



**Лазерные технологии.
От квантового мира до энергии
Солнца. Фундамент
технологического суверенитета**

Теоретический фундамент: От идей до реальности



1916

А. Эйнштейн теоретически предсказывает существование **вынужденного излучения** — фундаментальный принцип, на котором будет построен лазер.

1

2

1940

Советский физик **В.А. Фабрикант** обосновывает возможность использования этого эффекта для **усиления света** — первый шаг от теории к практике.

1955

Н.Г. Басов и А.М. Прохоров разрабатывают концепцию трёхуровневых систем, превращая абстрактную физику в **инженерную задачу** с чётким решением.

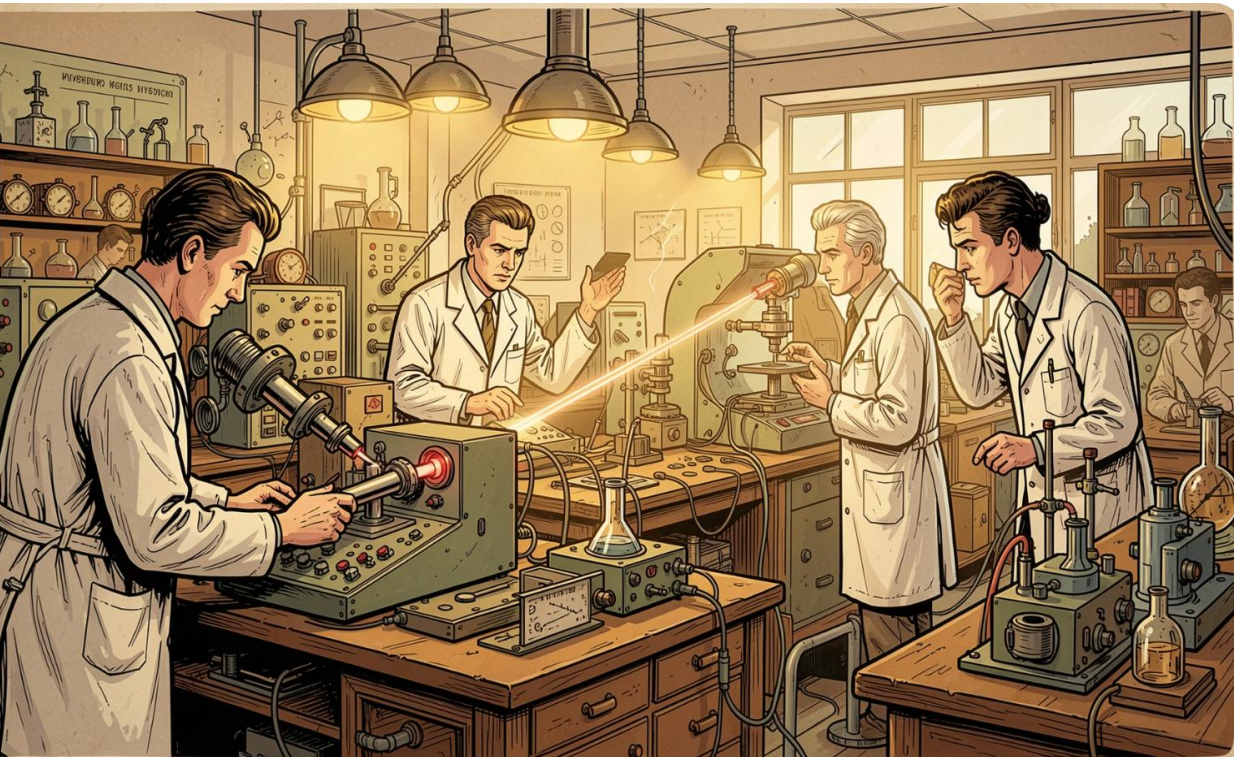
3

4

1968

Нобелевская работа **Ж.И. Алферова** позволила создать современные **полупроводниковые лазеры** — основу оптоволоконной связи и лазерных принтеров

Каждый из этих этапов стал необходимым звеном в цепи открытий, приведших к созданию первого лазера.



1954 — Первый мазер

Басов и Прохоров создают первый мазер, заложив основу **квантовой электроники** как самостоятельной научной дисциплины.

1964 — Нобелевская премия

Высшее мировое признание: премия присуждена **Басову, Прохорову и Таунсу** за фундаментальный вклад в создание квантовых генераторов.

1960-е — Глобальное влияние

Советские идеи легли в основу первых **рубиновых и газовых лазеров**, запущенных по всему миру.

Поддержка идёт через несколько крупных научно-технологических инструментов — не одну программу, а целую экосистему.

