

Курс лекций

ЛАЗЕРЫ И НАНОФОТОНИКА

И.М. Белоусова

Санкт-Петербург

2013

Определения

“Нано” – от греческого слова “карлик”

1 нм – 10^{-9} м

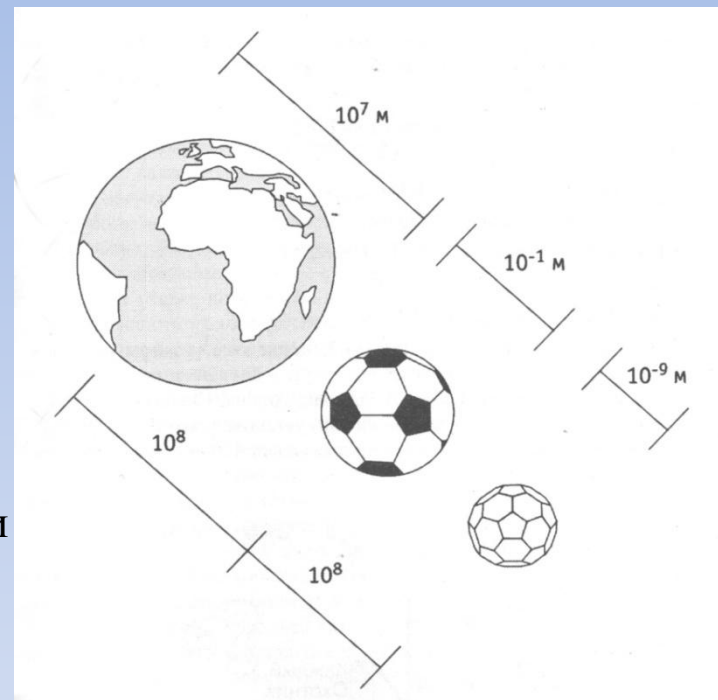
Начальное слово направления нанофотоника и
нанотехнология

Нанофотоника или фотоника наноструктур – новое направление, которое занимается исследованием взаимодействия излучения с наночастицами и наноструктурами

Нанотехнология – совокупность технических приемов и исследовательских методик, позволяющих создать объекты размером $1 \div 100$ нм и манипулировать ими

Международный союз чистой и прикладной химии
(International Union of Pure and Applied Chemistry)

Наносистема – это объект, размер которого хотя бы по одному измерению не превышает 100 нм



Начало нанотехнологической эры

Ричард Фейнман

Лауреат Нобелевской премии за создание теории квантовой электродинамики в 1965 г.

В 1959 г. Ричард Фейнман - провидческая лекция в Калифорнийском Технологическом институте

“Там внизу еще много места”

Гипотеза создания наноразмерных материалов и манипулирования ими (нанороботы, нанолитография, биофотоника и др.).

“Лекция была столь провидческой, что не доходила до людей, пока до нее не дошла технология”

Немного истории

- Древний Египет

Синтез нанокompозитного материала галенита (сульфид цинка)

Размер – до 5 нм

- Древняя Греция

Чаша Ликурга (Британский музей)

Поглощение и рассеяние наночастиц золота и серебра

- Средневековая Европа

Витражи

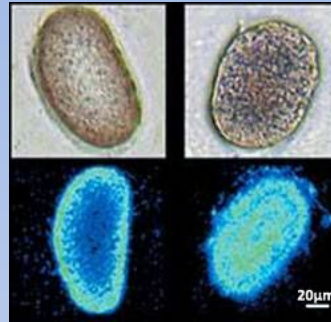
Стекло с добавками наночастиц золота и др. металлов

Наноплазмоника металлических структур

- Древний Восток (Древняя Индия)

Углеродные нанотрубки в составе дамасской стали.

Гибкость и твердость



Поперечный срез волос, полученный оптическим (вверху) и флуоресцентным (внизу) методами. Видно, что при длительном воздействии древней краски наноразмерные кристаллы глубже проникали в структуру волоса (справа), чем при кратковременном (слева)

Чаша, на которой изображен царь эдонов Ликург, которого Дионис порастил безумием, меняет свой цвет в зависимости от того, где находится источник света: снаружи (слева) или внутри (справа). Посередине рисунка — наночастица золота из образца стекла чаши Ликурга, увиденная с помощью электронного микроскопа



Витраж из собора Нидарос в Трондхейме (Норвегия). Собор построен на месте захоронения Олафа Святого, покровителя Норвегии. (Фото Gerd A.T. Müller.)

Нановолокна цементита, заключенные в углеродные нанотрубки, в образце дамасской стали после травления соляной кислотой (получено методом электронной микроскопии)



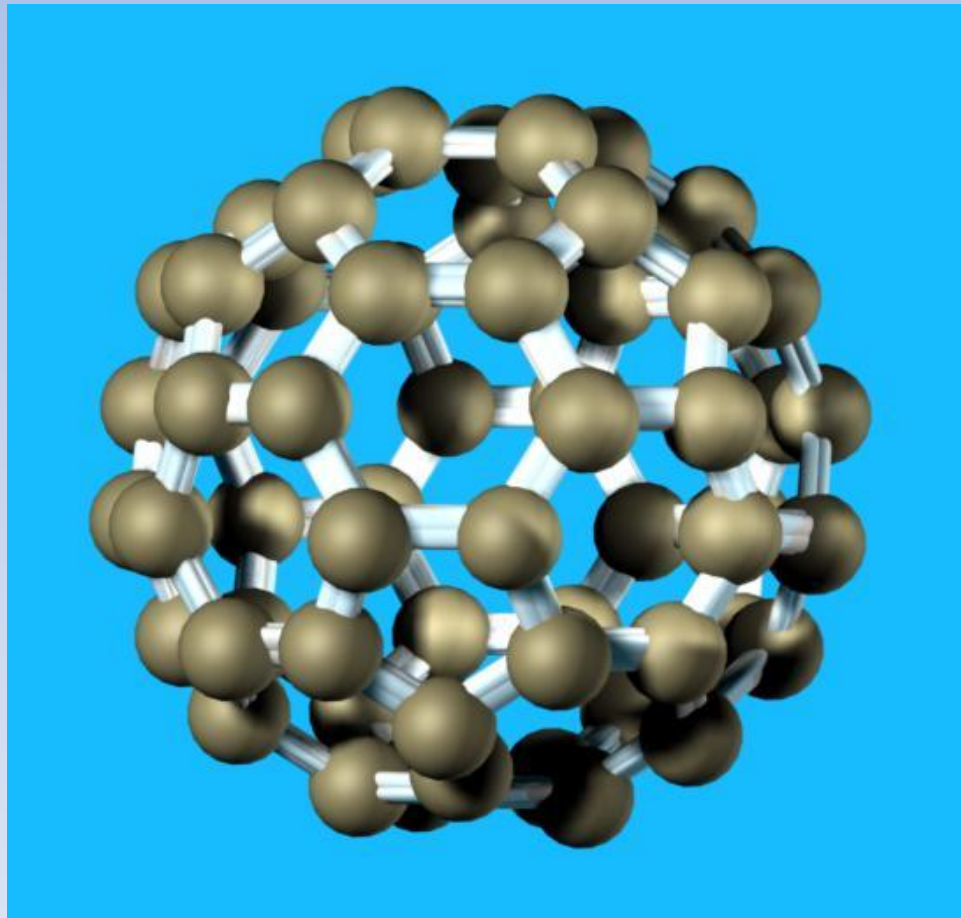
Фуллерены

Открытие фуллерена 1985 г.

Нобелевская премия 1996 г.

- Р.Ф. Керл (Robert F. Curl)
Rice University, Houston, USA
- Г. Крото (Harold Kroto)
University of Sussex, Birgtov,
England
- Р. Е. Смолли (Richard E.
Smalley)
Rice University, Houston, USA

Фуллерены – молекулы, состоящие из атомом углерода ($n > 20$). Молекула C_{60} – “бакминстерфуллерен” – состоит из 60 атомов углерода, расположенных на сферической поверхности в вершинах 20 шестигранников и 12 пятигранников.



