

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-96-257

На правах рукописи
УДК 621.384.665 +
681.7.069.24

Ю-751

ЮРКОВ
Михаил Владимирович

РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ ЛСЭ-УСИЛИТЕЛЯ
С АЗИМУТАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫМ
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГАММА-ГАММА КОЛЛАЙДЕРОВ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий Объединенного института ядерных исследований, Дубна.

Научные руководители:

Доктор физико-математических наук,
профессор

САРАНЦЕВ

Владислав Павлович

Кандидат физико-математических наук

ИВАНОВ

Игорь Николаевич

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук

АГАФОНОВ

Алексей Вениаминович

Кандидат физико-математических наук

САНДАЛОВ

Александр Николаевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Филиал института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Протвино

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1996 г.
в _____ часов на заседании Специализированного Совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "_____" _____ 1996 г.

Ученый секретарь Специализированного Совета

д.ф.-м.н.

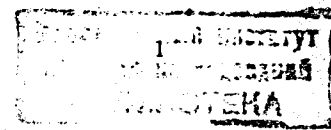
Ю.А. Батусов

Общая характеристика работы

Темой данной диссертации является разработка теории ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком и исследование возможности использования ЛСЭ-усилителей для создания гамма-гамма коллайдеров на базе линейных электрон-позитронных коллайдеров.

Актуальность работы

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) являются перспективными источниками когерентного излучения. Устройства ЛСЭ обладают важными потенциальными преимуществами по сравнению с квантовыми генераторами когерентного излучения. Они способны обеспечивать перестраиваемость в широких пределах длины волны излучения, высокую пиковую и среднюю мощность излучения, высокий КПД преобразования электрической энергии в энергию электромагнитного излучения, минимальную (дифракционную) расходимость излучения. В течение последних двух десятилетий был достигнут значительный прогресс в технике ЛСЭ. К настоящему времени создано более трех десятков работающих ЛСЭ-генераторов, перекрывающих область длин волн электромагнитного спектра от дальнего инфракрасного до ультрафиолетового. Проведены успешные эксперименты по созданию ЛСЭ-усилителей. Несмотря на сильную конкуренцию со стороны квантовых генераторов когерентного излучения, ЛСЭ-генераторы признаны как незаменимые источники перестраиваемого излучения, что необходимо для ряда научных исследований. В мире построено около десятка специализированных центров ЛСЭ инфракрасного диапазона, в которых проводятся исследования в областях физики твердого тела, биофизики, биохимии, медицины и т.д. Принимая во внимание перспективные возможности ЛСЭ, многие крупные корпорации вкладывают значительные средства в развитие техники ЛСЭ, имея ввиду создание в ближайшем будущем мощных ЛСЭ для промышленных применений, таких как обработка материалов, микролитография, разделение изотопов, применения в химической промышленности, нагрев плазмы, и т.д.



Анализ динамики развития ЛСЭ показывает, что в течение следующего десятилетия ЛСЭ займет прочное место как незаменимый прибор для множества научных и промышленных применений.

Для ряда перспективных практических применений требуется перестраиваемое по длине волны когерентное излучение большой пиковой и средней мощности, которое может быть получено только с помощью ЛСЭ-усилителей. К таким применениям следует отнести создание лазеров рентгеновского диапазона, создание энергетического драйвера для промышленного термоядерного реактора на основе инерциального термоядерного синтеза, нагрев плазмы в токамаках мощным СВЧ-излучением, создание гамма-гамма коллайдеров на основе линейных коллайдеров. Учитывая важность этих применений, требуется детальная разработка теории ЛСЭ-усилителей и проработка концепций технической реализации конкретных устройств.

Цель работы

Целью представляемой диссертации является разработка теории ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком и исследование возможности использования ЛСЭ-усилителей для создания гамма-гамма коллайдеров на базе линейных коллайдеров.

Научная новизна работы

В представляемой диссертации впервые построена законченная теория ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком. Теория включает в себя решение задачи на собственные значения, решение начальной задачи и теорию нелинейного режима работы ЛСЭ-усилителя. Отличительной особенностью общего подхода к построению теории является использование методов подобия. Особенностью подхода к решению задачи на собственные значения является существенное использование аналитических методов. В диссертации рассмотрены все варианты ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком, допускающие аналитическое решение. Для анализа ЛСЭ-усилителей с электронным пучком, имеющим произвольное

градиентное распределение плотности тока, разработан метод многослойной ступенчатой аппроксимации. Принципиальным моментом развития теории ЛСЭ-усилителя явилось детальное изучение начальной задачи. Что касается нелинейной теории ЛСЭ-усилителя, то здесь новым моментом явилось использование метода функции Грина для расчета полей излучения. В результате разработан алгоритм численного моделирования ЛСЭ-усилителя, существенно превосходящий по точности и скорости расчетов алгоритмы, базирующиеся на других подходах. В целом, пакет программ FS2R для расчета ЛСЭ-усилителя не имеет аналогов в мировой практике.

Исследование возможности применения техники ЛСЭ для создания гамма-гамма коллайдеров явились существенным шагом на пути становления этого направления. В частности, предложена и обоснована двухкаскадная схема ЛСЭ в качестве источника первичных фотонов для гамма-гамма коллайдера. Впервые детально исследованы требования, предъявляемые к оптической системе гамма-гамма коллайдера на базе ЛСЭ и намечены пути технической реализации.

