

**Импульсные источники  
термоядерных нейтронов  
в гибридных ядерно-  
термоядерных системах**

**С.Г.Гаранин  
ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ**

# Гибридный реактор на основе ИТС

ГР на основе ИТС в 70-х годах впервые был предложен группой учёных из ВНИИТФ (Л.П.Феоктистов, Е.Н.Аврорин и др. КЭ, 1978.-5,№2). В качестве драйвера-мощный частотно- импульсный лазер.

В статье отмечается, что:

- лазер может быть расположен на достаточно большом расстоянии от ядерно-термоядерного реактора и конструктивные элементы лазера не будут приводить к замедлению, поглощению нейтронов и ухудшать эффективность процесса деления ;
- широкие пределы допустимых колебаний критичности позволяют рассматривать конструкции реактора, в которых в первом тепловом контуре движется само топливо ( в твердофазном гранулированном, жидком или газообразном виде);
- в целом схема близка к реактору на быстрых нейтронах

# Лазерный ГР – оборотная сторона медали

*Феоктистов с соавторами отмечают также:*

- Реализация лазерного ГР потребует решения многих трудных вопросов, таких как создание лазерных установок большой мощности и многократного действия, оптической системы, выдерживающей многократные большие потоки излучения, разработки технологии и изготовления мишеней и т.д. (всё это относится и к просто ЛТС).
- Импульсный характер выделения энергии приводит к тепловому удару
- Существует проблема первой стенки: взрыв мишени может привести к повреждению внутренней поверхности blankets

# Проект лазерного ГР – 90-е годы (Феоктистов Л.П., Басов Н.Г., Субботин В.И.)

- Энергетический баланс: Коэффициент термоядерного усиления-1 ( $10^{17}$ нейтронов/ импульс), частота ТЯ вспышек-1Гц, энергия лазера -200 кДж, коэффициент усиления по энергии в бланкете – 100. Мощность реактора - 40 МВт, электрическая мощность 15МВт, 10МВт-электропитание лазера, 5МВт-потребителю.
- Малая мощность чрезвычайно полезна на стадии НИОКР - снижение экономического риска и уменьшение риска при стартовых работах с бланкетом.
- Фактически предложен оригинальный подход к созданию гибридной АЭС. Энергетическая цепь будет замкнута при создании лазера с энергией 200 кДж, частотой повторения импульсов – 10 Гц и КПД 5-10%.

# Предложение по созданию демонстрационной гибридной термоядерной – ядерной электростанции с лазерным инициированием (1992 г.)

## АННОТАЦИЯ

Предлагается комплексная программа работ на период с 1993 по 2004 годы по созданию демонстрационной гибридной ядерно-термоядерной электростанции с лазерным инициированием термоядерной реакции и подкритическим реактором деления с электрической мощностью 15 тыс. киловатт.