К истории открытия фуллеренов

1970 г.

- Первый человек, представивший молекулу фуллерена C_{60} в виде усеченного икосаэдра

Эйдзи Осава (Япония)

Статья в журнале “Катаку” на японском языке

Назвал “Сокербол”

soccer-ball – футбольный мяч



1973÷1974 гг

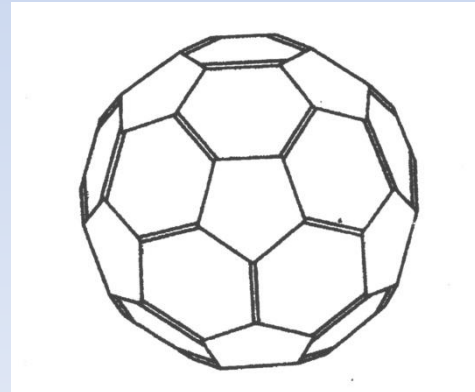
- Квантово-химические расчеты гипотетической замкнутой полой молекулы C_{60} - Бочвар, Гальперн, Станкевич, ИНЭОС, Россия

- Многогранники Эйлера

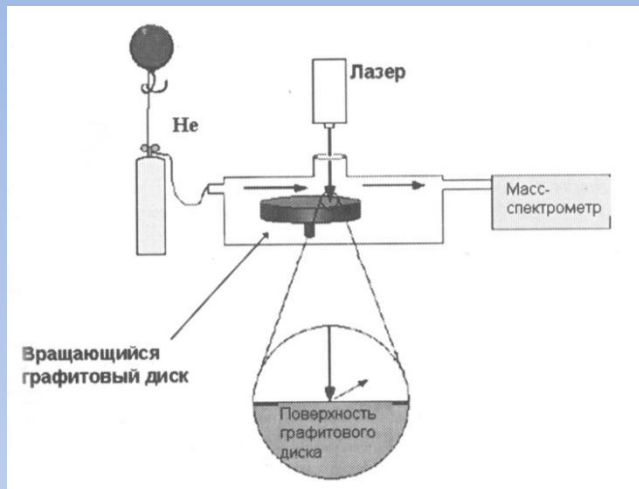
Рональд Эйлер (1706-1783гг.)

Член Петербургской Академии Наук

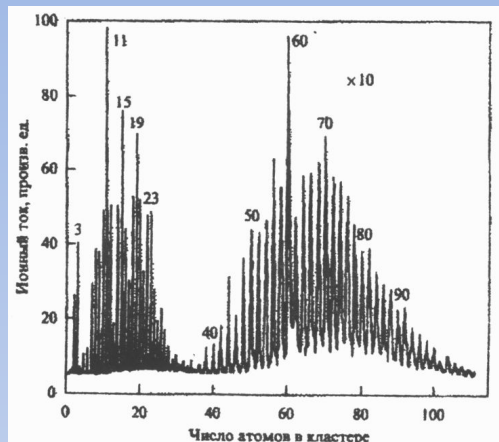
Теорема Эйлера $V-P+Г=2$



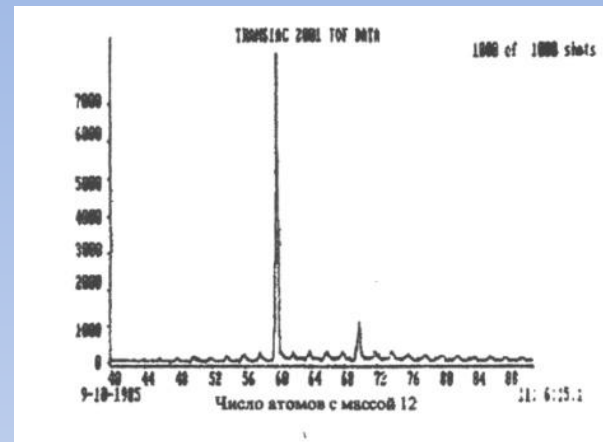
Открытие фуллеренов



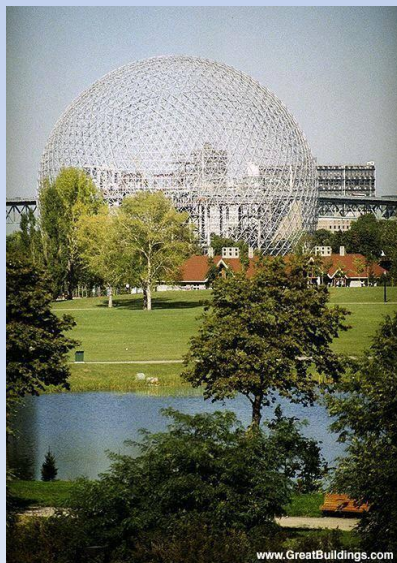
Установка для изучения образования кластеров



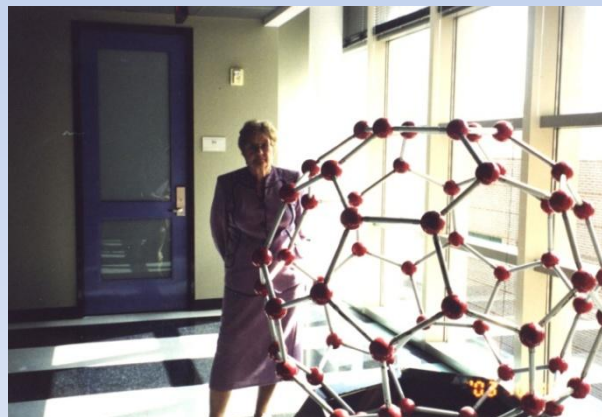
Масс-спектр углеродных наночастиц



Масс-спектр углеродных кластеров с пиком C_{60}



Павильон США на всемирной выставке ЭКСПО-67 в Монреале



Райс Университет, США, лаборатория Ричарда Смолли

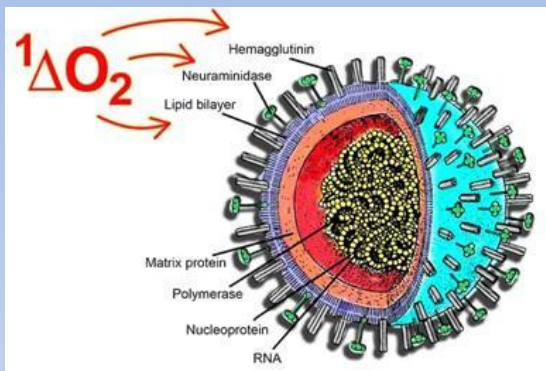
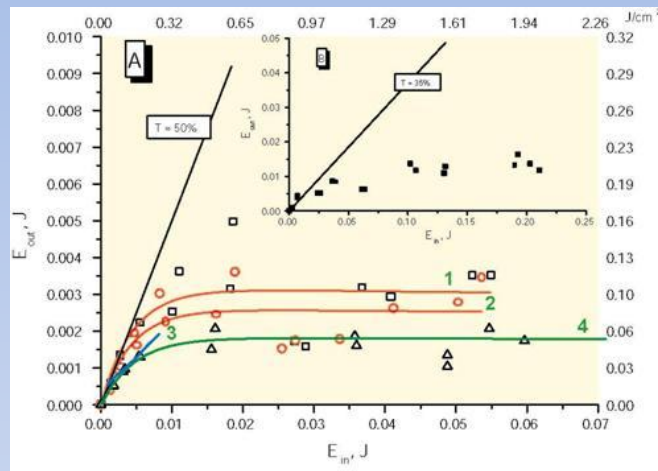
1991 г. Кречмер – фуллерены - дуговой разряд – промышленный выпуск →