Научная и практическая ценность работы

В научном плане теория ЛСЭ-усилителя, разработанная в данной диссертации, является существенным вкладом в развитие теории ЛСЭ. В практическом плане результаты проведенных исследований могут быть использованы для анализа и расчета перспективных ЛСЭ-усилителей инфракрасного, оптического и рентгеновского диапазонов для таких применений, как создание лазеров рентгеновского диапазона, создание энергетического драйвера для промышленного термоядерного реактора на основе инерциального термоядерного синтеза, создание гамма-гамма коллайдеров на основе линейных коллайдеров и мощных ЛСЭ-усилителей прикладного назначения. В настоящее время разработанная теория ЛСЭ-усилителя и пакет программ FS2R используются для выбора и оптимизации параметров ЛСЭ-усилителя рентгеновского диапазона, планируемого к созданию в DESY (Германия). Разработанный в диссертации подход к созданию гамма-гамма коллайдера

используется в качестве базовой основы в проекте линейного коллайдера TESLA.

Публикации и апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, изложены в 9 публикациях, приведенных в списке литературы.

Результаты работы докладывались на следующих совещаниях:

- Второе Всесоюзное совещание по новым методам ускорения (Нор-Амберд, 1989);
- VII Семинар по релятивистской СВЧ-электронике (Томск, 25 – 27 ноября 1991 г.);
- Второе рабочее совещание “Физика на ВЛЭПП” (Протвино, 2–4 июня 1992 г.);
- XIII Совещание по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 13–15 октября 1992 г.);
- 15 Международное совещание по лазерам на свободных электронах (Гаага, Нидерланды, 23–27 августа 1993 г.);
- Международное совещание по гамма-гамма коллайдерам (Беркли, США, 28–31 марта 1994 г.);

а также на семинарах ускорительного отделения ЛСВЭ ОИЯИ, DESY (Германия), Дортмундского университета (Германия).

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Выведены в общем виде самосогласованные уравнения для описания линейного режима работы ЛСЭ-усилителя.
2. Разработана теория линейного режима работы ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком. Для случаев ступенчатого и ограниченного параболического профилей плотности тока электронного пучка проведено аналитическое решение задачи на собственные значения. Получены дисперсионные уравнения и найдены аналитические выражения для мод излучения. Исследовано асимптотическое поведение полученных решений. Прове-

ден детальный анализ влияния на работу ЛСЭ-усилителя дифракционных эффектов, эффектов пространственного заряда и энергетического разброса. Обнаружен эффект селекции мод излучения из-за энергетического разброса, состоящий в том, что энергетический разброс приводит к сильному подавлению инкрементов нарастания высших мод излучения. Для случая пучка произвольным градиентным распределением плотности тока разработан метод многослойной ступенчатой аппроксимации для решения задачи на собственные значения.

3. Разработан подход к решению начальной задачи для ЛСЭ-усилителя, основанный на решении интегро-дифференциального уравнения на первую гармонику модуляции плотности пучка. Исследована проблема обеспечения условий оптимальной фокусировки излучения задающего лазера на электронный пучок на входе ондулятора.
4. Разработана нелинейная теория ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком. Особенностью подхода является использование метода функции Грина для вычисления полей излучения и пространственного заряда. Проведен анализ основных эффектов нелинейной теории ЛСЭ-усилителя.
5. Создан пакет программ FS2R для расчета параметров ЛСЭ-усилителя, не имеющий аналогов в мировой практике. Пакет включает в себя четыре программы. Программа FS2RH позволяет проводить анализ параметров ЛСЭ-усилителя с помощью методов подобия. Программа FS2RD позволяет проводить анализ мод излучения пучка (решение задачи на собственные значения). Программа FS2RL позволяет находить параметры ЛСЭ-усилителя при работе в линейном режиме (решение начальной задачи). Программа FS2RN представляет собой алгоритм моделирования нелинейного режима работы ЛСЭ-усилителя. Разработанный алгоритм значительно превосходит по точности и скорости расчетов алгоритмы, базирующиеся на прямом вычислении электромагнитных полей путем решения волнового уравнения, записанного в параксиальном

приближении.

6. Разработана техника применения методов подобия в теории ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком. Анализ с помощью методов подобия позволяет не только уменьшить число параметров задачи, но и провести глубокий физический анализ ожидаемых результатов без проведения сложных расчетов. Если же говорить про сами расчеты, то решение безразмерных уравнений позволяет представлять результаты в такой форме, которая обладает одновременно и большой общностью, и может быть использована для проведения расчетов при конкретных физических параметрах установки.
7. Проведен анализ особенностей оптимизации параметров гамма-гамма коллайдеров, создаваемых на базе линейных электрон-позитронных коллайдеров.
8. Предложена двухкаскадная схема ЛСЭ в качестве источника первичных фотонов для гамма-гамма коллайдера. Первым каскадом служит перестраиваемый ЛСЭ-генератор, излучение которого усиливается в ЛСЭ-усилителе с вариацией параметров ондулятора. Показано, что такая схема является наиболее оптимальной и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к источнику первичных фотонов для гамма-гамма коллайдера.
9. Проведен анализ возможности использования техники ЛСЭ для создания гамма-гамма коллайдеров ТэВ-ного диапазона энергий. Проведена оптимизация параметров ЛСЭ-усилителя, выработаны требования на параметры драйверного электронного пучка и на параметры ондулятора. Показано, что создание такого ЛСЭ технически возможно.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Число страниц текста (исключая титульный лист, оглавление, список литературы) составляет 123. Число рисунков 41, таблиц 3. Список литературы состоит из 78 наименований.