РНФ

Гранты на фундаментальные исследования

Минобрнауки

Государственные задания

Приоритет-2030 и Научное приборостроение

Мегагранты, молодёжные
лаборатории, научные
центры мирового уровня

МФТИ · ИТМО · Бауманка ·
МИФИ · Томский политех

Государственные корпорации

Термоядерный синтез,
мощные твердотельные
лазеры, лазерно-плазменные
комплексы

Росатом · Курчатовский
институт · РАН · ФИАН ·
ИОФ РАН · РФЯЦ-ВНИИЭФ



«Фотоника-2030» — новая стратегическая программа



Инициация программы связана с поручением премьер-министра РФ Михаила Мишустина, которое он дал по итогам рабочей поездки в Нижегородскую область в мае 2024 года.

Участники разработки:

- РФЯЦ-ВНИИЭФ
- НПО «Орион»
- Ведущие университеты
- Научные центры фотоники и квантовых технологий

Рассматриваемые направления:

- Фотонные вычисления
- Интегральная фотоника
- Лазерные производственные технологии
- Квантовая фотоника
- Оптические вычислители
- Фотонные нейроморфные системы
- Лазерные источники нового поколения





Развитие лазерной техники сегодня тесно связано с государственными дорожными картами по квантовым технологиям.

Государственные дорожные карты:

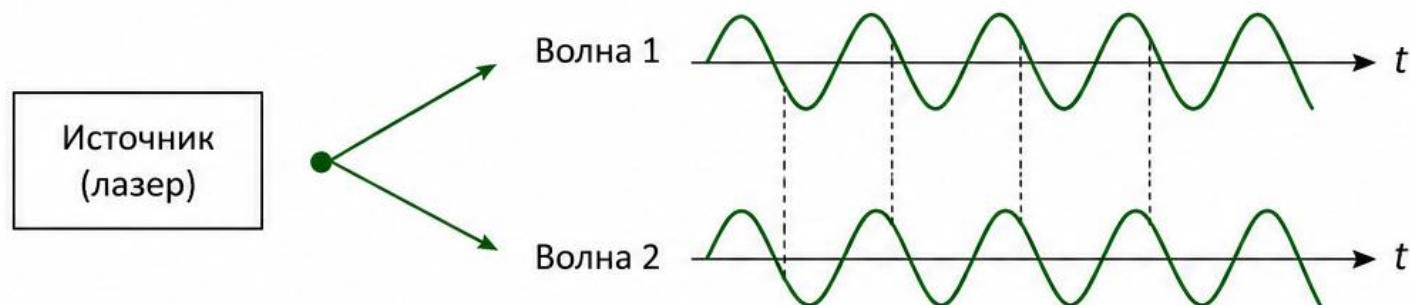
- Квантовые вычисления
- Квантовые коммуникации
- Квантовые технологии

Критически важные компоненты:

- Сверхстабильные лазеры
- Частотные гребёнки
- Микролазеры
- Фотонные интегральные схемы
- Лазерные системы управления кубитами

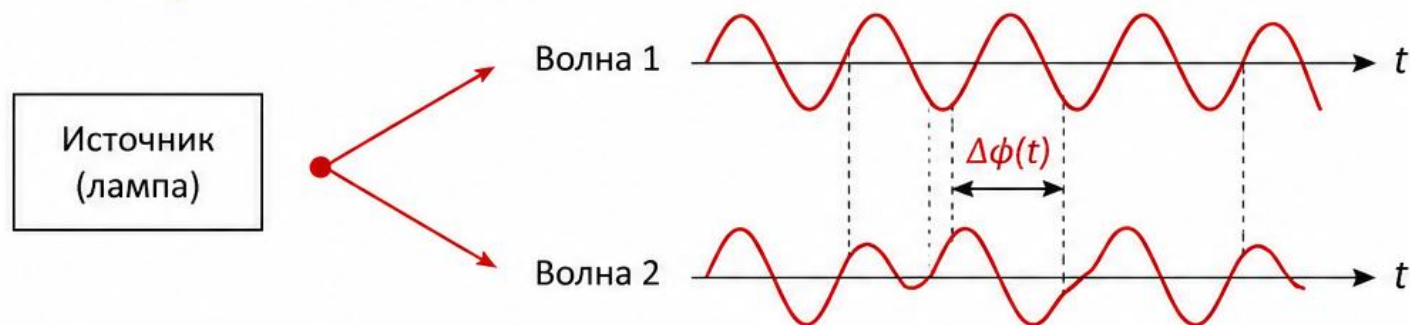
Лазерные технологии являются фундаментом для развития квантовых систем и обеспечивают их функциональность на самом высоком уровне.

Когерентные волны



Разность фаз $\Delta\phi$ между волнами постоянна во времени \rightarrow фазы связаны (когерентны).