Применение фуллеренов

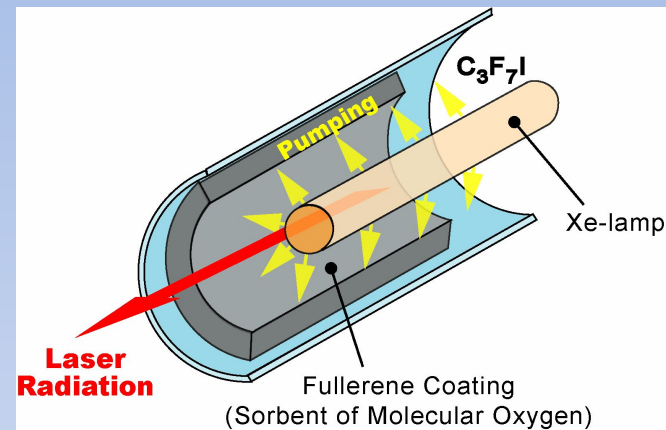
Нелинейная оптика
Управление лазерным излучением

Медицина и фармакология

Фуллерен-кислород-йодный лазер



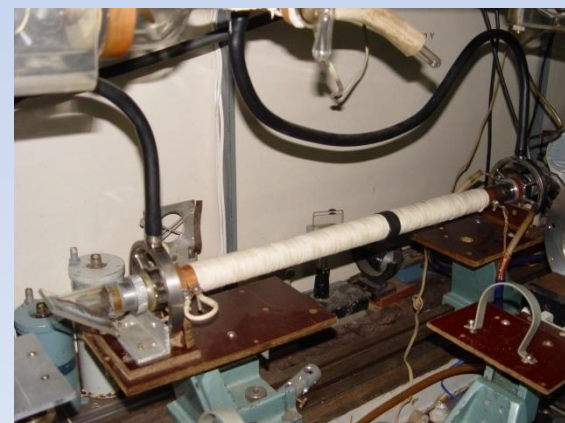
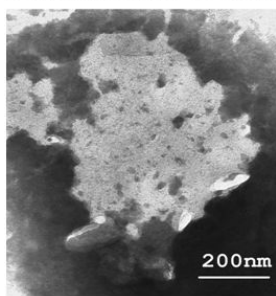
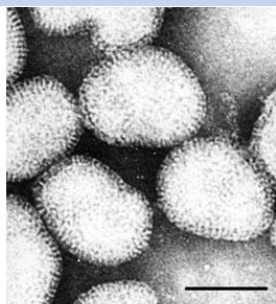
Инактивация вирусов в биологических жидкостях



Широкополосный быстродействующий нелинейно-оптический ограничитель лазерного излучения

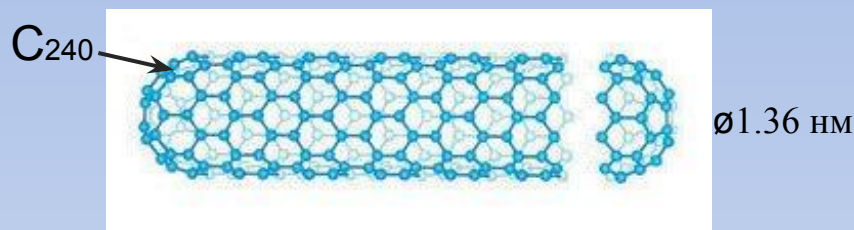


До облучения
После облучения



Углеродные нанотрубки

Нанотрубки – протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких нанометров и длиной до нескольких микрон, состоящие из одного или нескольких гексагональных графитовых слоев и заканчивающихся полусферической головкой, которая может рассматриваться как половинка фуллерена



Однослойная нанотрубка



Многослойная нанотрубка

Нанотрубки в 10÷12 раз прочнее
и в 6 раз легче стали

Открытие нанотрубок

Сумио Инджима 1991 год

(До этого 1952 г. российские ученые первое электронно-микроскопическое наблюдение нанотрубок (ЖФХ, 26,88,1952. Радужкевич Л.В. Лукьянович В.М.))

Методы получения:

1. Дуговое распыление графита в присутствии катализаторов.
2. Каталитическое разложение углеводородов.

Применение:

Нелинейная оптика, сорбенты газов – водородная энергетика, мембраны, автоэмиссионные катоды, зонды атомно-силовых микроскопов, нанотрубчатая пряжа (хлопок)→по прочности не уступает стали, а по проводимости – алюминию, ткань для пожарников NASA – разработка жилого блока космонавтов для Марса.

*Фуллерен-кислород-йодный лазер с
оптической, в том числе
Солнечной накачкой*

Новый подход к созданию йодного-газового лазера

Типы существующих йодных лазеров:

- Фотодиссоционный йодный лазер (PDIL) имеет оптическую накачку с мощным импульсом генерации.
- Химический кислород-йодный лазер (COIL) имеет высокую мощность излучения для $\lambda = 1.315 \mu\text{м}$.

НЕДОСТАТКИ:

- PDIL – обладает низкой эффективностью
- COIL – основан на циркуляции Cl , экологическая опасность
- Поэтому ИЛФ был предложен и разработан **ФУЛЛЕРЕН-КИСЛОРОД-ЙОДНЫЙ ЛАЗЕР (FOIL)**.

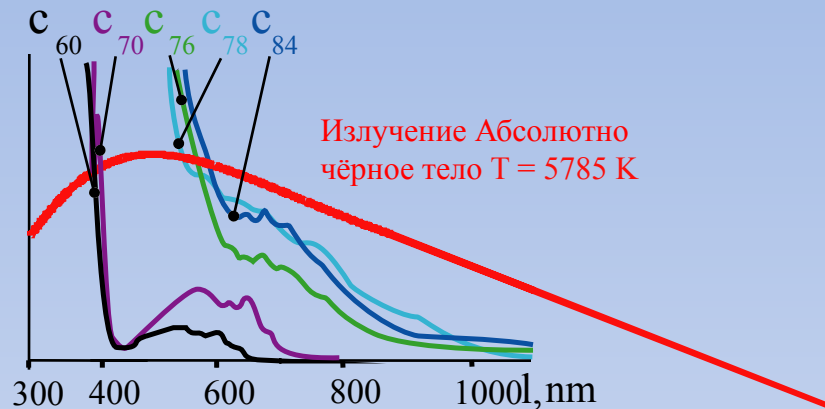
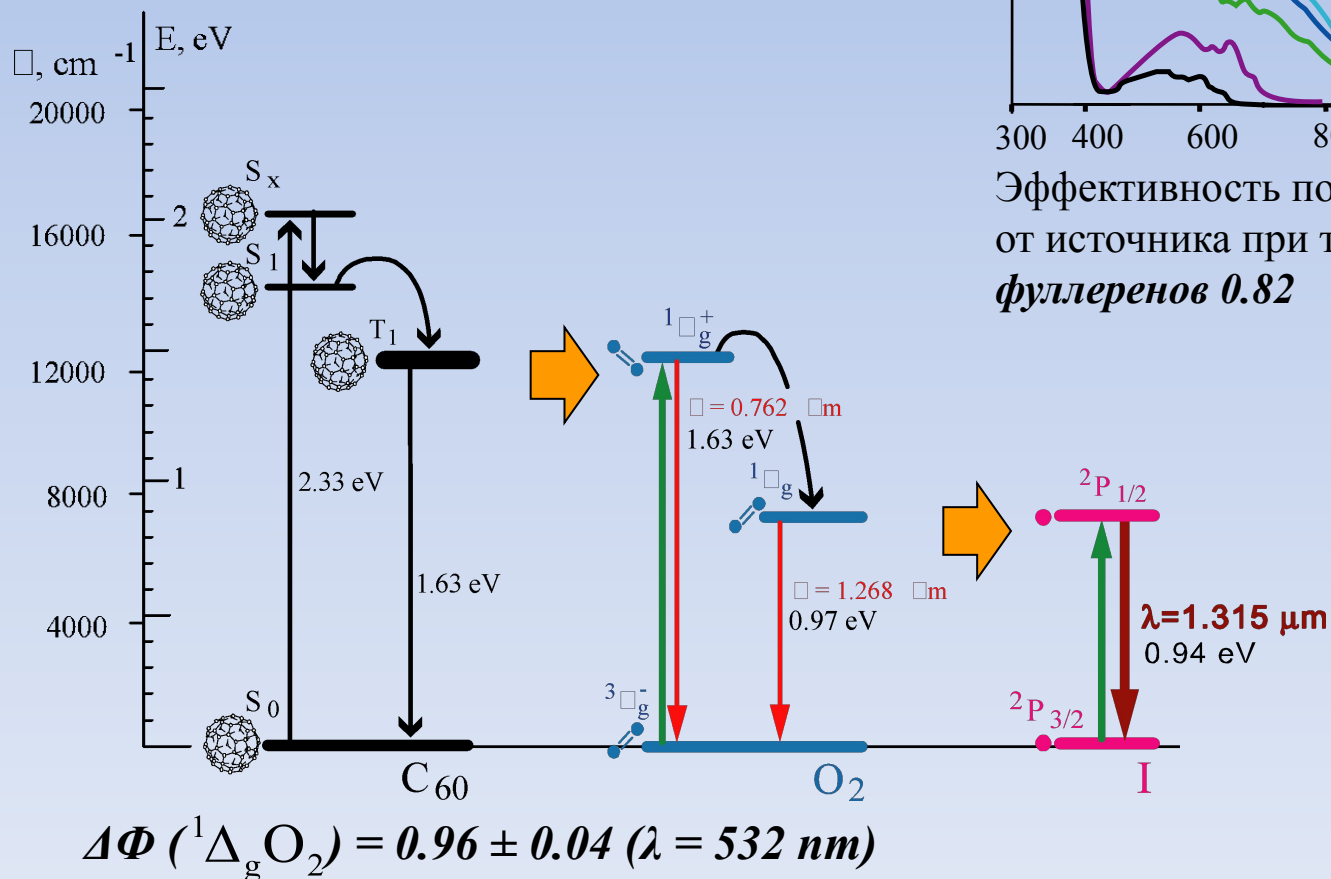
ПРЕИМУЩЕСТВА FOIL:

- Нет реакций с хлором, возможность работать в замкнутом цикле без замещения реагентов, экологическая безопасность.
- Прямое преобразование солнечной энергии к лазерному лучу.
- Высокая эффективность преобразования оптической накачки в лазерное излучение (6%-10% для ламповой накачки, 30% для солнечной накачки).

Кинетическая схема фуллерен-кислород-йодного лазера (FOIL)

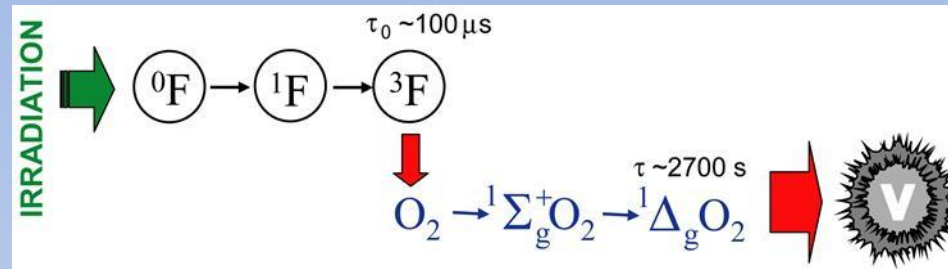
Физическая эффективность = 40%

Энергия поглощения ~ 30%



Эффективность поглощения излучения от источника при температуре **5785K** для фуллеренов **0.82**

Основа высокой эффективности фуллерен-содержащих сред для генерации синглетного кислорода

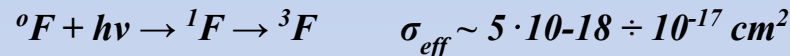


Квантовый выход синглетного кислорода для фуллеренов

$$\Delta\Phi = 0.96 \pm 0.04 (\lambda = 532 \text{ nm}),$$

Главные реакции:

поглощение света



получение синглетного кислорода



обратная реакция тушение синглетного кислорода



Для фуллеренов: $K_3 \ll K_2$

$$< 10^{-16} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$$

Главные преимущества фуллеренов как фотосенсибилизаторов:

*Высокая фотохимическая стабильность. Отсутствие вредных продуктов распада и возможность многократного применения фуллеренов.

*Легко извлечь из биологической среды после фотодинамического воздействия

Твёрдо-фазовый генератор синглетного кислорода.

Физический принцип

Общий процесс взаимодействия между молекулами кислорода и твёрдотельным покрытием фуллеренов

Получение синглетного

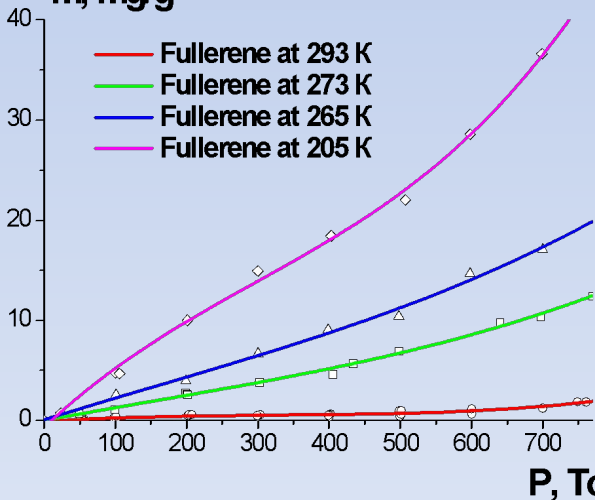
Сорбция молекул кислорода фуллеренами и углеродными наноструктурами

кислорода при взаимодействии фотовозбуждённых фуллеренов и углеводными наноструктурами с молекулярным кислородом

Выход синглетного кислорода в газовую фазу и взаимодействие с атомами йода

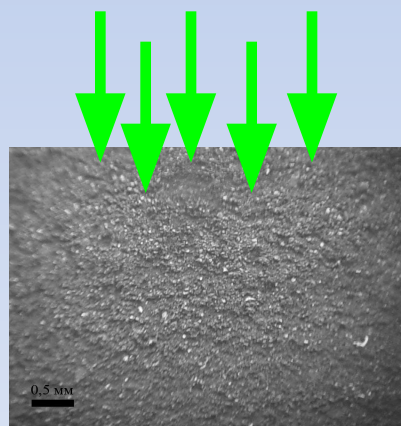
m, mg/g

- Fullerene at 293 K
- Fullerene at 273 K
- Fullerene at 265 K
- Fullerene at 205 K



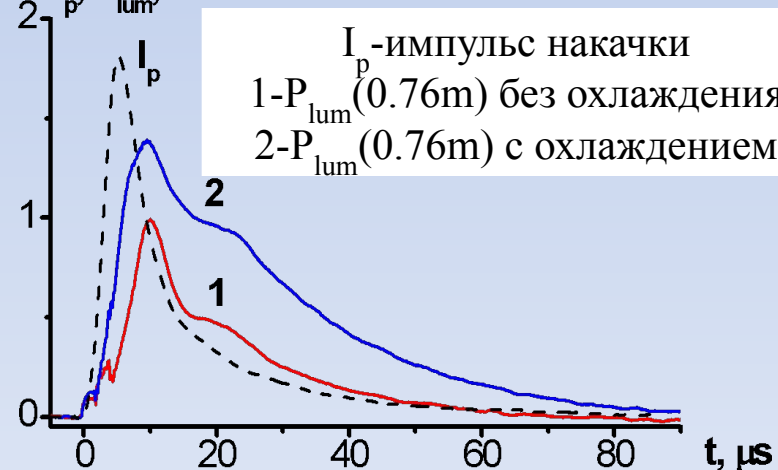
Сорбция молекул кислорода фуллереном C_{60}