Введение

Во введении приводится сравнительный анализ устройств ЛСЭ и квантовых генераторов когерентного излучения. Показано, что ЛСЭ представляют собой отдельный класс электровакуумных приборов, что является определяющим фактором потенциального преимущества устройств ЛСЭ над квантовыми генераторами. Приводится краткий обзор современных и будущих применений ЛСЭ. Показано, что для ряда перспективных практических применений (создание лазеров рентгеновского диапазона, создание энергетического драйвера для промышленного термоядерного реактора на основе инерциального термоядерного синтеза, нагрев плазмы в токамаках мощным СВЧ-излучением, создание гамма-гамма коллайдеров на основе линейных коллайдеров) требуется перестраиваемое по длине волны когерентное излучение большой пиковой и средней мощности, которое может быть получено только с помощью ЛСЭ-усилителей.

Первая глава

Первая глава посвящена выводу самосогласованных уравнений линейной теории ЛСЭ-усилителя. Анализ работы ЛСЭ-усилителя основан на решении уравнений Максвелла, записанных в параксиальном приближении, и кинетического уравнения для движения частиц, записанного в переменных "энергия-фаза". Предполагается, что частицы движутся (в среднем по вынужденному движению) только вдоль оси ондулятора. Такая модель оказалась чрезвычайно плодотворной и позволила описать практически все основные физические эффекты, определяющие работу ЛСЭ-усилителя, такие как дифракционные эффекты, влияние поля пространственного заряда, влияние энергетического разброса частиц в пучке. В главе 1 выведены самосогласованные уравнения, описывающие линейный режим работы ЛСЭ-усилителя. Они могут быть записаны либо в виде интегро-дифференциального уравнения на поле излучения, либо в виде интегрального уравнения на амплитуду модуляции плотности электронного пучка. Во второй и третьей главах данные уравнения используются для решения задачи на собствен-

ные значения и начальной задачи для ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком.

Вторая глава

Вторая глава посвящена решению задачи на собственные значения для ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком. В общем случае плотность тока азимутально-симметричного электронного пучка может быть представлена в виде:

$$j_0(r) = \begin{cases} IS(r/r_0) \left[2\pi \int_0^{r_0} r S(r/r_0) dr \right]^{-1} & \text{при } r < r_0, \\ 0 & \text{при } r > r_0, \end{cases} \quad (1)$$

где $S(r/r_0)$ – функция, описывающая профиль пучка, r_0 – граница пучка, I – полный ток пучка. В пределе большого коэффициента усиления, поле излучения пучка в ондуляторе может быть представлено в виде набора мод:

$$E_x + iE_y = \exp[i\omega(z/c - t)] \sum_{n,k} A_{nk} \Phi_{nk}(r) \exp[\Lambda_{nk}z + in\phi], \quad (2)$$

где ω – частота усиливаемой волны. В процессе усиления поперечное распределение поля моды излучения остается неизменным, в то время как амплитуда растет экспоненциально с длиной ондулятора. Каждая мода характеризуется собственной функцией распределения поля по поперечной координате и величиной инкремента. Мода с наибольшим значением инкремента имеет преимущество над всеми остальными модами. Если длина ондулятора достаточно велика, то устанавливается такое распределение поля, которое соответствует моде с наибольшим инкрементом (иными словами, имеет место эффект самофокусировки излучения – “optical guiding”).

Полное исследование свойств мод излучения пучка проведено с помощью метода уравнений самосогласованного поля. Из общего интегро-дифференциального уравнения, в пределе большого коэффициента усиления выведена система дифференциальных уравнений на поле. Собственные числа и собственные функции мод излучения пучка

находятся из этого уравнения путем наложения граничных условий на границе пучка и условия квадратичной интегрируемости собственной функции. Для случаев ступенчатого и ограниченного параболического профиля плотности тока электронного пучка выведены дисперсионные уравнения и найдены аналитические выражения для собственных функций мод излучения пучка. Дисперсионное уравнение для пучка со ступенчатым профилем плотности тока имеет вид:

$$\mu J_{n+1}(\mu) K_n(g) = g J_n(\mu) K_{n+1}(g). \quad (3)$$

Распределение поля по поперечной координате (т.е. собственная функция) имеет вид:

$$\Phi_n(\hat{r}) = \begin{cases} J_n(\mu \hat{r}) & \text{при } \hat{r} < 1, \\ J_n(\mu) K_n(g \hat{r}) / K_n(g) & \text{при } \hat{r} > 1. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь введены следующие обозначения: $\hat{r} = r/r_0$, $\hat{C} = [\kappa_w - \omega/(2c\gamma_z^2)]/\Gamma$ – параметр отстройки, $\hat{\Lambda} = \Lambda/\Gamma$ – нормализованное собственное число,

$$g^2 = -2iB\hat{\Lambda}, \quad \mu^2 = \frac{-2i\hat{D}}{1 - i\hat{\Lambda}^2\hat{D}} - g^2, \quad \hat{D} = \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \frac{d\hat{F}(\xi)/d\xi}{\hat{\Lambda} + i\hat{C} + i\xi}.$$

