

Лазер на свободных электронах с энергией вспышки 4 МДж в качестве драйвера для промышленного термоядерного реактора

Е.Л. Салдин, Е.А. Шнейдмиллер, Ю.Н. Ульянов
НПО Автоматических систем, Самара, Россия

М.В. Юрков

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В докладе представлено дальнейшее развитие концепции энергетического драйвера на основе ЛСЭ для промышленного термоядерного реактора [1]-[4]. Показана техническая возможность создания лазерной системы со следующими параметрами: длина волны излучения 0.5 мкм, энергия вспышки 4 МДж, частота повторения 10 Гц, КПД от сети 10 %.

Введение

В работах [1]-[4] было показано, что энергетический драйвер для промышленного термоядерного реактора может быть построен на основе лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Это становится возможным благодаря применению новой схемы многокаскадного ЛСЭ-усилителя с фокусирующей диафрагменной линией, в которой производится многократное суммирование мощности оптического импульса. В данной работе представлена новая схема энергетического драйвера на основе ЛСЭ, обеспечивающая более высокую энергию вспышки (до 4 МДж) и высокую контрастность излучения. В предлагаемой схеме используется схема сложения электронных пучков, что позволяет существенно снизить требования к среднему току драйверного ускорителя для ЛСЭ.

1. Суммирование оптической мощности

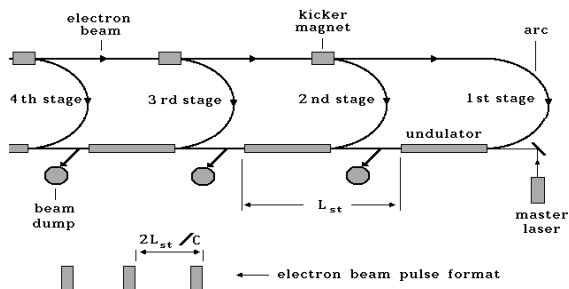


Рис. 1: Схема суммирования оптической мощности.

Схема суммирования оптической мощности показана на рис. 1. Она представляет собой каскадное соединение N ондуляторов одинаковой длины L_c . Рабочий цикл многокаскадного ЛСЭ-усилителя протекает следующим образом. На вход канала транспортировки подается серия из N электронных сгустков, отстоящих друг от друга на расстояние $2L_c$. Первый электронный сгусток проходит весь канал транспортировки и по магнитной арке поступает на вход ондулятора первого каскада. В тот момент времени, когда электронный сгусток поступает на вход ондулятора, туда же подается оптический импульс от задающего лазера. После прохождения ондулятора электронный сгусток направляется в коллектор, а усиленный оптический импульс поступает на вход второго каскада и усиливается в нем вторым электронным сгустком и т.д.

2. Устройство энергетического драйвера

Основные параметры энергетического драйвера представлены в табл. 1. Блок-схема драйвера представлена на рис. 2. Лазерная система состоит из трёх основных систем: системы формирования электронных пучков, многоканального, многокаскадного ЛСЭ-усилителя и оптической системы преобразования лазерных пучков.

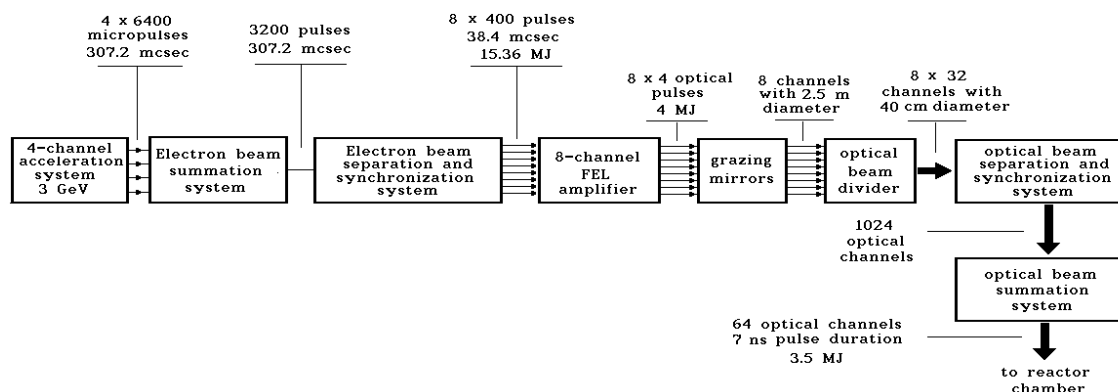


Рис. 2: Блок-схема энергетического драйвера.