$h\nu$



Микрофотография фуллеренового покрытия на стеклянной пластинке

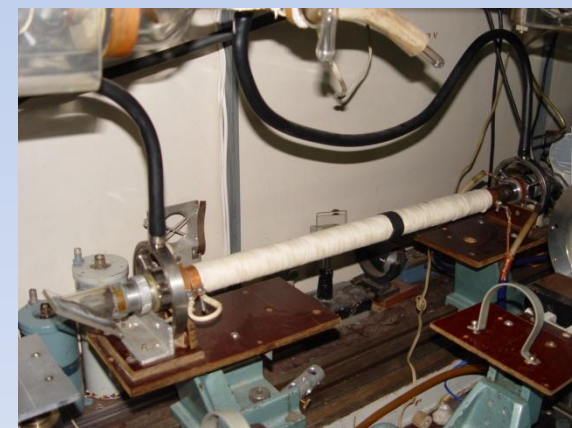
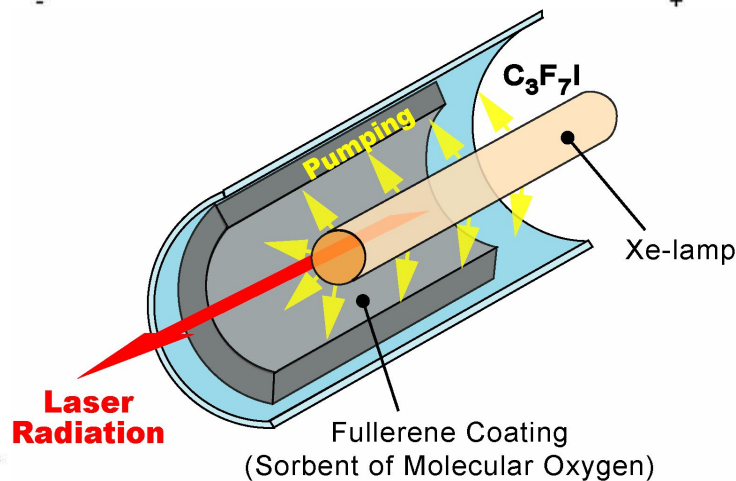
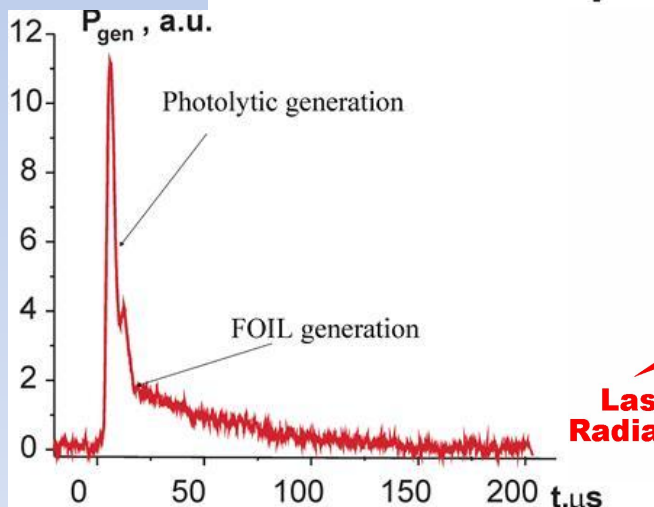
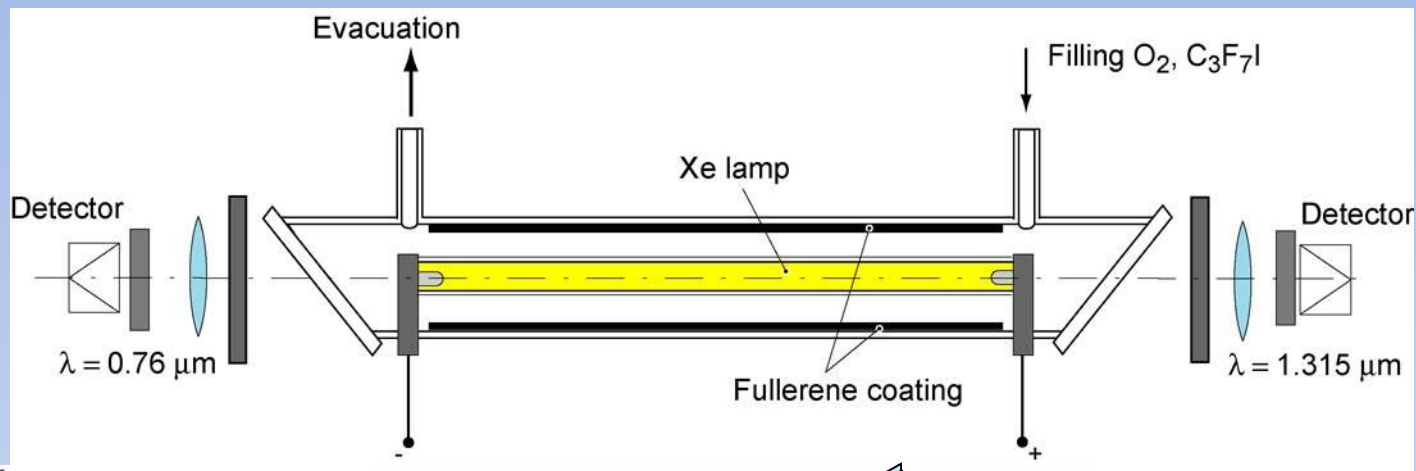
$I_p, P_{lum}, a.u.$



I_p - импульс накачки
1- $P_{lum}(0.76m)$ без охлаждения
2- $P_{lum}(0.76m)$ с охлаждением

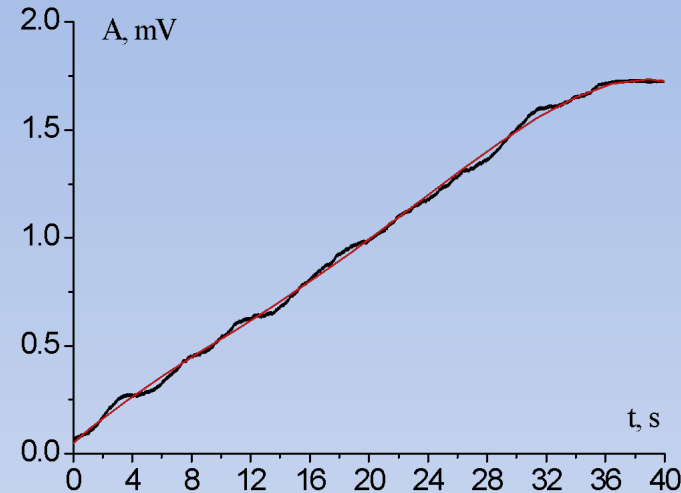
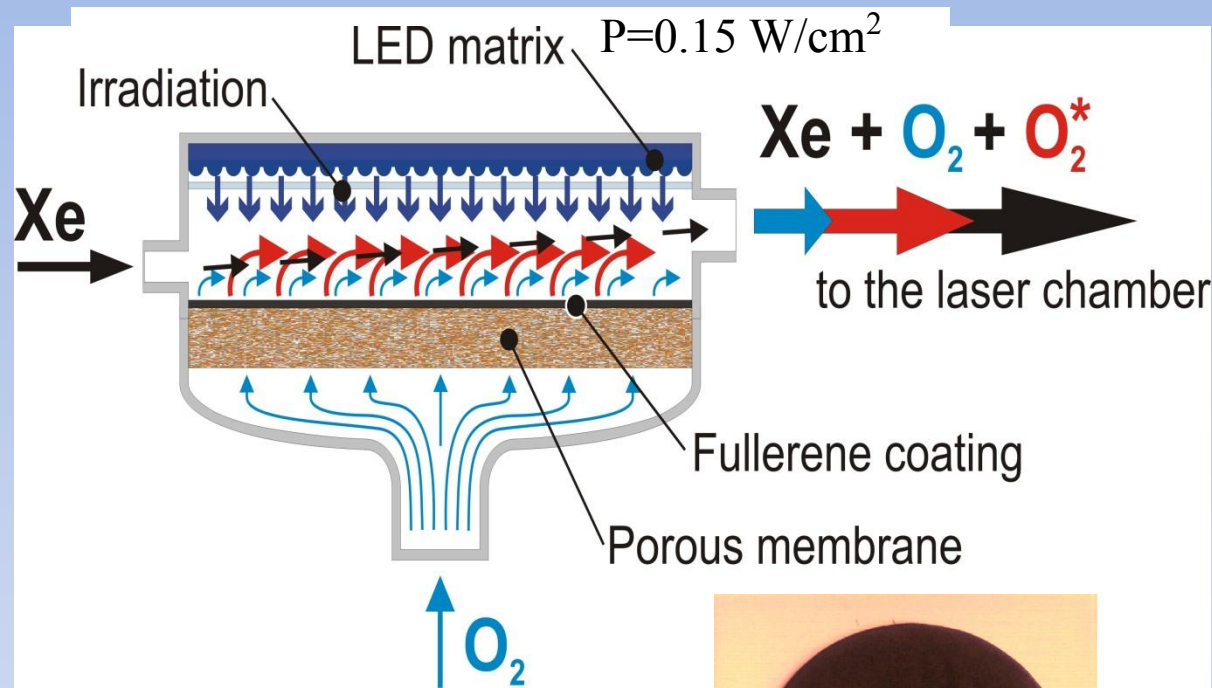
Фотодесорбция синглетного кислорода

