Курс лекций

ЛАЗЕРЫ И НАНОФОТОНИКА

И.М. Белоусова

Санкт-Петербург
2013

Определения

“Нано” – от греческого слова “карлик”

1 нм – 10^{-9} м

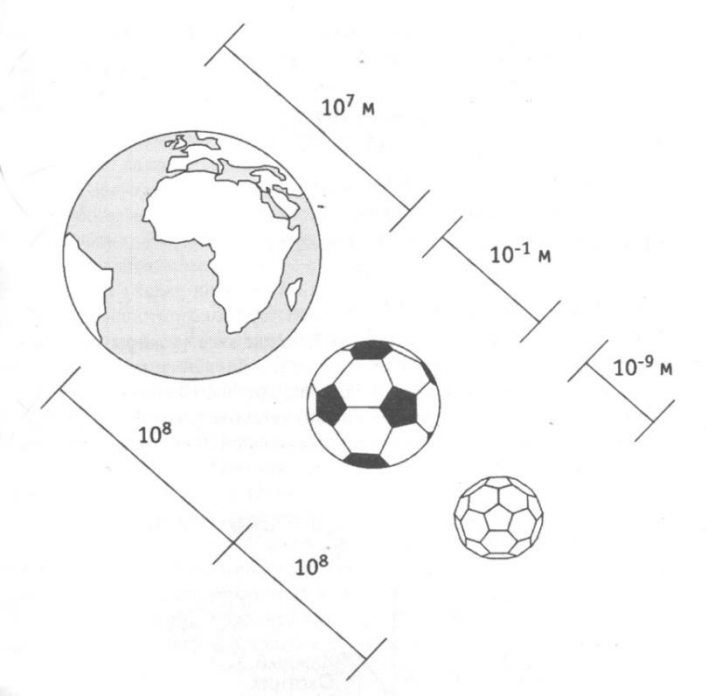
Начальное слово направления нанофотоника и нанотехнология

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÷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 нанокомпозитного материала галенита (сульфид цинка)

Размер – до 5 нм

- Древняя Греция

Чаша Ликурга (Британский музей)

Поглощение и рассеяние наночастиц золота и серебра

- Средневековая Европа

Витражи

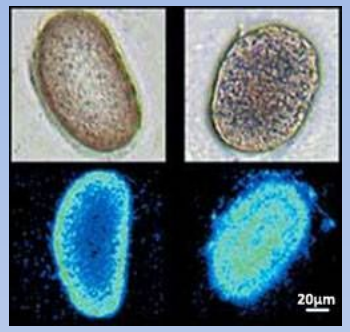
Стекло с добавками наночастиц золота и др. металлов

Наноплазмоника металлических структур

- Древний Восток (Древняя Индия)

Углеродные нанотрубки в составе дамасской стали.

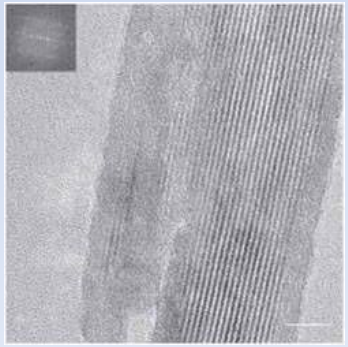
Гибкость и твердость



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 поразил 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)

Rise University, Houston, USA

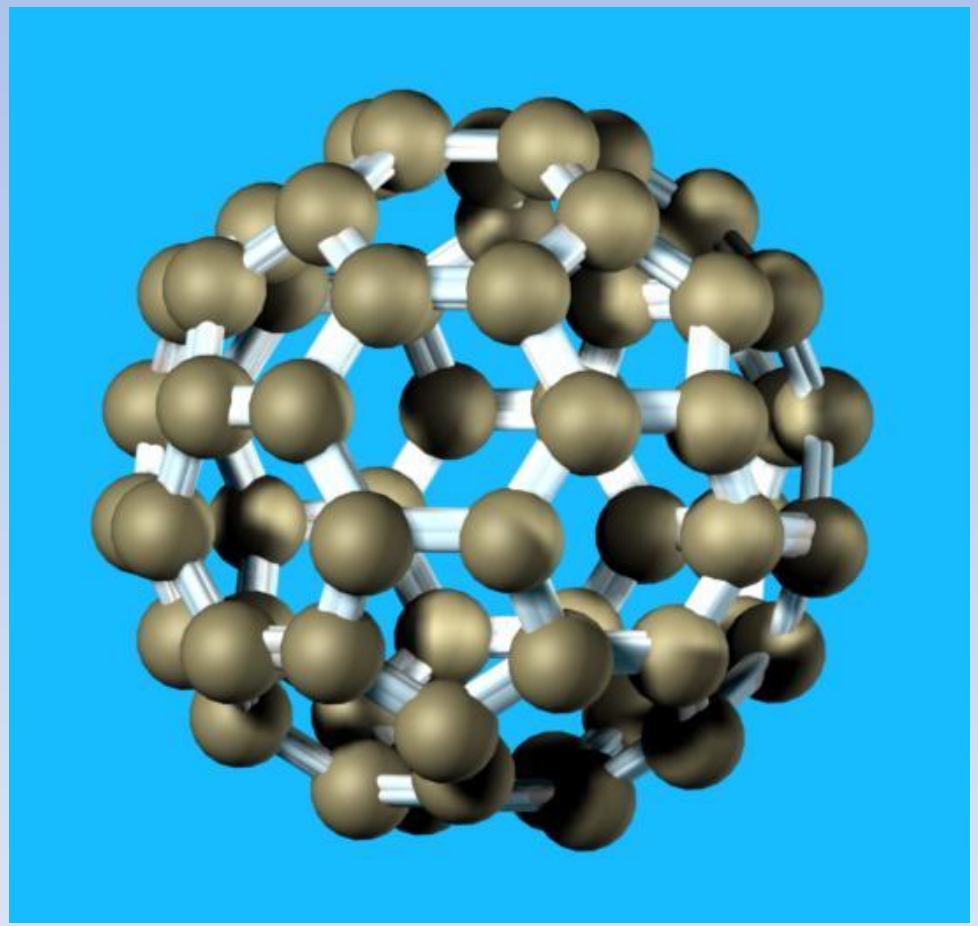
- Г. Крото (Harold Kroto)