Таблица 1: Параметры драйвера

Длина волны изл.	0.5 мкм
Длит. импульса	7 нс
Яркость	$5 \times 10^{20} \text{Вт/см}^2 \text{ср}$
Энергия вспышки	3.5 МДж
Частота повторения	10 Гц
КПД	10 %

Таблица 2: Параметры ускорителя

Энергия электронов	3 ГэВ
Частота СВЧ	500 МГц
Ускоряющий градиент	5 МВ/м
Длит. макроимпульса	308 мкс
Частота повторения	10 Гц
Шунт. сопротивление	5 МОм/м

Система формирования электронных пучков. Система формирования электронных пучков состоит из четырех линейных СВЧ-ускорителей, схемы сложения электронных пучков и схемы разделения и синхронизации. Ускоряющая структура линейных ускорителей представляет собой последовательность несвязанных резонаторов. Ускорители имеют модульную конструкцию. Единичный модуль состоит из четырех резонаторов, запитанных от одного клистрона с пиковой мощностью 32 МВт. Параметры ускорителей приведены в табл. 2. Временная диаграмма работы ускорителя приведена на рис. 3.

Для достижения высокой величины среднего тока (16.8 А) используется двухступенчатая схема сложения электронных пучков (см. рис. 4). Принцип действия схемы состоит в сведении пучков разной энергии с последующим выравниванием энергий в специальном СВЧ-ускорителе.

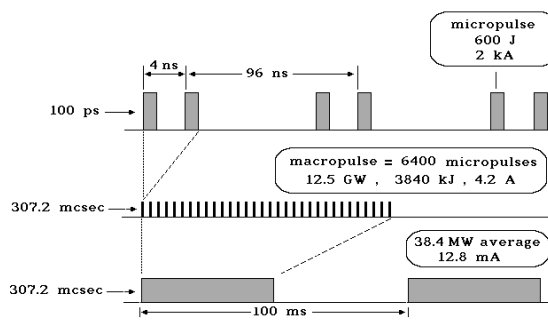


Рис. 3: Временная диаграмма работы ускорителя.

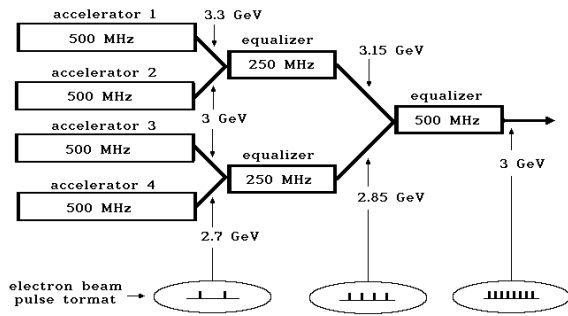


Рис. 4: Схема сложения электронных пучков.

ния задержки имеет вид спирального канала транспортировки электронного пучка и размещается в двух прямых параллельных тоннелях длиной 5600 м, замкнутых полукольцевыми тоннелями с радиусом кривизны 50 м (тоннель типа “рейс-трек”). После заполнения электронным пучком всей линии задержки, семь кикер-магнитов подключают к ней отводы. В результате 8 параллельных электронных пучков, каждый длительностью 38.4 мкс, направляются на вход 8 ЛСЭ-усилителей.

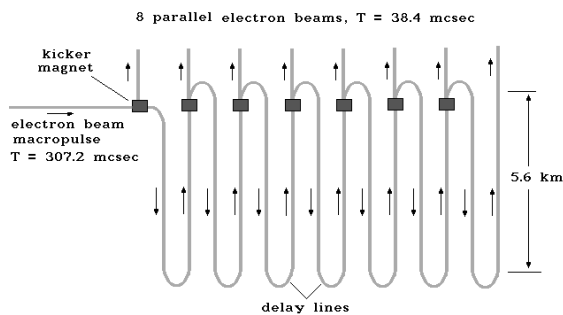


Рис. 5: Схема разделения и синхронизации электронных пучков.

сгустков, следующих с интервалом 1 нс (см. рис. 4). Временной интервал между включениями кикер-магнитов равен 384 нс. Следовательно, в каждом канале усиления усиливаются одновременно 4 оптических микроимпульса, имеющих идентичную с электронным пучком временную структуру.