FOIL с осевой Хе-ламповой накачкой

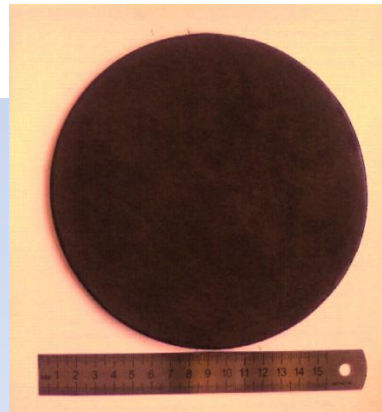


Энергия генерации – 4.2 Дж. Удельная энергия ~ 9 Дж/л
Физическая эффективность ~ 10%

Model of a singlet oxygen generator on the base of fullerene membrane



Oscillogram of singlet oxygen luminescence over the continuously irradiated fullerene membrane



A singlet oxygen generation with oxygen flow through the porous membrane at a continuous irradiation of the membrane surface is realized.

КОМПОНЕНТЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ: ФУЛЛЕРЕН-КИСЛОРОД-ЙОДНЫЙ ЛАЗЕР С ПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ



Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова

Экспериментальный стенд с фуллерен-кислород-йодным лазером с накачкой имитатором солнечного излучения



Параметры:

- ⇒ Пиковая мощность – **40 кВт**;
- ⇒ Средняя мощность излучения – **30 Вт**;
- ⇒ Частота повторения импульсов – **10 Гц**;
- ⇒ Рабочий цикл – **30 сек.**
- ⇒ Ближайшая перспектива – лазер с пиковой мощностью **1 МВт** и со средней мощностью несколько киловатт.
- ⇒ Лазеры киловаттного уровня имеют хорошие рыночные перспективы для промышленного применения различных областях.

Использование фуллерен-кислород-йодного лазера

Промышленное применение

Излучение на $\lambda = 1.315 \text{ мкм}$ может быть использовано в волоконно-оптических каналах.

Непосредственное преобразование солнечной энергии в лазерный пучок

Лазерное излучение может быть использовано для управления космическими кораблями и решения будущих энергетических проблем на земле.

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА – ЭТО ОДНО ИЗ ГЛАВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ XXI ВЕКА



Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова

Существующие направления:

- ⇒ солнечные термальные установки - для нагрева воды и обогрева зданий
- ⇒ солнечные фотоэлектрические системы - для производства электроэнергии

Годовой объем инвестиций в традиционную солнечную энергетику составляет около **38 миллиардов долларов.**

Вклад солнечной энергетики в альтернативную энергетику составляет в настоящее время **25%.**

Установленная мощность фотоэлектрических систем составляет **16 ГВт.**



НЕДОСТАТКИ ТРАДИЦИОННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ



Территории с серьезным энергетическим потенциалом расположены далеко от потребителей



Зависимость от погодных условий. Значительные (до 60-90%) потери энергии при прохождении атмосферы



Значительные площади, занимаемые солнечными электростанциями большой мощности

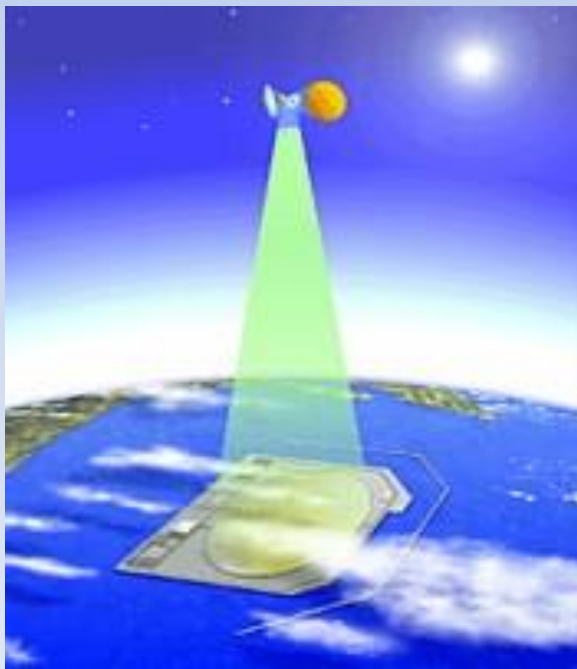


Невозможность использования в ночное и вечернее время, снижающая КПД системы в несколько раз

НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ – ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ



Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова



Идея получения электроэнергии с борта космических электростанций является яркой и привлекательной. Она лишена недостатков традиционных солнечных электростанций:

- ⇒ Энергия доступна практически круглосуточно
- ⇒ Не зависит от погодных условий
- ⇒ Энергия может быть передана в практически любой район поверхности Земли, включая северные территории

ЦЕЛЬ ДАННОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ:

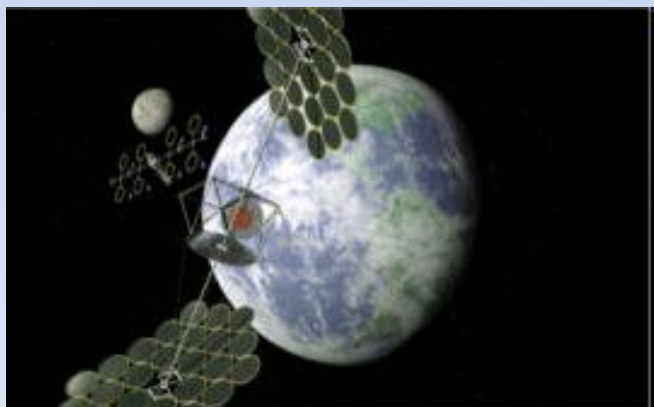
Приступить к разработке проекта орбитальной электростанции на базе фуллерен-кислород-йодного лазера с использованием полученной энергии для:

- ⇒ Передачи энергии потребителям на Землю
- ⇒ Для энергетической подпитки спутников
- ⇒ Для уничтожения космического мусора
- ⇒ Для подавления зародышей тайфунов
- ⇒ Для применения в составе систем военного назначения

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН ПО ПОЛУЧЕНИЮ ЭНЕРГИИ НА ОРБИТЕ И ДОСТАВКИ ЕЁ НА ЗЕМЛЮ



Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова



СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ

- ⇒ Штат Калифорния заключил контракт с компаниями Pacific Gas and Electric Company и Solaren о поставке в 2016 году энергии с орбиты Земли энергопотоком 200 МВт
- ⇒ Стоимость проекта 10 млрд.долларов
- ⇒ Технология - фотоэлектрические преобразователи и микроволновые излучатели.
- ⇒ В состав системы будут входить 4-5 спутников.
- ⇒ Размеры приемной системы на Земле составляют несколько квадратных километров
- ⇒ С помощью системы будет организовано энергоснабжение 250 тысяч домов в округе Фресно, Калифорния

