементы системы диагностики электронного пучка и юстировочных световых пучков. Отработанный электронный пучок выводится в поглотитель, который одновременно служит и для измерения тока на выходе ондулятора. Пучок

электромагнитного излучения ЛСЭ через отверстие в зеркале выводится за пространство взаимодействия, где в дальнейшем с помощью специального устройства он может быть собран параболическим зеркалом и направлен в вакуумированный волновод из медной трубки малого диаметра, либо выведен в атмосферу через вакуумное окно.

2. Экспериментальное исследование ЛСЭ

Для генерации многопроходного ЛСЭ необходимо, чтобы коэффициент усиления за проход превышал все потери излучения в пространстве взаимодействия. В свою очередь усиление пропорционально току электронов и обратно пропорционально квадрату ширины линии излучения [6], которая определяется как параметрами ондулятора (однородная ширина), так и энергетическим разбросом в пучке (неоднородное уширение). Параметры ЛСЭ были оптимизированы для максимального коэффициента усиления малого сигнала и минимального времени выход на режим насыщения. Возможность реализации рассматриваемого ЛСЭ во многом обязана токовым параметрам и спектральным характеристикам пучка линейного ускорителя, входящего в состав РМ [7], а именно возможности формирования в схеме резонатор – секция на бегущей волне сильноточных пучков с узким энергетическим спектром и малым поперечным эмиттансом.

Нами были предприняты дополнительные экспериментальные работы, в результате которых яркость пучка была доведена до 0,4 А на процент энергетического разброса. Были проведены также исследования и настройка тракта транспортировки с целью получения прецизионного пучка максимальной интенсивности на выходе ЛСЭ. Для настройки линз и магнитов ахроматического поворота использовался коллимированный пучок малой интенсивности, наблюдение за пучком осуществлялось с помощью люминесцентных экранов на тракте транспортировки и перемещаемого люминесцентного зонда в канале ондулятора. Для корректировки поперечного движения на ондуляторе предусмотрены специальные индукционные корректоры, часть из которых была установлена на этапе магнитных измерений. В результате настройки тракта на выходе ондулятора был получен ток 350 мА, что соответствует примерно коэффициенту усиления 10% за проход при параметрах существующего пучка и ондулятора при магнитном поле в ондуляторе, близком к оптимальному (ток через обмотку около 30 кА).

Работе с пучком предшествовал этап геометрической юстировки ондулятора. Поскольку ондулятор не обладает достаточной жесткостью по отношению к изгибам, он механически закреплен в нескольких местах с помощью специальных стоек. Положение геометрической оси ондулятора фиксировалось с помощью стоек по лучу полупроводникового лазера. Для этого люминесцентный зонд с малым отверстием в центре продвигался по длине ондулятора, и положение последнего выбиралось по максимальной интенсивности луча лазера, прошедшего через отверстие в зонде. Система из двух полупроводниковых лазеров использовалась для юстировки зеркал резонатора, которые были установлены после исследования динамики электронного пучка. С помощью лазера, установленного на выходной стороне ондулятора, юстировалось зеркало на входе ондулятора. Затем устанавливалось выходное зеркало, которое юстировалось с помощью лазеров на входе и на выходе по совмещению на экране световых пучков, выведенных с помощью полупрозрачного зеркала (используемого также для оперативного наблюдения за положением пучка в ондуляторе) на основе лавсановой пленки из пространства резонатора. Окончательная юстировка осуществлялась по совмещению многократно отраженных от зеркал резонатора световых лучей от лазера на входе ондулятора.

Описанная система использовалась также для контроля и подъюстировки зеркал в режиме поиска генерации, особенно после перемещения зеркал на большое (несколько миллиметров) расстояние. Для диагностики ондуляторного и индуцированного лазерного излучения использовался оптико-акустический преобразователь, работающий в режиме регистрации одиночных

импульсов. Датчик преобразователя подсоединялся к вакуумному волноводу через окно из полиэтилена толщиной 1 мм, мало поглощающее субмиллиметровое излучение.

Проведен первый сеанс работ по поиску режима генерации, в течение которого отработывалась методика измерений и настройка аппаратуры. Основное неудобство измерений было связано с большими затратами времени на точный подбор расстояния между зеркалами для обеспечения генерации в режиме синхронизации мод, что связано с импульсным характером работы ондулятора (одно срабатывание за 10–15 сек). В то же время длительный сеанс (более 10 часов непрерывной работы) показал надежную работу всего оборудования и стабильные параметры электронного пучка. После сеанса было решено установить в резонатор ЛСЭ новые зеркала, изменив при этом механизм их крепления в камере. В настоящее время на комплексе проведены текущие регламентные работы начаты второй этап работ по поиску генерации.

Заключение

Параметры электронного пучка ЛСЭ гарантируют получение генерации в перестраиваемом ЛСЭ далеко инфракрасного диапазона. Ближайшая программа после получения генерации связана с исследованием режимов ЛСЭ и подготовкой экспериментов на пучке излучения лазера. Среди первоочередных планов — исследование высокочастотных свойств высокотемпературных сверхпроводящих пленок, для чего заканчивается создание необходимой криогенной инфраструктуры. По-видимому, будет предпринята попытка перекрытия с помощью созданного ЛСЭ субмиллиметрового диапазона (0.1–0,5 мм), где в настоящее время ведутся интенсивные работы по созданию твердотельных излучателей.

Список литературы

- [1] V.G. Kurakin. High Current Racetrack Microtron as Free Electron Laser Driver, Nucl. Instr. Meth., A341 (1994), 407-411.
- [2] К.А. Беловинцев, А.И. Букин, Е.В. Гаскевич, А.И. Карев, А.В. Кольцов, В.А. Кузнецов, В.Г. Куракин, С.В. Сидоров. Radiation Complex on the Basis of a Racetrack Microtron, Nucl. Instr. Meth. A341 (1994), ABS45-ABS46.
- [3] К.А. Беловинцев, А.И. Букин, Е.В. Гаскевич, А.В. Кольцов, В.А. Кузнецов, В.Г. Куракин and С.В. Сидоров. The Radiation Complex for Fundamental Research. – In: Proceedings of the 4th European Particle Accelerator Conference, London, 27 June to 1 July 1994, pp. 861-863.
- [4] К.А. Беловинцев, А.И. Букин, Е.В. Гаскевич, А.В. Кольцов, В.А. Кузнецов, В.Г. Куракин, С.В. Сидоров. Излучательный комплекс для фундаментальных и прикладных исследований. Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино 25-27 окт. 1994 г. том 4, с. 264-268.
- [5] А.И. Букин, Е.В. Гаскевич, В.Г. Куракин, О.В. Савушкин. “Экспериментальное исследование спирального ондулятора”. Труды ФИАН, т. 214, 155-163, 1993.
- [6] А.А. Варфоломеев. “Лазеры на свободных электронах и перспективы их развития”. Препринт ИАЭ, Москва, 1980. 117 с.
- [7] К.А. Belovintsev, A.I. Karev and V.G. Kurakin. “The Lebedev Physical Institute Race-Track Microtron”, Nuclear Instruments and Methods, A261, pp. 36-38, 1987.