Функция распределения по энергии $\hat{F}(\xi)$ нормализована на единицу: $\int \hat{F}(\xi) d\xi = 1$, где $\xi = \omega(\mathcal{E} - \mathcal{E}_0)/(c\gamma_z^2\Gamma\mathcal{E}_0)$ – нормализованное отклонение энергии. Параметр усиления Γ , дифракционный параметр B и параметр пространственного заряда $\hat{\Lambda}_p^2$ даются следующими выражениями:

$$\Gamma = \left[\frac{I\omega^2\theta_s^2}{I_A c^2 \gamma_z^2} \right]^{1/2}, \quad B = \Gamma r_0^2 \omega/c, \quad \hat{\Lambda}_p^2 = 4c^2/(\omega^2 r_0^2 \theta_s^2), \quad (5a)$$

$I_A = mc^3/e \simeq 17$ кА – ток Альфвена, $\theta_s = K/\gamma$ – угол вращения электрона в ондуляторе, $K = \lambda_w e H_w / 2\pi m c^2$ – параметр ондуляторности, $\lambda_w = 2\pi/\kappa_w$ – период ондулятора, H_w – поле ондулятора, $\gamma = \mathcal{E}_0/mc^2$ – релятивистский фактор для частицы с номинальной энергией \mathcal{E}_0 , $\gamma_z^{-2} = \gamma^{-2} + \theta_s^2$. Для случая гауссовского энергетического разброса функ-

ция \hat{D} дается выражением:

$$\hat{D} = i \int_0^{\infty} \xi \exp \left[-\hat{\Lambda}_T^2 \xi^2 / 2 - (\hat{\Lambda} + i\hat{C})\xi \right] d\xi,$$

где $\hat{\Lambda}_T^2$ – параметр энергетического разброса:

$$\hat{\Lambda}_T^2 = \Lambda_T^2 / \Gamma^2 = \langle (\Delta \mathcal{E})^2 \rangle \omega^2 / (c^2 \gamma_z^4 \mathcal{E}_0^2 \Gamma^2). \quad (56)$$

В диссертации детально исследовано асимптотическое поведение полученных решений. Показано, что наличие энергетического разброса в пучке приводит к сильной селекции мод излучения.

Аналитические методы имеют ограниченное применение для решения задачи на собственные значения в случае, когда электронный пучок имеет градиентное распределение плотности тока. Единственным градиентным профилем, допускающим аналитическое решение, является ограниченный параболический профиль. Этот случай детально исследован в диссертации: выведено дисперсионное уравнение, получены выражения для мод излучения пучка, исследовано асимптотическое поведение решений.

Для нахождения собственных мод излучения пучка с произвольным градиентным распределением плотности тока разработан метод многослойной ступенчатой аппроксимации. Суть метода состоит в ступенчатой аппроксимации плотности тока электронного пучка. Область $0 < \hat{r} < 1$ разделяется на K равных частей – слоев, в каждом из которых плотность тока предполагается постоянной. Для каждого слоя записывается аналитическое решение для поля излучения. Собственные функции находятся путем сшивки решений на границах слоев при выполнении условия квадратичной интегрируемости собственной функции. Тестирование алгоритма проводилось с помощью точных аналитических решений для пучка с параболическим профилем.

Все численные примеры, приведенные в данной главе, рассчитаны с помощью алгоритма FS2RD решения задачи на собственные значения, входящего в пакет программ FS2R расчета ЛСЭ-усилителей с азимутально-симметричным электронным пучком. Алгоритм позволя-

ет находить решения характеристических дисперсионных уравнений для случаев ступенчатого и ограниченного параболического профилей (аналитически), и для случая произвольного градиентного профиля пучка (методом многослойной ступенчатой аппроксимации). Алгоритм позволяет рассчитывать характеристики мод излучения пучка, такие, как поперечное распределение поля в ближней зоне и диаграмма направленности в дальней зоне. Характеристики мод излучения находятся с учетом влияния дифракционных эффектов, поля пространственного заряда и энергетического разброса частиц в пучке.