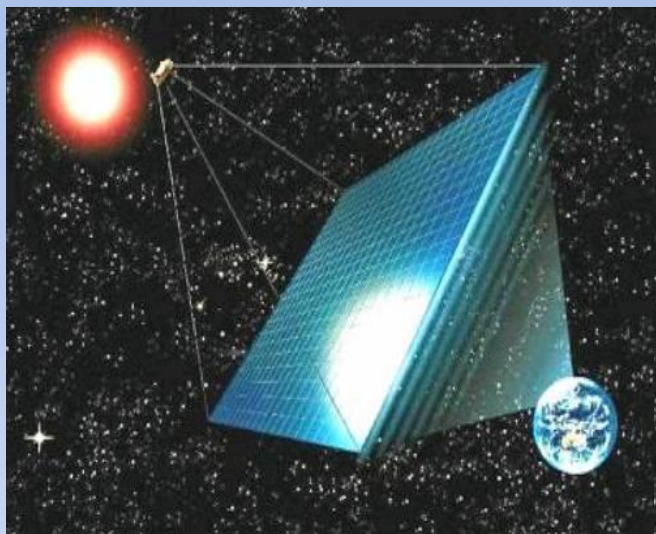
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН ПО ПОЛУЧЕНИЮ ЭНЕРГИИ НА ОРБИТЕ И ДОСТАВКИ ЕЁ НА ЗЕМЛЮ



Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова



ЯПОНИЯ

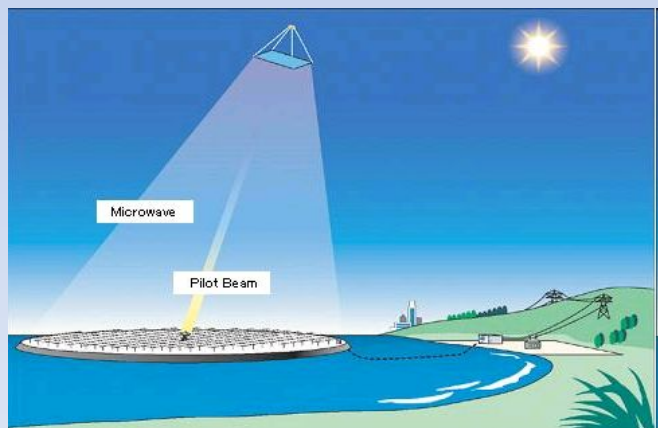


- ⇒ Проект реализуется государственным органом - Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA)
- ⇒ Финансирование 21 млрд.долларов
- ⇒ Планируемая мощность электростанции – 1 ГВт
- ⇒ Массив солнечных батарей площадью 4 кв.км
- ⇒ Прием энергии – гигантская параболическая антенна морского базирования

- ⇒ Для реализации проекта правительство Японии учредило консорциум на базе корпораций Mitsubishi Electric, NEC, Fujitsu и Sharp.

- ⇒ Два варианта технологии:

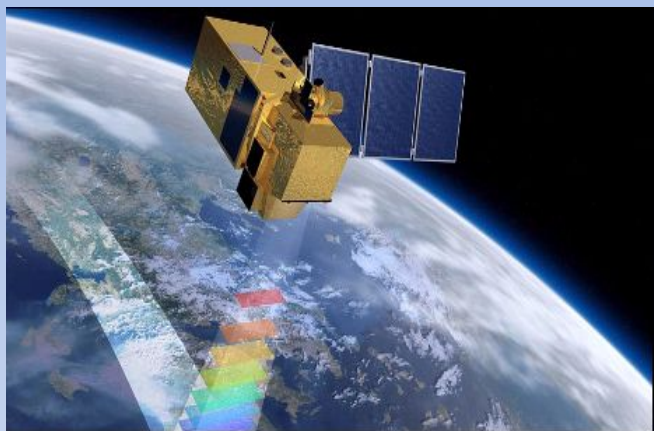
- 1) прямое преобразование солнечной энергии в лазерное излучение с использованием линз Френеля и Nd:YAG лазера.
- 2) преобразование солнечной энергии в микроволновое излучение



ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН ПО ПОЛУЧЕНИЮ ЭНЕРГИИ НА ОРБИТЕ И ДОСТАВКИ ЕЁ НА ЗЕМЛЮ



Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова



ЕВРОПЕЙСКИЙ СОЮЗ

- ⇒ EADS – Astrium – ведущая европейская компания по производству спутников и спутникового оборудования объявила в январе 2010 о планах запуска демонстрационного спутника с солнечной энергетической установкой на борту
- ⇒ Для передачи энергии на Землю предполагается использование излучения инфракрасного лазера, более безопасного с экологической и биологической точки зрения, чем микроволновое излучение, применяемое в проектах США и Японии.
- ⇒ Эффективность устройства преобразования энергии лазерного луча в электрическую энергию составит до 80 процентов.
- ⇒ Размер финансирования и целевые показатели по мощности не разглашаются.



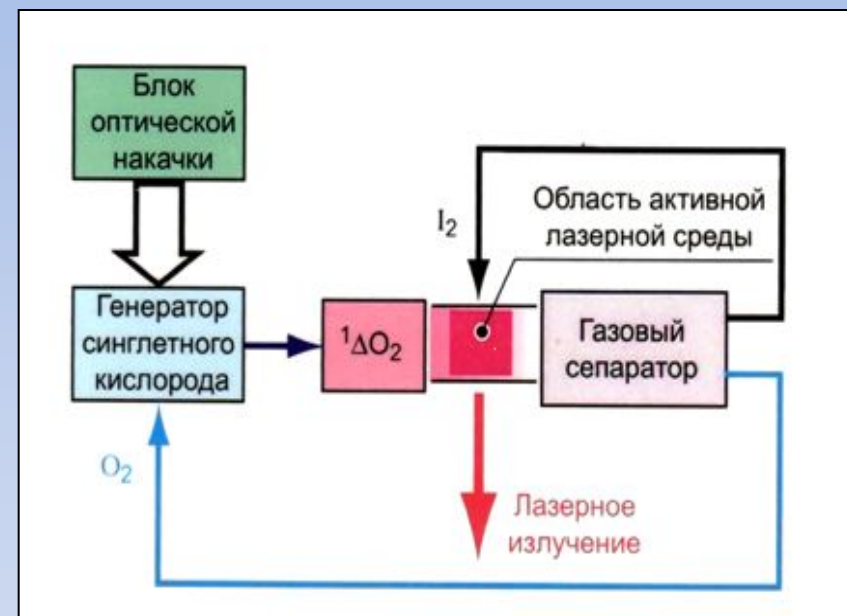
НОВЫЙ РОССИЙСКИЙ ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ЭФФЕКТИВНЕЕ ЗАРУБЕЖНЫХ



Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова

Преимущества:

- ⇒ Прямая солнечная накачка позволяет использовать значительную часть энергии Солнца. Выдающаяся эффективность преобразования солнечной энергии в лазерный луч – до 30%
- ⇒ Лазер замкнутого цикла – нет расхода реагентов на орбите
- ⇒ Непрерывный, неограниченный цикл работы
- ⇒ Экологически безопасная доставка энергии на Землю – в отличие от американского и японского проектов
- ⇒ Российская идея. Приоритет, защищенный патентом. Зарубежных аналогов нет



Создание российскими специалистами кислород-йодного лазера с реактором синглетного кислорода на основе фуллеренов является принципиальным прорывом в лазерной технике применительно к прямому преобразованию солнечной энергии в лазерное излучение

Разработка защищена патентом.

Патент РФ Института Лазерной физики ГОИ им.С.И.Вавилова № 2181224 от 20.06.2000 г.