### Основные объекты электростанции с гибридным ядерно-термоядерным реактором



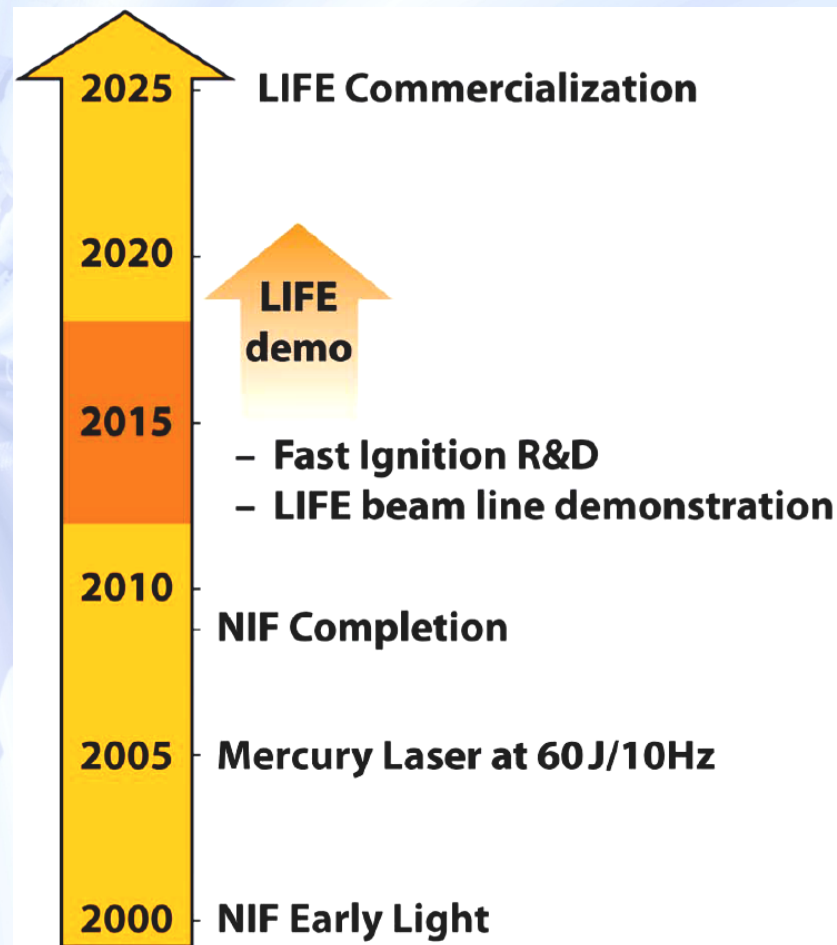
1. Ядерно-термоядерный реактор в железобетонном контейнменте.
2. Блоки лазеров, инициирующие термоядерную реакцию в мишенной камере.
3. Паро-турбинный блок, преобразующий тепло бланкета в электроэнергию.
4. Градирни, обслуживающие паротурбинный блок и блок лазеров.
5. Здание электроснабжения лазеров и их предварительных каскадов, контроля и управления всеми процессами электростанции.
6. Оптические каналы лазерного излучения.
7. Фабрика мишеней.

# Программа LIFE: Laser Inertial Fusion-Fission Energy (совещание экспертов МАГАТЭ, Вена, октябрь 2008 г.)

Edward Moses, Principal Associate  
Director, NIF&Photon Science “Future  
Directions for Inertial Fusion”

**Цель:** Создание к 2020 году  
гибридного энергетического реактора  
на базе установки NIF.

- Получение  $10^{14}$  DT-нейтронов на лазерной установке OMEGA при энергии 60 кДж на длине волны 351нм.
- Запуск установки NIF с энергией 1,8МДж на длине волны 351нм в 192 пучках.
- Создание частотно-импульсного лазера Mercury с энергией в импульсе 60 Дж при частоте 10 Гц
- Создание короткоимпульсных лазеров с ПВт уровнем мощности



# Российская версия LIFE – ЛАГИР.

## Возможна ли она?

- По нашему мнению и в Российской Федерации существует реальная возможность реализации первой стадии подобного проекта в ближайшие десять-пятнадцать лет.
- Существует достаточно глубокое понимание концептуальных основ подхода и развиты необходимые компьютерные программы.
- За 30 лет эксплуатации лазерных установок «Искра-4», «Прогресс», «Сокол», «Искра-5» накоплен практический опыт генерации термоядерных нейтронов в лазерных мишенях, в частности, освоены многие аспекты технологии их изготовления.
- Создание установки «Луч» продемонстрировало, что РФ обладает всеми необходимыми элементами технологий для создания установки мегаджоульного уровня. Введен в действие ПВт лазерный канал. Имеется необходимый задел для реализации лазерного канала с диодной накачкой.
- Активно ведутся работы по развитию технологий создания электрофизических установок для зажигания ТЯ мишеней.
- В РФ накоплен опыт проектирования и создания импульсных реакторов и работы на них. Российские специалисты имеют опыт работы с реакторами на быстрых нейтронах.

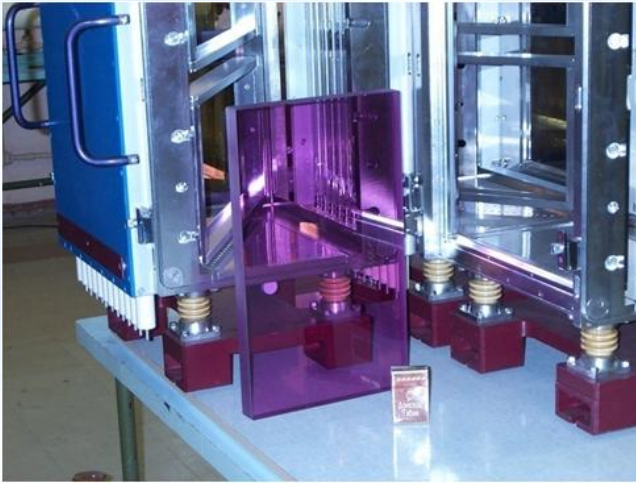
## Основные результаты исследования физики горячей плотной плазмы на установке Искра-5