Третья глава

В главе 3 изложен другой раздел линейной теории ЛСЭ-усилителя, а именно решение начальной задачи. Решение начальной задачи означает нахождение эволюции электромагнитного поля в ондуляторе при заданных начальных условиях для пучка и излучения на входе в ондулятор. В линейном приближении плотность тока пучка можно представить в виде $j_z = -j_0(r) + \tilde{j}_1 \exp^{i\psi} + C.C.$, где $\psi = \kappa_w z + \omega(z/c - t)$. В пределе малой величины энергетического разброса уравнение на первую гармонику плотности тока $\hat{j}_1(z, r) = \tilde{j}_1(z, r) \pi r_0^2 / I$ сводится к интегродифференциальному уравнению:

$$\frac{d^2 \hat{j}_1}{d\hat{z}^2} + 2i\hat{C} \frac{d\hat{j}_1}{d\hat{z}} + [\hat{\Lambda}_p^2 - \hat{C}^2] \hat{j}_1 = \frac{1}{2i} \hat{U}_r, \quad (6)$$

где \hat{U}_r – эффективный потенциал взаимодействия частицы с электромагнитной волной:

$$\begin{aligned} \hat{U}_r(\hat{r}, \hat{z}) = & \hat{U}_{\text{ext}} + 2i \int_0^{\hat{z}} \frac{d\hat{z}'}{\hat{z} - \hat{z}'} \int_0^1 d\hat{r}' \hat{r}' \hat{j}_1(\hat{z}', \hat{r}') S(\hat{r}') \\ & \times \exp \left[\frac{iB(\hat{r}^2 + \hat{r}'^2)}{2(\hat{z} - \hat{z}')} \right] J_0 \left[\frac{B\hat{r}\hat{r}'}{\hat{z} - \hat{z}'} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

\hat{U}_{ext} – эффективный потенциал входной электромагнитной волны, $\hat{z} =$

Γz ,

$$\Gamma = \left[I\omega^2\theta_s^2 \left(2I_A c^2 \gamma_z^2 \gamma \int_0^1 \xi S(\xi) d\xi \right)^{-1} \right]^{1/2}$$

Вычисленные значения амплитуды модуляции плотности тока пучка \hat{j}_1 используются для расчета коэффициента усиления по мощности G путем интегрирования уравнения

$$\frac{dG}{dz} = -\frac{1}{\hat{W}_{ext} \int_0^1 S(\hat{r}) \hat{r} d\hat{r}} \int \hat{r} d\hat{r} \hat{j}_1^*(\hat{r}, \hat{z}) S(\hat{r}) \hat{U}_r + C.C., \quad (8)$$

где $\hat{W}_{ext} = W_{ext}/W_0$, W_{ext} - мощность входного излучения, $W_0 = I\mathcal{E}_0\Gamma\gamma_z^2 c/(e\omega)$.

Вышеописанный алгоритм реализован в программе FS2RL, входящей в пакет программ FS2R расчета ЛСЭ-усилителей с азимутально-симметричным электронным пучком. Пучок разбивается на M слоев по радиусу. Полученная система $2 \times M$ уравнений (6) для реальной и мнимой части первой гармоники модуляции плотности интегрируется с помощью схемы Рунге-Кутты.

Решение начальной задачи позволяет находить в линейном приближении эволюцию электромагнитного поля при заданных условиях на входе в ондулятор. С практической точки зрения наличие такого быстродействующего алгоритма является очень удобным и позволяет проводить быструю оптимизацию параметров ЛСЭ-усилителя при работе в линейном режиме. Это также важно и с методической точки зрения, так как результаты решения начальной задачи могут быть использованы для тестирования линейной стадии более сложного алгоритма моделирования нелинейного режима.

В качестве начальных условий детально изучен практически важный случай, когда на вход ЛСЭ-усилителя подается немодулированный электронный пучок и излучение от задающего лазера в форме гауссовского лазерного пучка. Проведены исследования условий оптимальной фокусировки излучения.

Четвертая глава

В главе 4 представлен анализ нелинейного режима работы ЛСЭ-усилителя. Из канонических уравнений движения, записанных в переменных "энергия-фаза" и уравнений Максвелла выведена система самосогласованных уравнений. Для нахождения полей излучения и полей пространственного заряда использован метод функции Грина. Для решения системы самосогласованных уравнений разработан численный алгоритм на основе метода макрочастиц. В результате, получены самосогласованные уравнения, описывающие нелинейный режим работы ЛСЭ-усилителя с азимутально-симметричным электронным пучком (для случая вариации параметров ондулятора при постоянном параметре ондуляторности K):

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{P}}{d\hat{z}} &= \text{Re} \left[e^{i\psi} \hat{\theta} \hat{U}_r - i \hat{\Lambda}_p^2 \hat{U}_c \right] \\ \frac{d\psi}{d\hat{z}} &= \hat{C} + \hat{P} \frac{1 + \beta \hat{P}/2}{(1 + \beta \hat{P})^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь $\psi = \kappa_w z + \omega(z/c - t)$, $\hat{z} = \Gamma z$, $\hat{P} = \omega P / (c\gamma_z^2 \mathcal{E}_0 \Gamma)$, $P = \mathcal{E} - \mathcal{E}_0$, $\beta = c\gamma_z^2 \Gamma / \omega$ - параметр насыщения, $\hat{\theta} = \theta_s / \theta_{s0} = (1 + \beta \hat{P})^{-1}$, θ_{s0} - угол вращения частицы с номинальной энергией \mathcal{E}_0 на входе в ондулятор.

Выражение для эффективного потенциала полей излучения \hat{U}_r имеет вид (7), где комплексная амплитуда $\hat{j}_1 = |\hat{j}_1| \exp(i\psi_1)$ определяется путем усреднения по фазе ψ локального ансамбля макрочастиц: $\hat{j}_1 = \langle \hat{\theta}_{(k)} \exp(-i\psi_{(k)}) \rangle$.