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

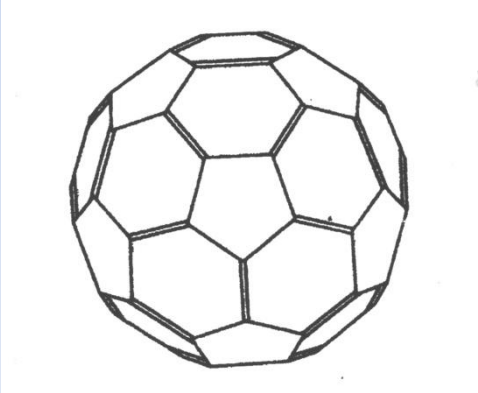
- Квантово-химические расчеты гипотетической замкнутой полой молекулы C_{60} - Бочвар, Гальперн, Станкевич, ИНЭОС, Россия

- Многогранники Эйлера

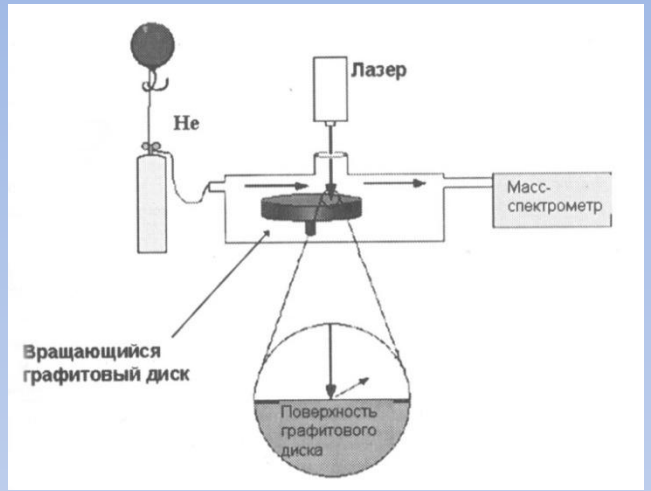
Рональд Эйлер (1706-1783гг.)

Член Петербургской Академии Наук

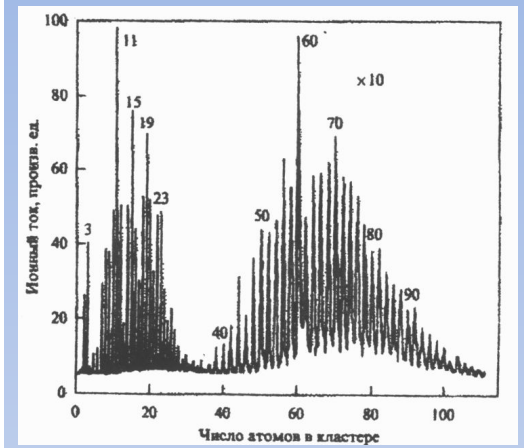
Теорема Эйлера В-Р+Г=2



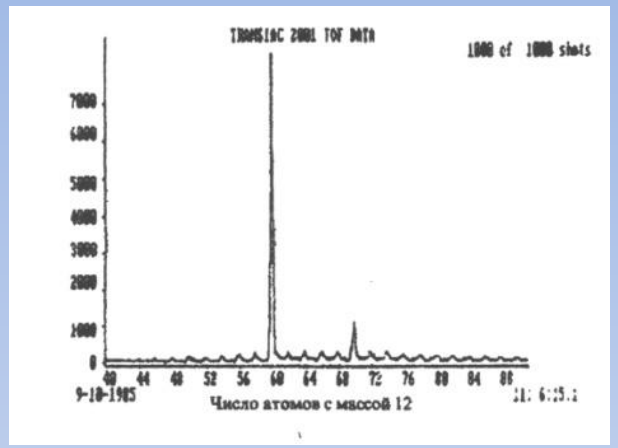
Открытие фуллеренов



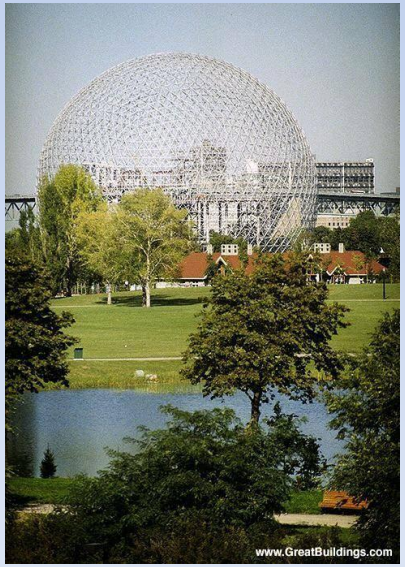
Установка для изучения образования кластеров



Масс-спектр углеродных наночастиц



Масс-спектр углеродных кластеров с пиком C_{60}



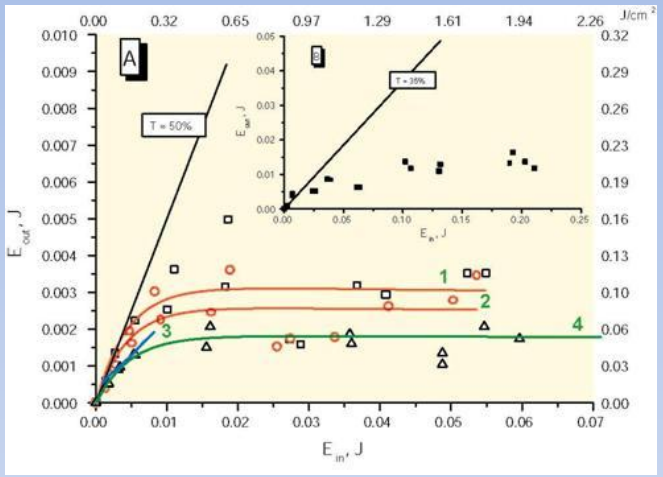
Павильон США на всемирной выставке ЭКСПО-67 в Монреале

Райс Университет, США, лаборатория Ричарда Смолли

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

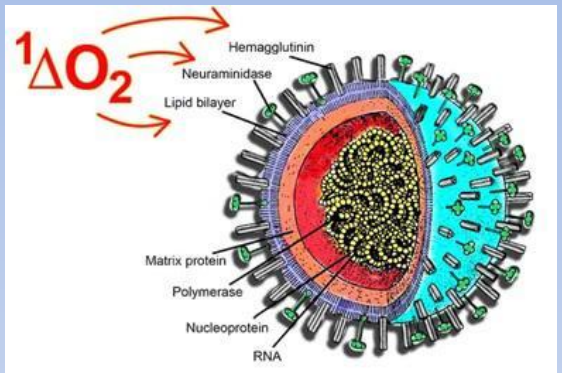
Применение фуллеренов

Нелинейная оптика
Управление лазерным излучением

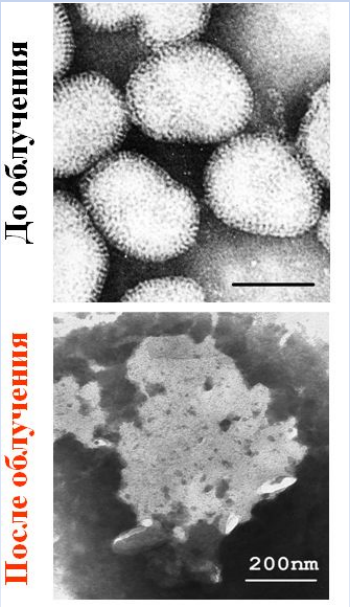


Широкополосный быстродействующий нелинейно-оптический ограничитель лазерного излучения