- Отработана конструкция сферического бокса-конвертора. Получена рекордно горячая плазма с температурой  $\sim 12$  кэВ. Нейтронный выход составил  $\sim 10^{10}$  DD-нейтронов.
- Эксперименты с мишенями непрямого сжатия показали, что поле излучения в боксе обладает высокой степенью однородности ( $\sim 3\%$ ) с эффективной температурой 170 эВ. Зарегистрированы скорость полета оболочки  $\sim 3 \cdot 10^7$  см/с, температура DT плазмы  $\sim 3$  кэВ, нейтронный выход  $\sim 2 \cdot 10^9$ , объемное сжатие  $\sim 2 \cdot 10^3$ .
- Впервые в мире проведена серия экспериментов по исследованию влияния асимметрии на динамику работы термоядерных мишеней и генерацию ими нейтронов. Показано удовлетворительное согласие результатов математического моделирования с экспериментальными данными.

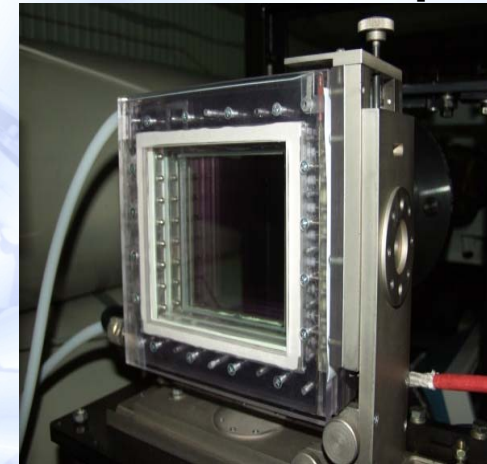


# Узлы и системы, отработанные на установке «Луч»

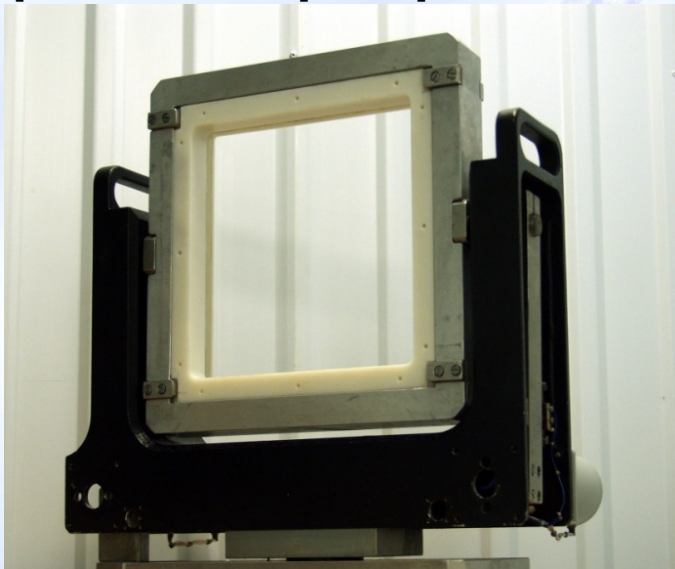
**Неодимовые слэбы и  
четырёхпроходный модуль**



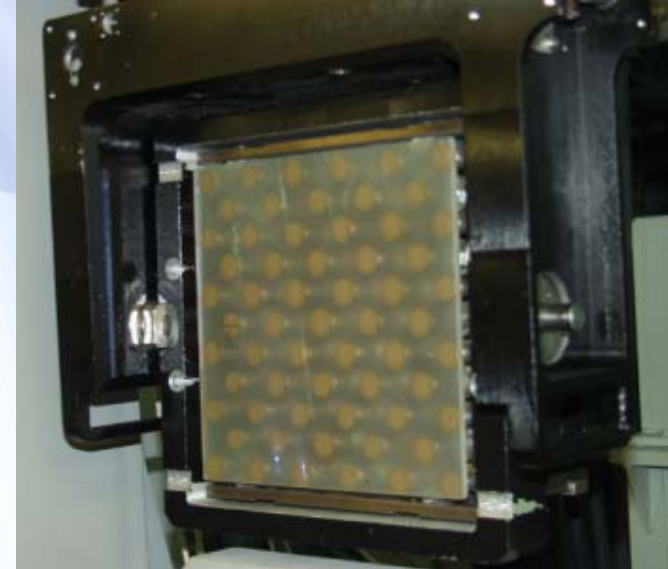
**Широкоапертурная ячейка Поккельса  
с плазменными электродами**