Выражение для эффективного потенциала поля пространственного заряда \hat{U}_c имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{U}_c &= \frac{B}{\beta} \sum_{n=1}^{\infty} n e^{in\psi} \left[K_0(n\hat{r}\sqrt{B/\beta}) \int_0^{\hat{r}} r' dr' \hat{a}_n(r', \hat{z}) I_0(n\hat{r}'\sqrt{B/\beta}) S(r') + \right. \\ &\quad \left. I_0(n\hat{r}\sqrt{B/\beta}) \int_{\hat{r}}^1 r' dr' \hat{a}_n(r', \hat{z}) K_0(n\hat{r}'\sqrt{B/\beta}) S(r') \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Гармоники модуляции плотности пучка $\hat{a}_n = |\hat{a}_n| \exp(i\psi_n)$ вычисляются путем усреднения по фазе ψ локального ансамбля макрочастиц:

$$\hat{a}_n = \langle \exp(-in\psi(t)) \rangle.$$

Коэффициент усиления по мощности излучения G вычисляется аналогично (8). Вышеописанный алгоритм реализован в программе FS2RN, входящей в пакет программ FS2R расчета ЛСЭ-усилителей с азимутально-симметричным электронным пучком. Моделирование производится методом макрочастиц. Ансамбль макрочастиц приготавливается следующим образом: пучок разбивается на M слоев по радиусу и в каждом слое берется N макрочастиц, которые равномерно распределяются по фазе ψ от 0 до 2π . Моделирование энергетического разброса проводится дополнительным распределением макрочастиц по распределению Гаусса:

$$dw = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\Lambda}_T^2}} \exp\left[-\frac{\hat{P}^2}{2\hat{\Lambda}_T^2}\right] d\hat{P}. \quad (11)$$

Полученная система $2 \times N \times M$ уравнений (9) интегрируется с помощью схемы Рунге-Кутты.

Проведено тестирование численного алгоритма с помощью точных аналитических решений линейной теории. Разработанный алгоритм позволяет проводить моделирование нелинейного режима работы ЛСЭ-усилителя с учетом влияния дифракционных эффектов, полей пространственного заряда и разброса энергий электронов в пучке. Далее, на основе результатов численного моделирования проведен анализ особенностей работы ЛСЭ-усилителя в нелинейном режиме и в режиме с вариацией параметров ондулятора.

Последний раздел главы 4 посвящен объяснению физического смысла нормализованных переменных. Отмечено, что особенностью теории лазеров на свободных электронах является то, что она может быть полностью построена на применении методов подобия. Суть использования методов подобия состоит в такой записи уравнений, в которой происходит переход от размерных физических величин к безразмерным. Правильный физический выбор процедуры нормализации переменных позволяет не только уменьшить число параметров изучаемой задачи, но и перейти к таким переменным, которые обладают ясным

физическим смыслом. А именно, каждому физическому эффекту (эффекты дифракции, эффекты пространственного заряда, эффекты энергетического разброса и т.д.) ставится в соответствие свой безразмерный параметр, который определяет силу соответствующего эффекта. Если какой-либо физический эффект становится несущественным для работы ЛСЭ, это сказывается на величине соответствующего безразмерного параметра, который выпадает из числа параметров задачи. Анализ с помощью методов подобия позволяет не только уменьшить число параметров задачи, но и провести глубокий физический анализ ожидаемых результатов без проведения сложных расчетов. Если же говорить про сами расчеты, то решение безразмерных уравнений позволяет представлять результаты в такой форме, которая обладает одновременно и большой общностью, и может быть использована для проведения расчетов при конкретных физических параметрах установки.

Пятая глава

Пятая глава посвящена вопросам разработки гамма-гамма коллайдеров на основе линейных коллайдеров. В рассматриваемом варианте встречные пучки гамма-квантов производятся в процессе обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронных пучках коллайдера (см. Рис.1). При достаточно высокой пиковой мощности лазерного излучения значительная часть электронов взаимодействует с лазерным излучением, что позволяет достичь высокой светимости встречных гамма-гамма пучков.

На пути создания линейного коллайдера предстоит решить множество технических проблем. Для создания гамма-гамма коллайдера предстоит решить еще одну проблему, а именно проблему создания лазера, удовлетворяющего требованиям для первичного источника фотонов для гамма-гамма коллайдера. Лазер должен иметь пиковую выходную мощность порядка 300 ГВт, длительность импульса порядка нескольких пикосекунд и частоту повторения порядка нескольких сотен импульсов в секунду. Желательно, чтобы имелась возможность пе-

рестройки длины волны излучения лазера, так как оптимальная длина волны первичного излучения зависит от энергии электронов. Лазер должен обеспечивать возможность прецизионной синхронизации (с точностью порядка одной пикосекунды) импульсов излучения лазера со сгустками электронов коллайдера. И, наконец, для обеспечения более широкой программы физических экспериментов, необходимо обеспечить

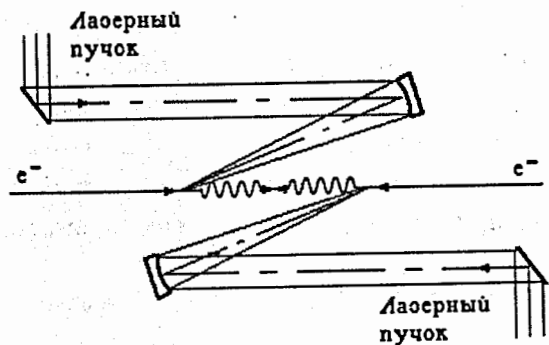


Рис. 1. Схема гамма-гамма коллайдера.