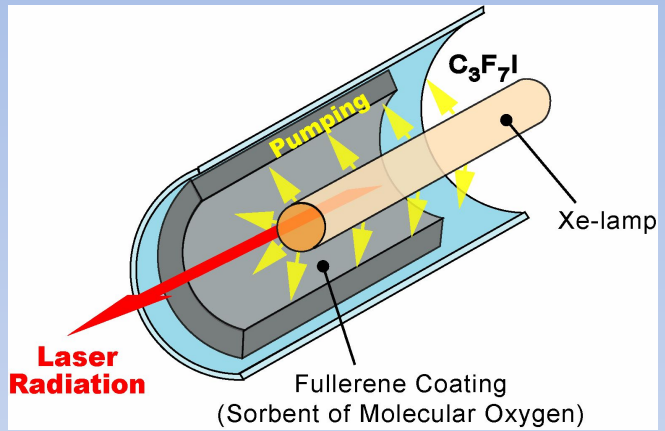
Медицина и фармакология

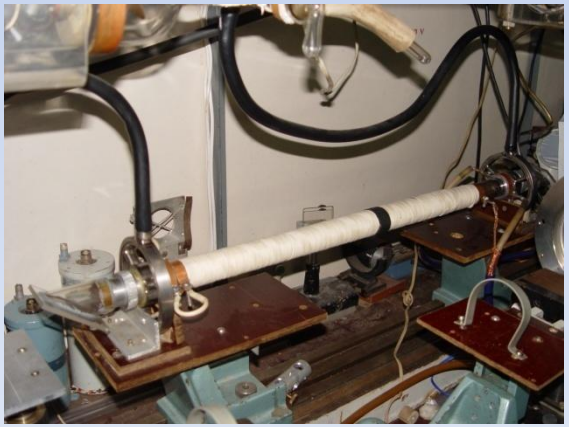


Инактивация вирусов в биологических жидкостях



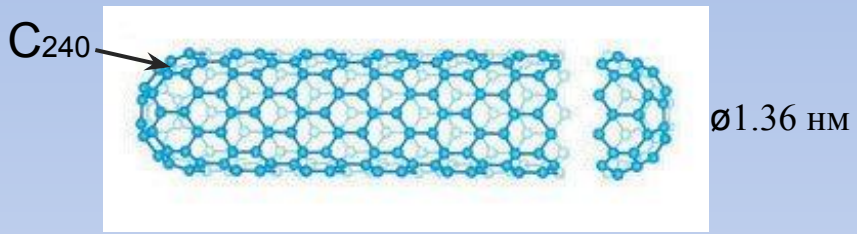
Фуллерен-кислород-йодный лазер





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. Радушкевич 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 накачкой с мощный импульс генерации.
- Химический кислород-йодный лазер (**COIL**) имеет высокую мощность излучения для l=1.315мкм.

НЕДОСТАТКИ:

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

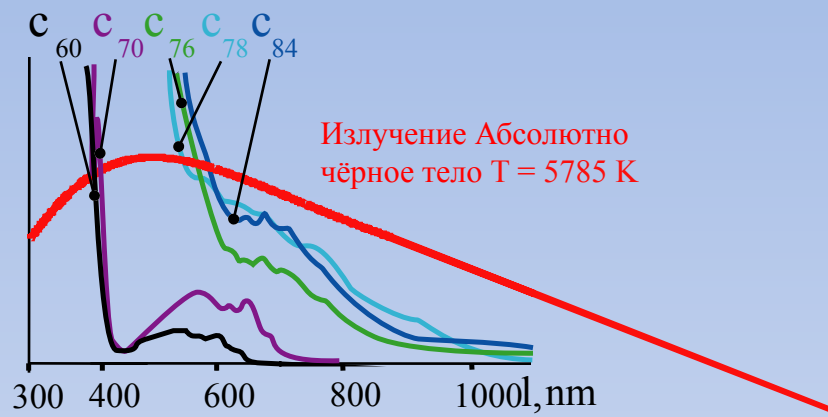
ПРЕИМУЩЕСТВА FOIL:

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

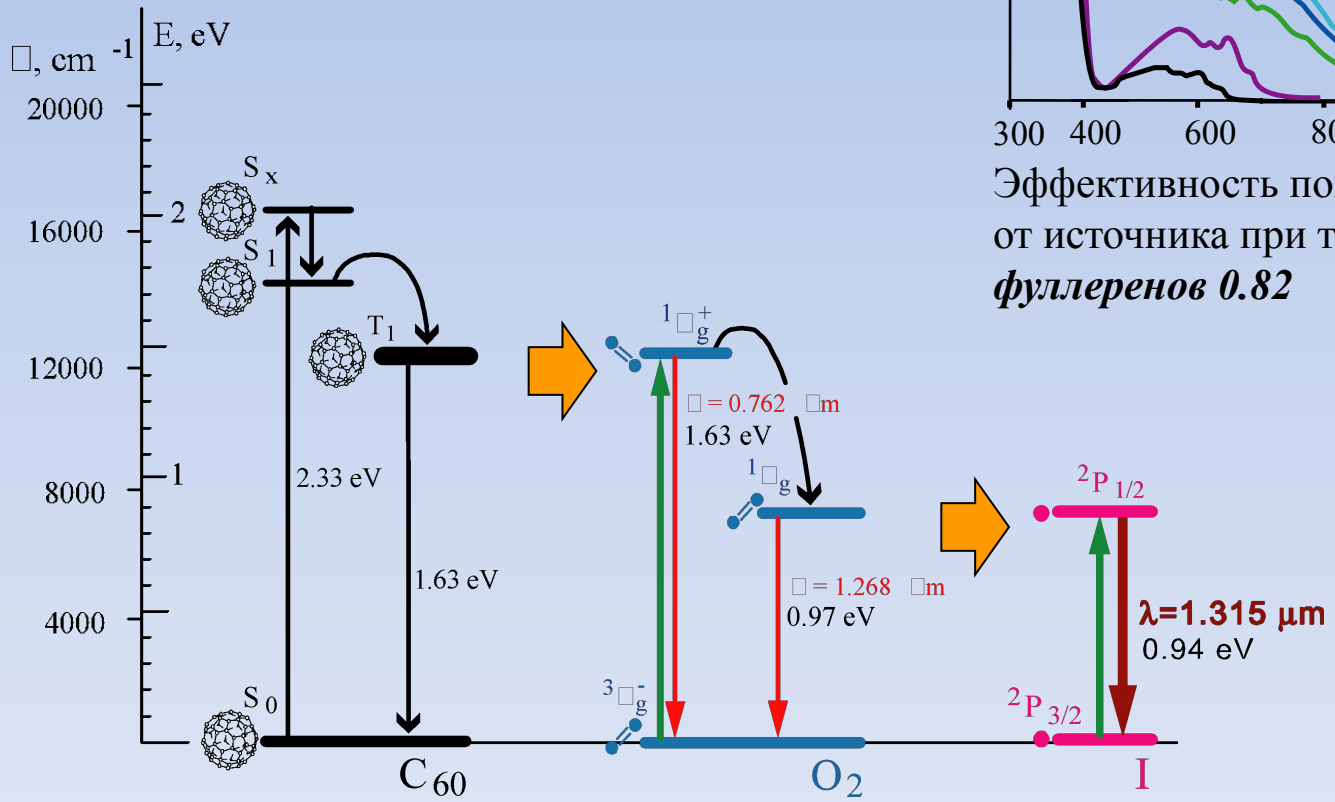
Кинетическая схема фуллерен-кислород-йодного лазера (FOIL)