В первом каскаде происходит усиление излучения от задающего лазера ($W_{\text{ext}} \simeq 1$ МВт) до мощности порядка 0.1 ТВт. Ондулятор первой стадии построен по традиционной схеме, он имеет длинный участок с фиксированными параметрами и участок с вариацией параметров. Последующие каскады имеют малые коэффициенты усиления и построены по схеме группирователь – дисперсионная секция – ондулятор с вариацией параметров. Параметры каждого каскада выбраны оптимальным образом с целью достижения максимального КПД [5]. Для фокусировки лазерного излучения используется диафрагменная линия, помещенная внутри ондулятора [1]. Усредненный КПД всего ЛСЭ-усилителя равен $\eta_{\text{FEL}} \simeq 0.26$. Для иллюстрации в табл. 3 представлены параметры последнего (100-го) каскада ЛСЭ-усилителя.

Система разделения и синхронизации преобразует один электронный пучок с длительностью 307.2 мкс в восемь параллельных электронных пучков с длительностью 38.4 мкс. Схема системы разделения и синхронизации показана на рис. 5. Электронный пучок с выхода системы сложения поступает в линию задержки с временем задержки 268.8 мкс, имеющую отводы пучка через интервалы 38.4 мкс.

С конструктивной точки зрения, ли-

ЛСЭ-усилитель. ЛСЭ-усилитель состоит из 8 параллельных каналов усиления. Каждый канал представляет собой ЛСЭ-усилитель, состоящий из 100 последовательных каскадов. Принцип работы такого ЛСЭ-усилителя был описан выше (см. рис. 1). На вход каждого канала усиления подается последовательность из 400 микроимпульсов электронных сгустков. Интервал следования микроимпульсов равен 96 нс. Каждый микроимпульс состоит из 8 электронных

Выходная оптическая система.

Функция выходной оптической системы состоит в преобразовании 8 импульсов излучения из ЛСЭ длительностью 384 нс в 64 параллельных импульса длительностью 7 нс, которые направляются на мишень реактора [5]. Такое преобразование проводится в два этапа. На первом этапе производится расширение лазерных пучков от 2 см до 2.5 м (см. рис. 2) для уменьшения нагрузки на оптические элементы до величин 30 Дж/см² и 3 ГВт/см². Далее следует этап разделения и синхронизации оптических пучков. На этом этапе 8 пучков из ЛСЭ преобразуются в 64 параллельных пучка длительностью 7 нс. Коэффициент пропускания оптической системы равен $\eta_{\text{ОРТ}} \simeq 0.89$.

Таблица 1: Параметры 100-го каскада ЛСЭ-усилителя.

<u>Электронный пучок</u>	
Энергия	3 ГэВ
Пиковый ток	2 кА
Энерг. разброс	0.1 %
Нормализ. эмиттанс	$\pi \times 10^{-3}$ см рад
<u>Ондулятор</u>	
Период	15 см
Поле (вход/выход)	1.53 Т / 0.61 Т
Длина	48 м
<u>Излучение</u>	
Длина волны	0.5 мкм
КПД	36 %
<u>Диафрагменная линия</u>	
Период	10 см
Радиус отверстий	1 см

Оценка КПД и стоимости. КПД энергетического драйвера на основе ЛСЭ определяется произведением КПД ускорителя ($\eta_{\text{АСС}} = 0.45$), КПД ЛСЭ-усилителя ($\eta_{\text{FEL}} = 0.26$) и коэффициента пропускания оптической системы ($\eta_{\text{ОРТ}} = 0.89$), и составляет величину $\eta_{\text{ТОТ}} \simeq 0.10$.

Полная стоимость энергетического драйвера составляет величину около 1500 М\$ и складывается из трёх основных частей: стоимости ускорительного комплекса (600 М\$), стоимости ЛСЭ-усилителя (700 М\$) и стоимости выходной оптической системы (200 М\$) [5].

Список литературы

- [1] E.L. Saldin et al. Preprint JINR E9-94-237, Dubna, 1994.
- [2] Е.Л. Салдин и др. Труды XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц, Том 3, стр. 184-189, Протвино, 1994.
- [3] E.L. Saldin et al. Nucl. Instrum. and Methods **A361** (1995) 317.
- [4] E.L. Saldin et al. Nucl. Instrum. and Methods **A375** (1996) 385.
- [5] E.L. Saldin et al. Preprint JINR E9-96-68, Dubna, 1996.