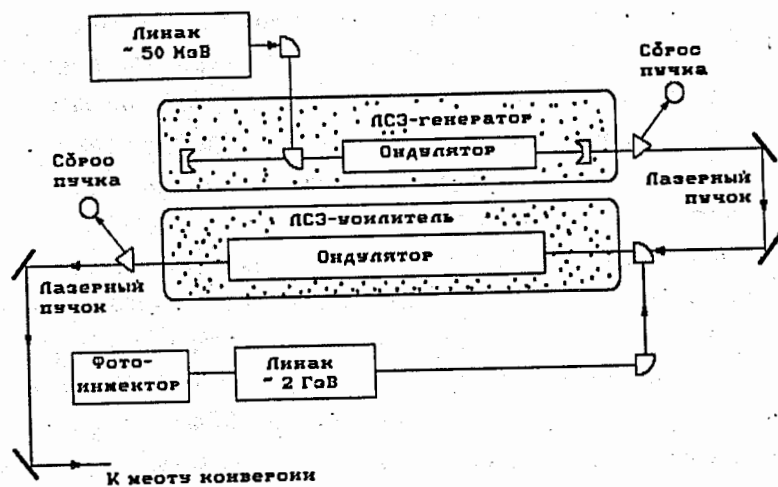


Рис. 2. Двухкаскадная схема ЛСЭ для гамма-гамма коллайдера.

Таблица 1
Гамма-гамма коллайдеры ТЭВ-ного диапазона энергий

	2×0.25 ТЭВ	2×0.5 ТЭВ	2×1 ТЭВ
<u>Основной ускоритель</u>			
Энергия \mathcal{E} , ТЭВ	0.25	0.5	1
Число электронов в сгустке N_e	2×10^{11}	2×10^{11}	2×10^{11}
Частота повторения f , Гц	150	150	150
Нормализованный эмиттанс ϵ_n , см·рад	$\pi \times 10^{-3}$	$\pi \times 10^{-3}$	$\pi \times 10^{-3}$
Длина сгустка σ_z , см	0.1	0.1	0.1
β -функция в месте встречи β_0 , см	0.1	0.1	0.1
Светимость L_{ee} , см ⁻² с ⁻¹	9.3×10^{32}	1.9×10^{33}	3.7×10^{33}
<u>Оптическая система</u>			
Пиковая мощность W , ТВт	0.3	0.3	0.3
Длина волны излучения λ , мкм	1	2	4
Размер пучка на зеркале a_0 , см	2	2	2
Фокусное расстояние зеркала F , см	30	20	15
<u>Область конверсии и место встречи</u>			
χ -параметр	4.75	4.75	4.75
Макс. энергия гамма-квантов, ГэВ	206	413	826
Коэффициент конверсии $\eta_{\gamma\gamma}$	0.7	0.7	0.7
Расстояние z_0 от точки конверсии до места встречи, см	3	5	8
Светимость $L_{\gamma\gamma}$, см ⁻² с ⁻¹	4.6×10^{32}	9.2×10^{32}	1.8×10^{33}

печить возможность управления поляризацией лазерного излучения. Анализ состояния дел с квантовыми лазерами показывает, что вышеприведенные требования не могут быть выполнены одновременно ни одним из существующих в настоящее время лазеров. Исследования, проведенные в данной диссертации, показали, что использование техники лазеров на свободных электронах может решить проблему источника первичных фотонов для гамма-гамма коллайдера.

В главе 5 диссертации приводится схема получения встречных гамма-гамма пучков, основные характеристики гамма-гамма коллай-

Таблица 2
 Параметры ЛСЭ-усилителей

	2×0.25 ТэВ	2×0.5 ТэВ	2×1 ТэВ
<u>Электронный пучок</u>			
Энергия электронов E_0 , ГэВ	2	2	2
Ток пучка I , кА	2.5	2.5	2.5
Энергетический разброс σ_E/E , %	0.3	0.3	0.3
Нормализованный эмиттанс ϵ_n , см·рад	1.3×10^{-2}	2.6×10^{-2}	5×10^{-2}
<u>Ондулятор</u>			
Период λ_w , см (вход/выход)	15 / 12.9	20 / 17.2	20 / 17.1
Поле H_w , кГс (вход/выход)	10.2 / 11.9	9.34 / 10.9	13.2 / 15.44
Длина секции с фикс. параметрами, м	11.7	15.6	14.0
Полная длина, м	37.5	46.9	43.7
<u>Излучение</u>			
Длина волны λ , мкм	1	2	4
Входная мощность W , МВт	10	10	10
Выходная мощность W , ТВт	0.3	0.3	0.3
КПД η , %	6	6	6
<u>Нормализованные параметры</u>			
Дифракционный параметр V	0.3	0.25	0.18
Параметр энергетического разброса $\hat{\Lambda}_T^2$	0.1	0.1	0.1
Параметр пространственного заряда $\hat{\Lambda}_p^2$	0.08	0.1	0.14
Параметр усиления Γ , см ⁻¹	5.1×10^{-3}	3.84×10^{-3}	3.84×10^{-3}
Параметр насыщения $\beta = \lambda_w \Gamma / 4\pi$	0.006	0.006	0.006

дера, такие как полная и спектральная светимость, выводятся требования к лазеру – источнику первичных фотонов. Обосновывается двухкаскадная схема ЛСЭ, позволяющая создать лазер для гамма-гамма коллайдера (см. Рис.2).