Физическая эффективность=***40%***

Энергия поглощения~ ***30%***

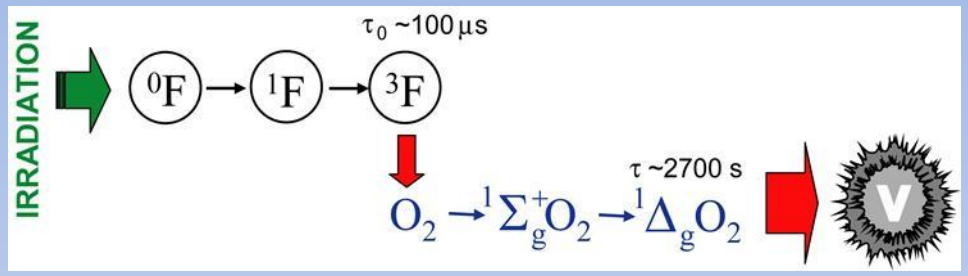


Эффективность поглощения излучения от источника при температуре ***5785K*** для ***фуллеренов 0.82***



$\Delta\Phi\ (^1\Delta_g O_2) = 0.96 \pm 0.04\ (\lambda = 532\ nm)$

Основа высокой эффективности фуллерен-содержащих сред для генерации синглетного кислорода



Квантовый выход синглетного кислорода для фуллеренов

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

Главные реакции:

поглощение света

$^oF + h\nu \rightarrow {}^1F \rightarrow {}^3F \qquad \sigma_{eff} \sim 5 \cdot 10\text{-}18 \div 10^{-17}\ cm^2$

получение синглетного кислорода

$^3F + O_2 \rightarrow {}^1\Delta O_2 + {}^0F \qquad K_2 \sim 3.3 \cdot 10^{-12}\ cm^3 sec^{-1}$

обратная реакция тушение синглетного кислорода

$^1\Delta O_2 + {}^oF \rightarrow O_2 + {}^3F \qquad K_3 \sim 8.0 \cdot 10^{-16}\ cm^3 sec^{-1}$

Для фуллеренов: $K_3 << K_2$

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

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

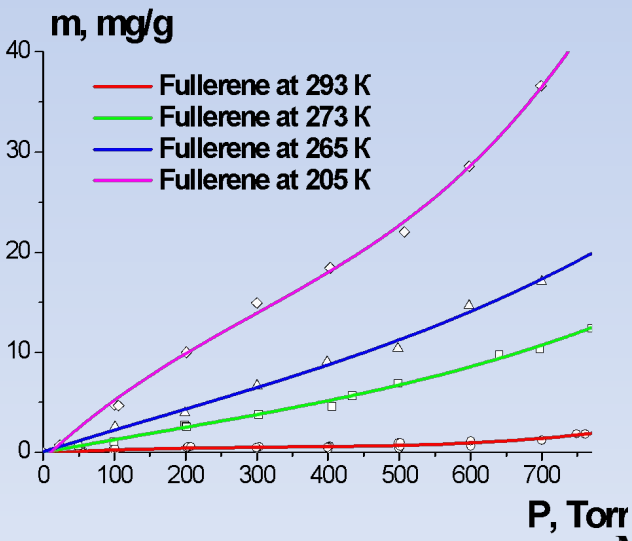
Твёрдо-фазовый генератор синглетного кислорода. Физический принцип

Общий процесс взаимодействия между молекулами кислорода и твёрдотельным покрытием фуллеренов

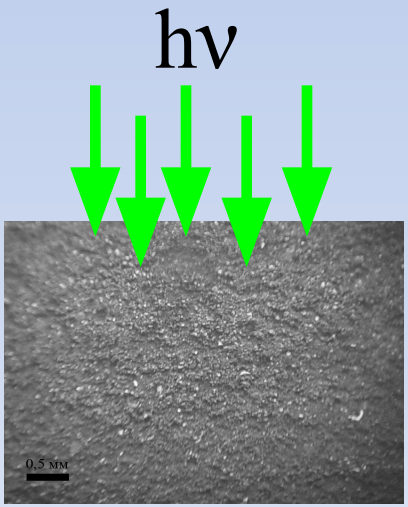
Сорбция молекул кислорода фуллеренами и углеродными наноструктурами

Получение синглетного кислорода при взаимодействии фотовозбуждённых фуллеренов и углеводными наноструктурами с молекулярным кислородом