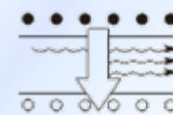
**Кристаллы преобразователи**



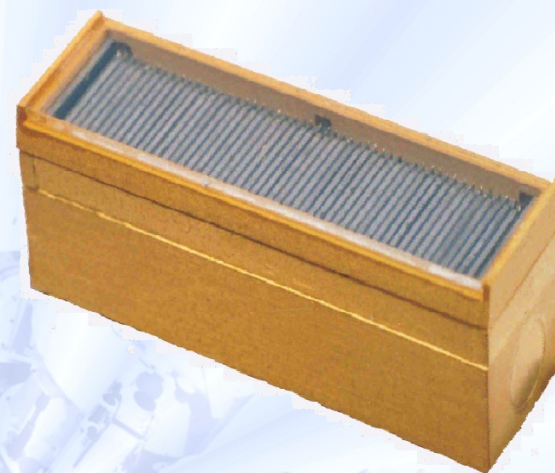
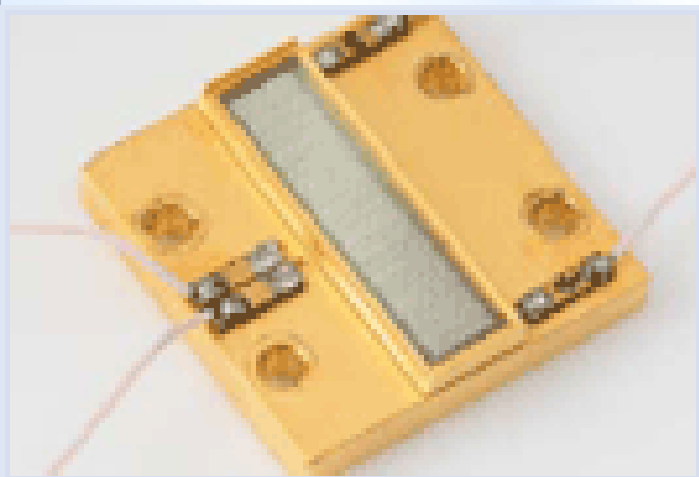
**Адаптивное зеркало и система  
коррекции волнового фронта**



# Наборные решетки диодных лазеров



Инжект



Мощность излучения  $\geq 4$  кВт.

Частота повторения импульсов до 100 Гц.

Размеры: 20мм\*25мм.

В линию поглощения – 100%.

Для мощности накачки 4 ГВт (1000кДж) необходимо  $10^6$  шт. подобных решеток.

*Сделано в России*

# Модуль с диодной накачкой

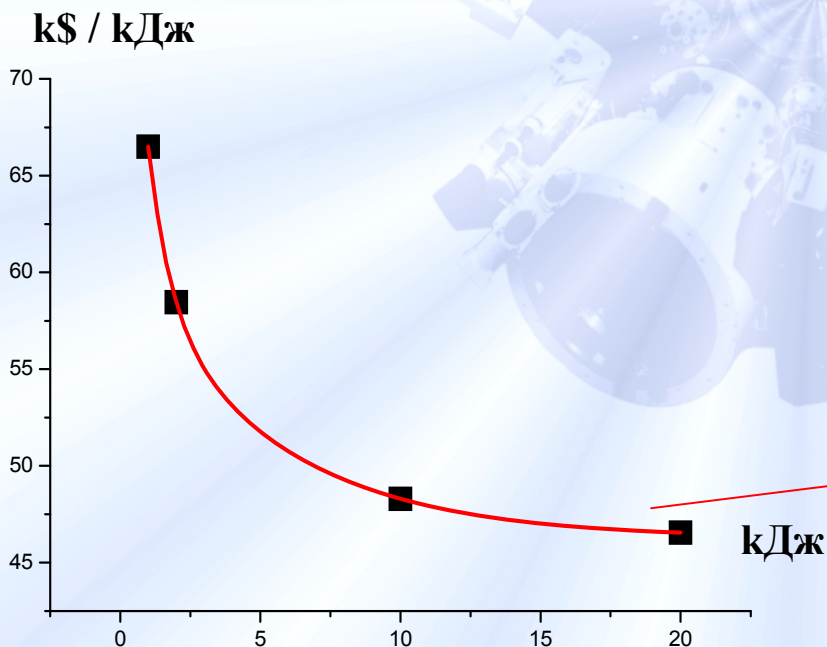
До настоящего времени рассматривались варианты ТТЛ с диодной накачкой на длине волны  $\lambda_1 = 801$  нм, ширина полосы поглощения накачки  $\Delta\lambda_1 = 5$  нм.