Проведенное исследование в основном посвящено решению проблем оптимальной конверсии энергии электронов в высокоэнергетичные гамма-кванты, выбора оптимальной конфигурации ЛСЭ для гамма-гамма коллайдера и оптимизации параметров ЛСЭ. Отмечено, что при

проектировании линейных коллайдеров должны быть приняты во внимание следующие особенности гамма-гамма коллайдеров. Во-первых, для работы гамма-гамма коллайдера не требуются позитроны, следовательно система инжекции коллайдера может быть существенно упрощена. Во-вторых, нет необходимости использовать существенно плоские пучки и использование традиционных круглых пучков может быть более предпочтительным. В-третьих, для создания гамма-гамма коллайдера более предпочтительным является одноступенчатый режим работы основного ускорителя, так как это значительно упрощает требования к лазеру.

В диссертации рассмотрен концептуальный проект гамма-гамма коллайдера ТэВ-ного диапазона энергий (см. таблицу 1) и проведен анализ его технической реализации. Предполагается, что система инжекции линейного коллайдера построена на основе техники фотоинжекторов. В основном ускорителе ускоряется круглый электронный пучок. Длина волны излучения лазера выбрана в соответствии с оптимальным значением, выходная мощность излучения составляет величину $W = 0.3$ ТВт. При этом коэффициент конверсии равен $\eta_{e\gamma} \simeq 0.7$ и $L_{\gamma\gamma}/L_{ee} \simeq 0.5$.

В качестве лазера используется двухкаскадная схема ЛСЭ (см. рис.2). В качестве задающего лазера служит перестраиваемый ЛСЭ-генератор с пиковой мощностью $W \sim 1 - 10$ МВт. Параметры ЛСЭ-усилителей для гамма-гамма коллайдеров ТэВ-ного диапазона энергий, приведенные в таблице 2, выбраны на основе оптимизационных расчетов, проведенных в диссертации.

В заключении главы проведен анализ технической возможности создания гамма-гамма коллайдера на базе линейного коллайдера. Показано, что создание такого варианта коллайдера возможно на современном уровне развития ускорительной техники и техники ЛСЭ.

Заключение

В заключении кратко сформулированы основные результаты данной диссертационной работы, выносимые на защиту.



1. Е.Л. Салдин, В.П. Саранцев, Е.А. Шнейдмиллер, М.В. Юрков. ЛСЭ-усилитель как источник первичных фотонов для фотонного коллайдера. Труды Второго рабочего совещания "Физика на ВЛЭПП" (2 - 4 июня 1992 г., Протвино, Россия), Том 2, стр. 96-116.
2. Е.Л. Салдин, В.П. Саранцев, Е.А. Шнейдмиллер, М.В. Юрков. Лазер на свободных электронах для фотонного коллайдера на энергию 2×1 ТэВ. Труды XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 13-15 октября 1992 г.), Том 1, стр. 36-42.
3. Е.Л. Салдин, В.П. Саранцев, Е.А. Шнейдмиллер, М.В. Юрков. Фотонные коллайдеры ТэВ-ного диапазона энергий на основе ЛСЭ. Препринт ОИЯИ Е9-94-70, Дубна, 1994. 27 стр.
4. Е.Л. Салдин, Е.А. Шнейдмиллер, М.В. Юрков. Методы подобия в теории ЛСЭ-усилителя. ЭЧАЯ 23(1992)239-294.
5. E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller and M.V. Yurkov. On a linear theory of a FEL amplifier with an axisymmetric electron beam. Optics Communications, 97(1993)272-290
6. E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller and M.V. Yurkov. Nonlinear simulations of a FEL amplifier with an axisymmetric electron beam. Optics Communications, 95(1993)141-152
7. Е.Л. Салдин, Е.А. Шнейдмиллер, М.В. Юрков. Моделирование нелинейного режима работы ЛСЭ-усилителя с круглым пучком. Релятивистская высокочастотная электроника, выпуск 7 (ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1992), стр.40-59
8. Е.Л. Салдин, Е.А. Шнейдмиллер, М.В. Юрков. Численное моделирование ЛСЭ-усилителя. Вопросы атомной науки и техники, 1990, вып. 6(14), стр. 90-96
9. E.L. Saldin, E.A. Schneidmiller and M.V. Yurkov. Calculation with FS2R Code of 6 nm and 70 nm Options of SASE FEL at the TESLA Test Facility. DESY Print May 1995, TESLA-FEL 95-02, Hamburg, DESY, 1995. 48 pp.

Рукопись поступила в издательский отдел

11 июля 1996 года.