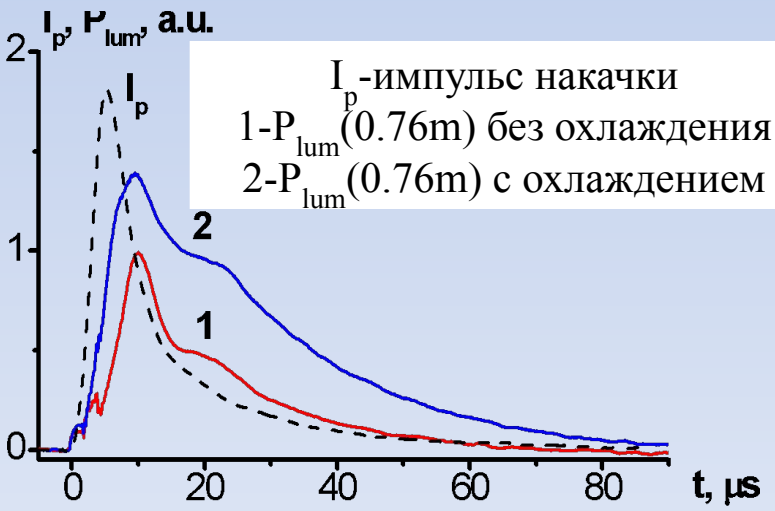
Выход синглетного кислорода в газовую фазу и взаимодействие с атомами йода



Сорбция молекул кислорода фуллереном C_{60}



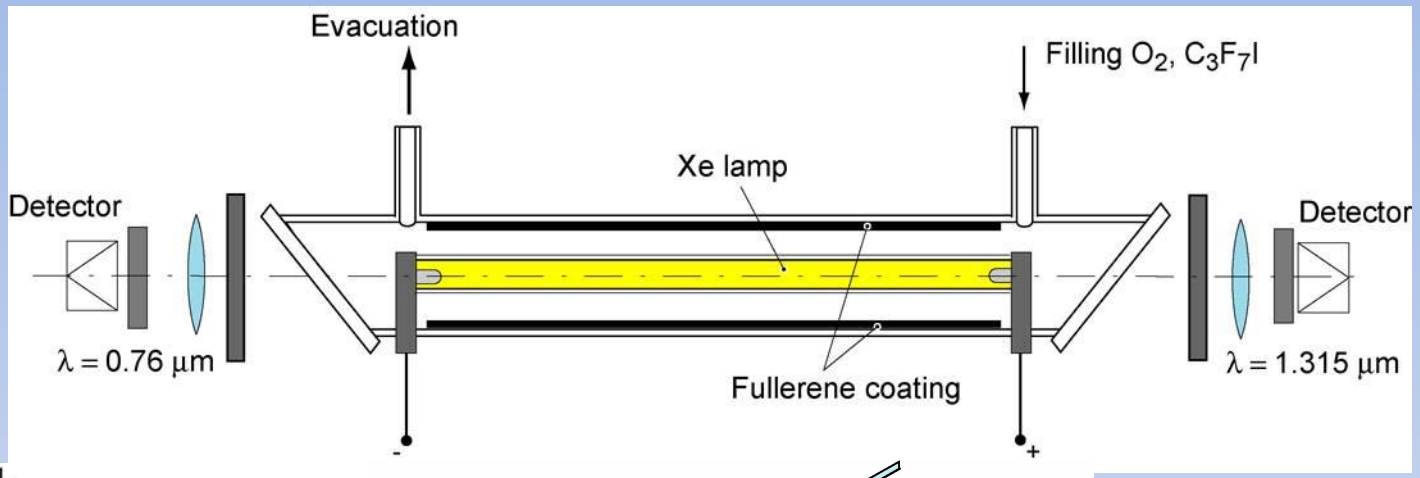
Микрофотография фуллеренового покрытия на стеклянной пластинке

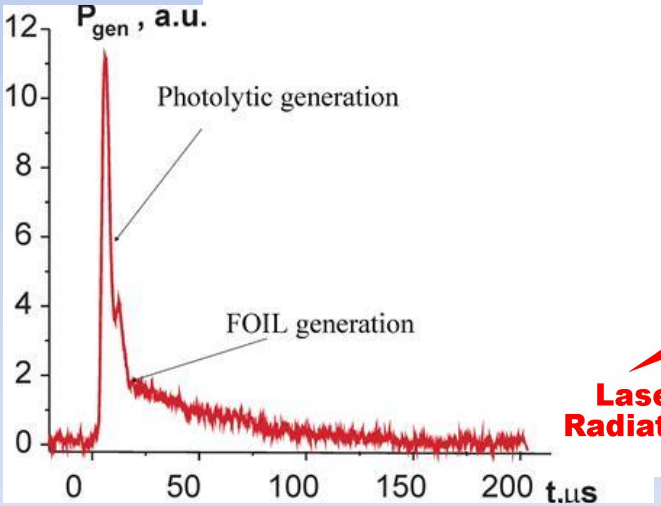


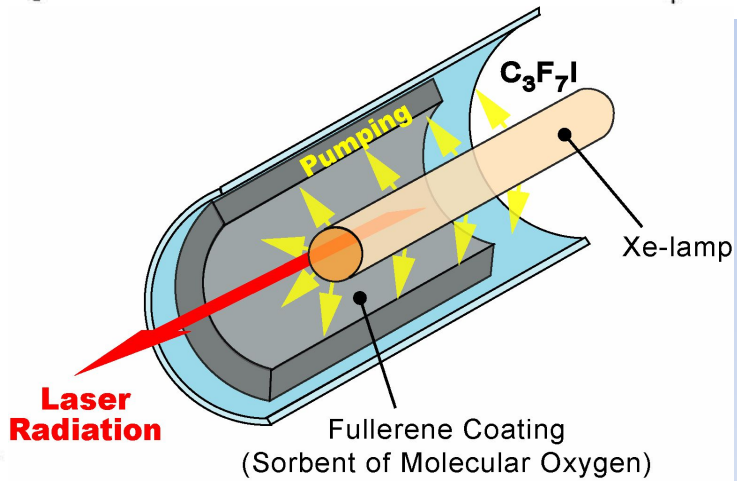
I_p-импульс накачки
1-P_{lum}(0.76m) без охлаждения
2-P_{lum}(0.76m) с охлаждением