Стоимость лазерных диодов ~ **10 \$ / Вт**



Предлагается накачка на длине волны  $\lambda_2 = 874$  нм, ширина полосы поглощения накачки  $\Delta\lambda_2 = 20$  нм.

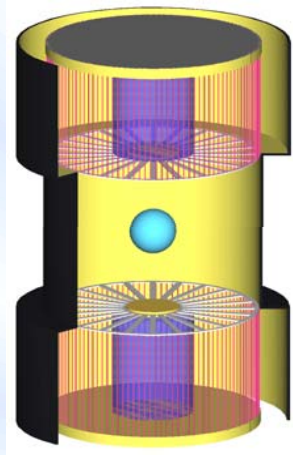
**В 4 раза снижаются требования к точности выполнения спектральных характеристик лазерных диодов**



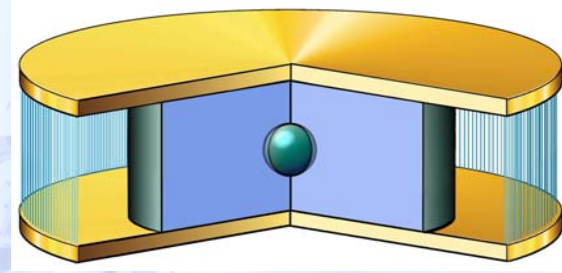
Расчетная стоимость лазерных диодов в крупной серии

**0.07 \$ / Вт**

## Отработка технологий электрофизического драйвера



Double-Pinch  
Hohlraum



Dynamic Hohlraum

### Задачи:

- Физика Z пинча - управление импульсом рентгеновского излучателя.
- Оптимизация излучателя и т/я мишени.
- Создание генератора для Z- пинча, обеспечивающего зажигание и энергетический выход.

# Этапы создания частотно-импульсного гибридного реактора

## 2011-2016

1. Разработка концепции импульсного гибридного реактора. Разработка и проверка ключевых технологий:

- Создание модуля Nd лазера-драйвера с энергией 1 кДж и частотой 10 Гц
- Разработка конструкции и создание мишени для генерации  $10^{15}$ - $10^{17}$  нейтронов за импульс. Проверка их работоспособности на разрабатываемых лазерной (УФЛ-900) и электрофизической установках.

- Разработка конструкции blankets с делящимися материалами.

Экспериментальная проверка физических и технологических принципов построения blankets на лазерном, электрофизическом и электроядерном источнике нейтронов.

## 2014-2017

2. Разработка технического проекта частотно-импульсного гибридного реактора с мощностью до 100 МВт.

## 2017-2025

3. Создание демонстрационного образца частотно-импульсного гибридного реактора с мощностью до 100 МВт.

# Энергетический баланс



# Заключение

- ✓ Предложенный Л.П.Феоктистовым с сотрудниками проект гибридного реактора с импульсным источником термоядерных нейтронов представляется и сегодня вызывающе интересным и перспективным.
- ✓ Новый и важный аспект в его развитии связан с окончанием строительства NIF и предложением ЛЛНЛ по грандиозному проекту LIFE – Laser Inertial Fusion- Fission Engine.
- ✓ РФ обладает элементами основных технологий для реализации исследовательского лазерного гибридного реактора Лагир с мощностью в нагрузку ~ 100 МВт.
- ✓ На установке УФЛ-900 при использовании 4-8 модулей возможна отработка модуля двухкаскадного blankets при умеренных нейтронных потоках .
- ✓ При достижении порога зажигания на электрофизических установках, возможна отработка blankets при высоких нейтронных нагрузках.