Способ получения генерации стимулированного излучения на атомах йода

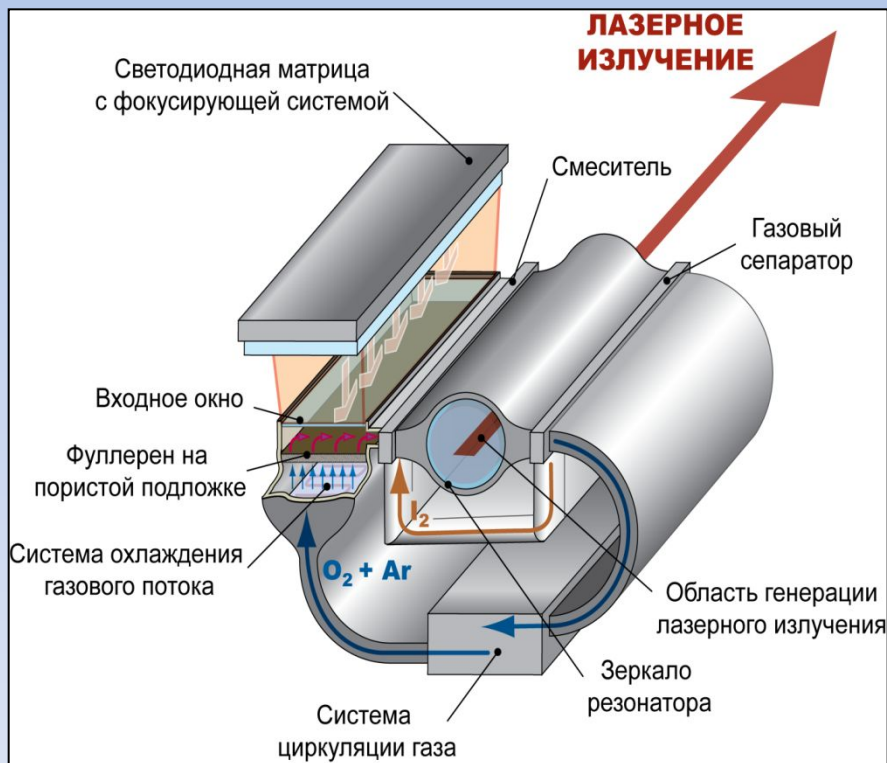
Авторы: А.А. Мак, О.Б. Данилов, И.М. Белоусова.

КОМПОНЕНТЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ: ФУЛЛЕРЕН-КИСЛОРОД-ЙОДНЫЙ ЛАЗЕР С ПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ



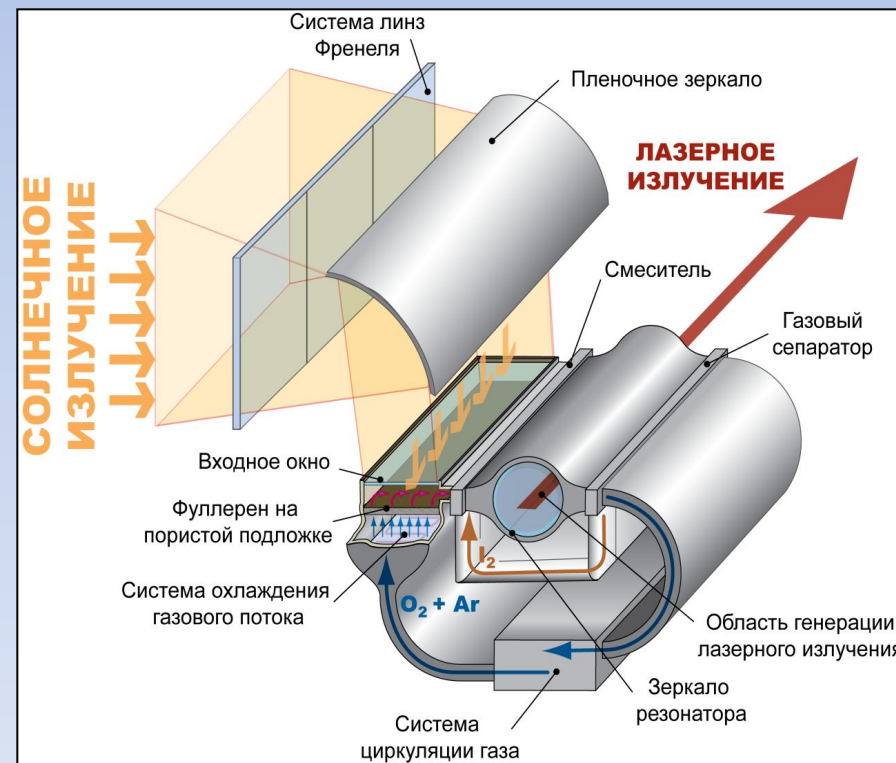
Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова

Исследовательский лазер с оптической накачкой имитатором солнечного излучения (светодиодная матрица)



Мощность – 2-3 КВт

Лазер с прямой солнечной накачкой для орбитальной электростанции и демонстрационного эксперимента (модуль)



Суммарная мощность – 1 ГВт

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФУЛЛЕРЕН-КИСЛОРОД- ЙОДНОГО ЛАЗЕРА.

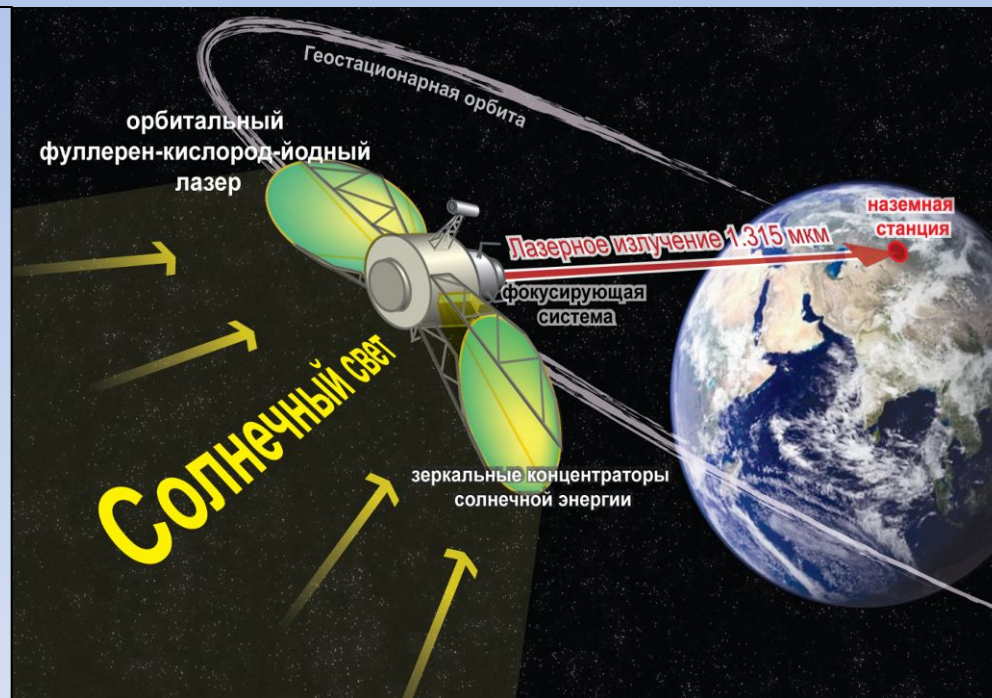
ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА.



Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова

Состав орбитальной лазерной энергетической системы:

- ⇒ Орбитальный фуллерен-кислород-йодный лазер (ФОИЛ) мощностью 1 ГВт, размещаемый на геостационарной орбите высотой ~36 000 км
- ⇒ Зеркальный космический концентратор солнечной энергии пленочного типа суммарной площадью 2,56 кв.км
- ⇒ Лазерно-оптическая адаптивная система формирования угловой расходимости до 10^{-7} радиан и сверхточного наведения на Землю (10^{-8} радиан)
- ⇒ Энергетическая наземная станция приема и преобразования лазерного луча в электрическую энергию



КПД преобразования солнечной энергии в лазерный луч – 30%
КПД преобразования лазерного излучения в электрическую энергию $\geq 70\%$