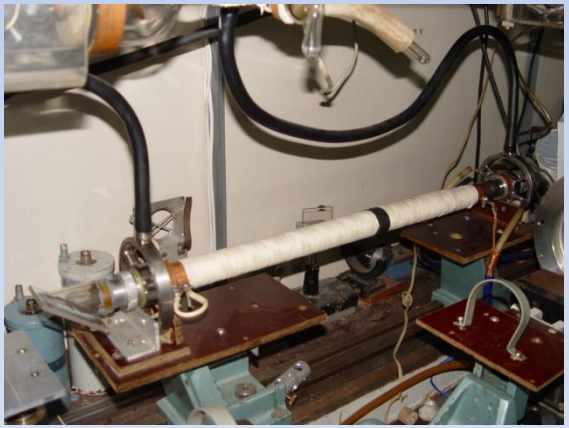
Фотодесорбция синглетного кислорода

FOIL с осевой Xe-ламповой накачкой



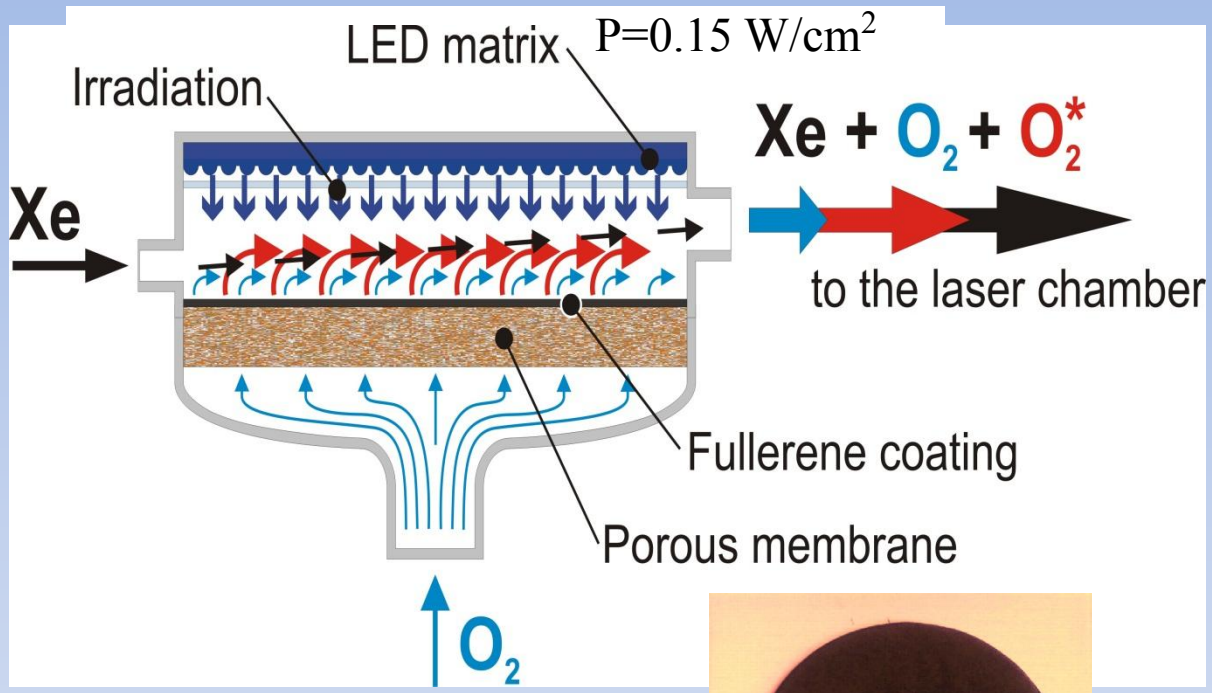


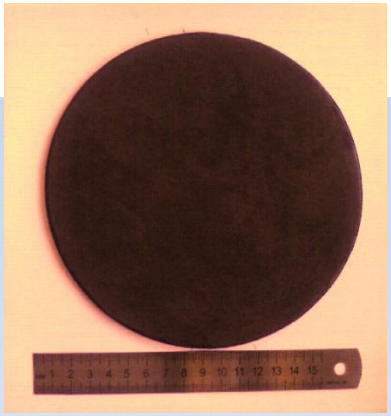


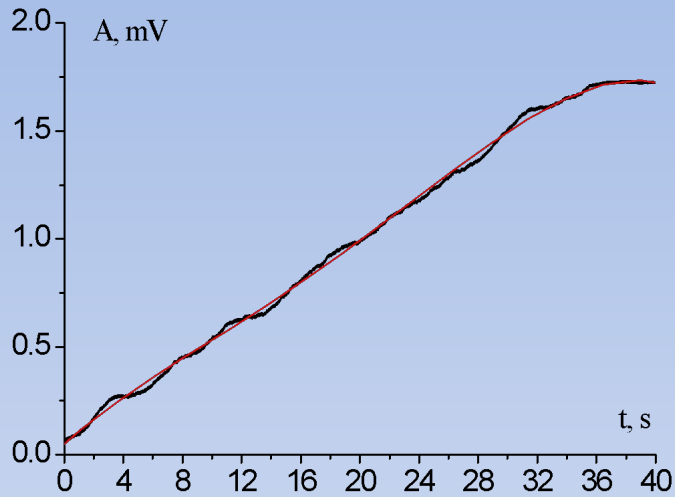


Энергия генерации – 4.2 Дж. Удельная энергия~ 9 Дж/л
Физическая эффективность ~ 10%

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 l = 1.315 mkm 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 энергетик составляет в настоящее время 25%.

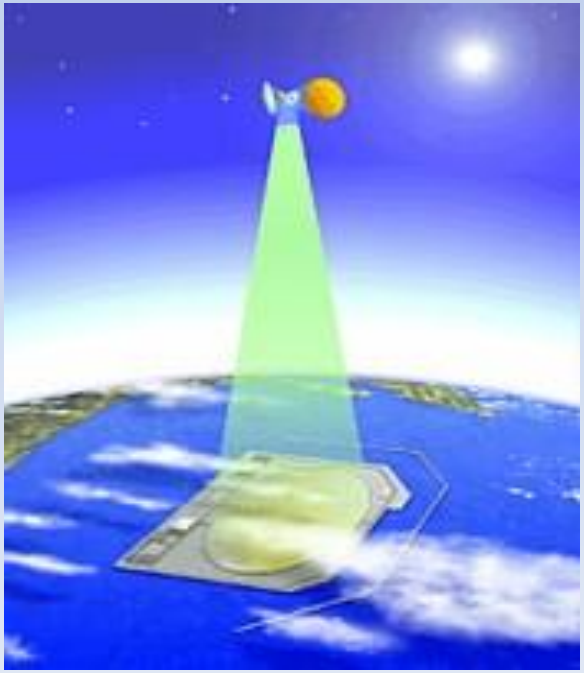
Установленная мощность фотоэлектрических систем составляет 16 ГВт.

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

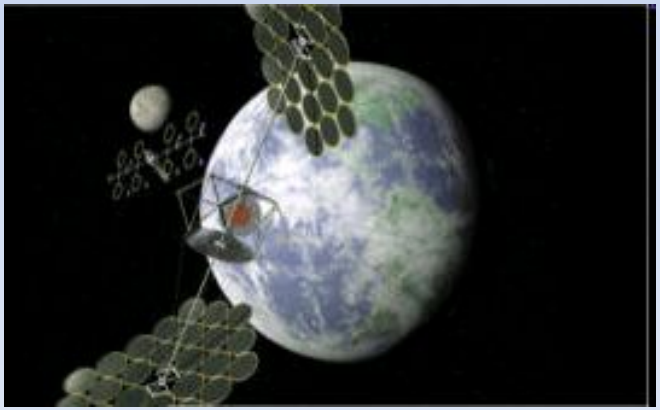
ЦЕЛЬ ДАННОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ:

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

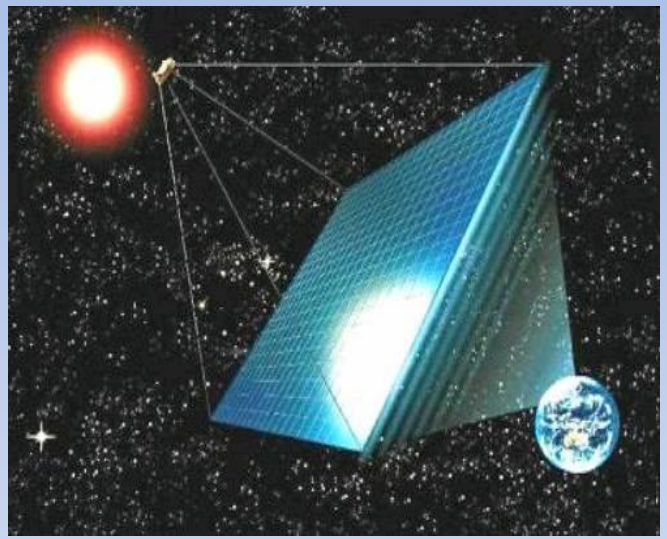


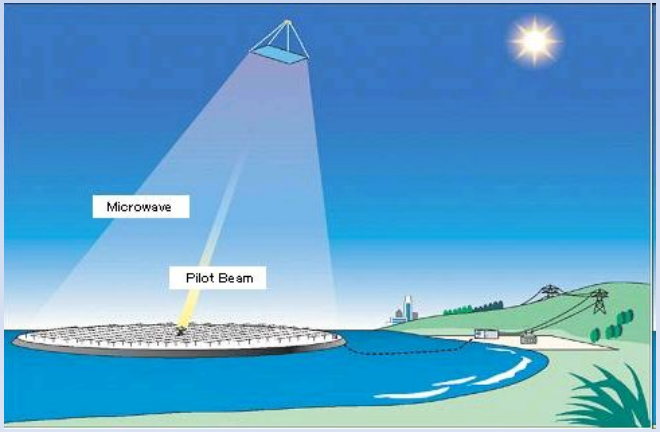
СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ

- 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



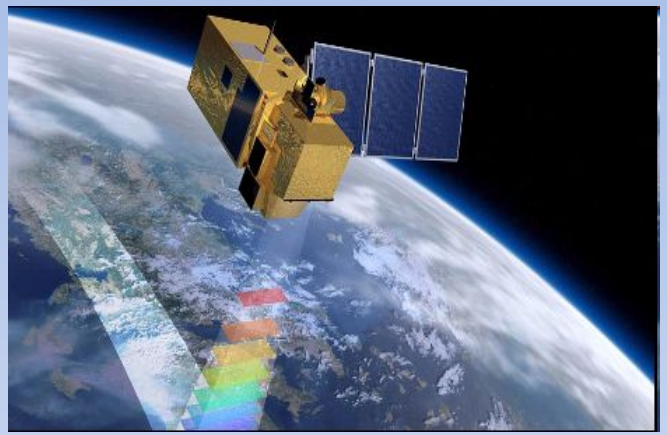


ЯПОНИЯ

- **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

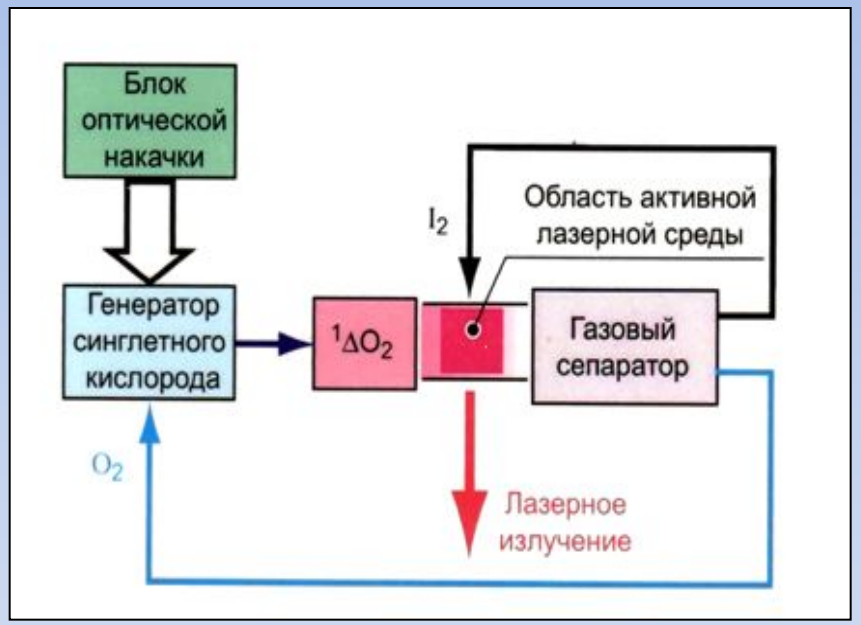
- **EADS – Astrium – ведущая европейская компания по производству спутников и спутникового оборудования объявила в январе 2010 о планах запуска демонстрационного спутника с солнечной энергетической установкой на борту**
- **Для передачи энергии на Землю предполагается использование излучения инфракрасного 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

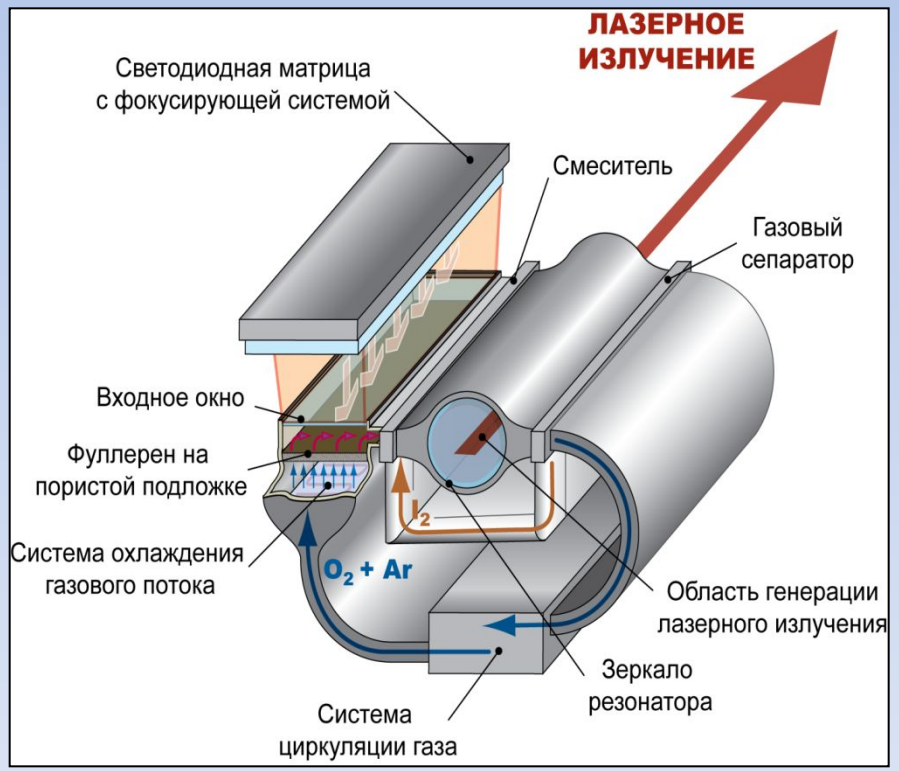
Разработка защищена патентом.
Патент РФ Института Лазерной физики ГОИ им.С.И.Вавилова № 2181224 от 20.06.2000 г.
Способ получения генерации стимулированного излучения на атомах йода
Авторы: А.А. Мак, О.Б. Данилов, И.М. Белоусова.

КОМПОНЕНТЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ:

ФУЛЛЕРЕН-КИСЛОРОД-ЙОДНЫЙ ЛАЗЕР С ПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ

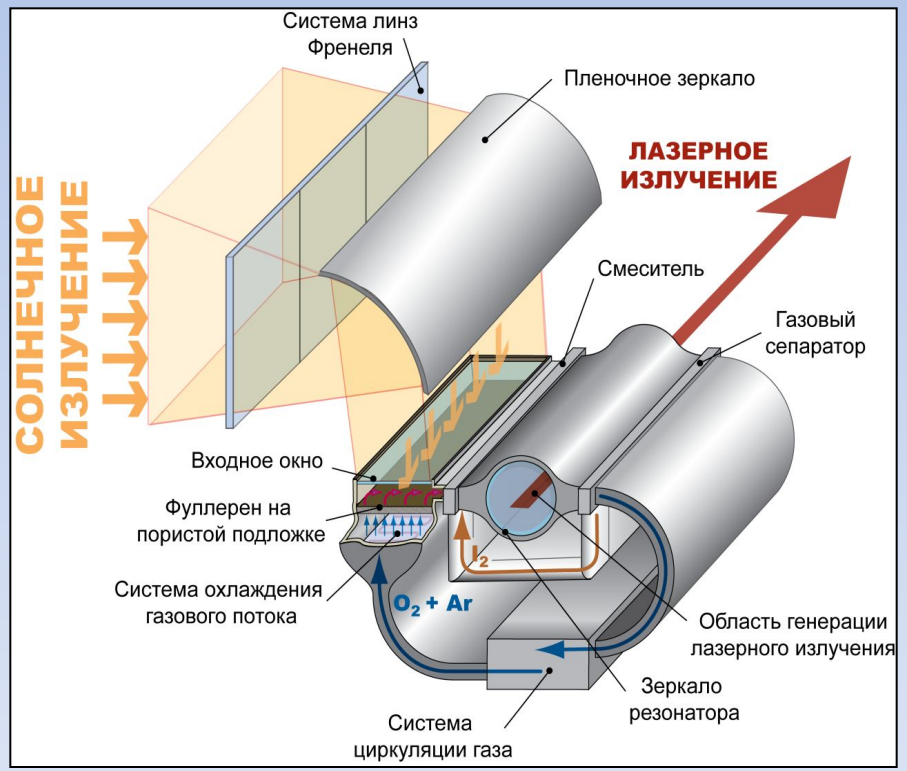
Институт лазерной физики
ГОИ им.С.И.Вавилова

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

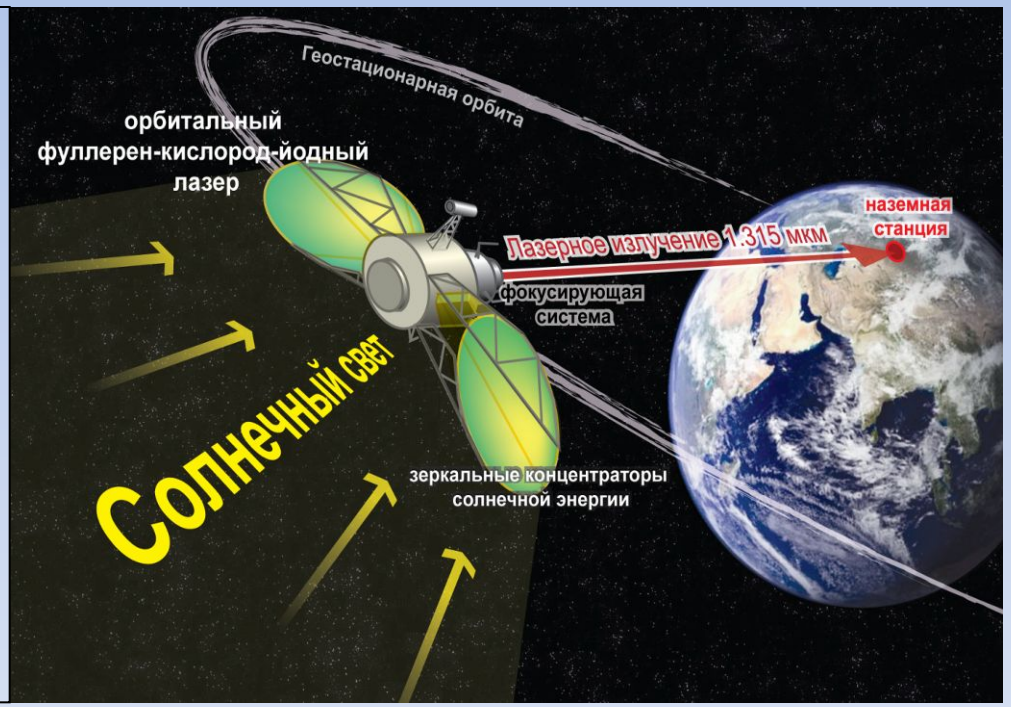
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФУЛЛЕРЕН-КИСЛОРОД-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА.

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 ≥ 70%