Некогерентные волны



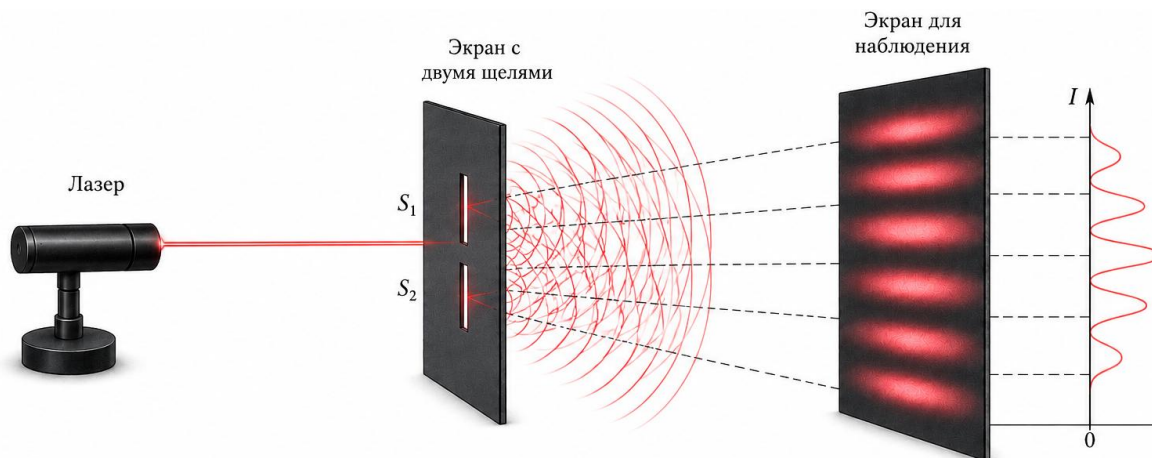
Разность фаз $\Delta\phi$ между волнами случайно меняется во времени \rightarrow фазы не связаны (некогерентны).

Когерентность — это наличие **устойчивой фазовой связи** между различными участками волны. Именно это свойство лежит в основе интерференции и позволяет кодировать информацию в фазе оптического сигнала.

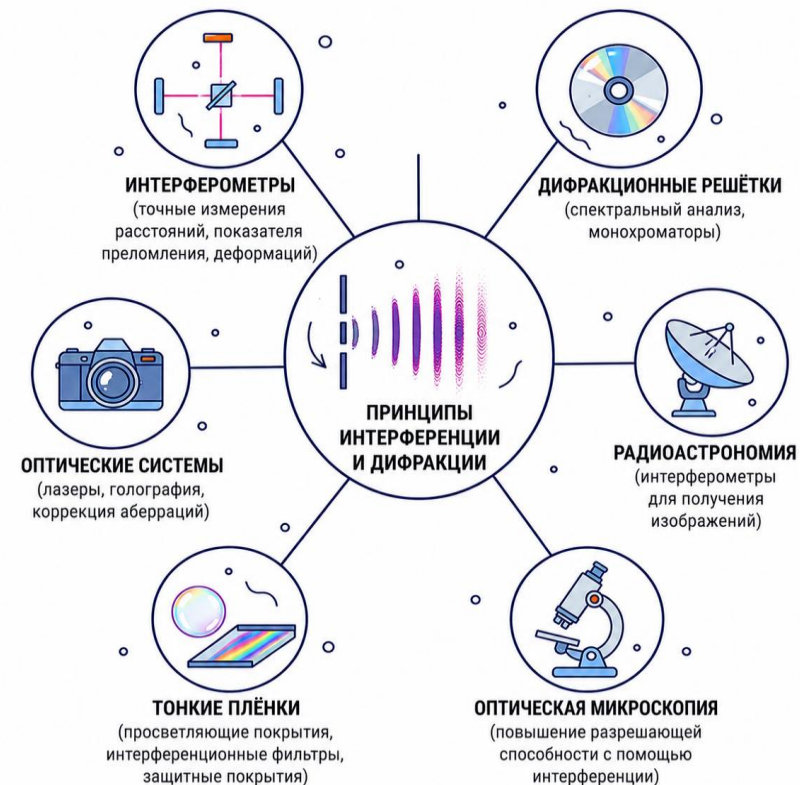
Интерференция и дифракция



Интерференция — наложение когерентных волн, приводящее к усилению или ослаблению амплитуды в зависимости от разности фаз. Этот принцип лежит в основе одного из наиболее чувствительных методов измерения.



Дифракция дополняет интерференцию: дифракционная решётка преобразует частотную информацию в пространственную, позволяя измерять спектр. Даже простой DVD-диск демонстрирует этот фундаментальный принцип.

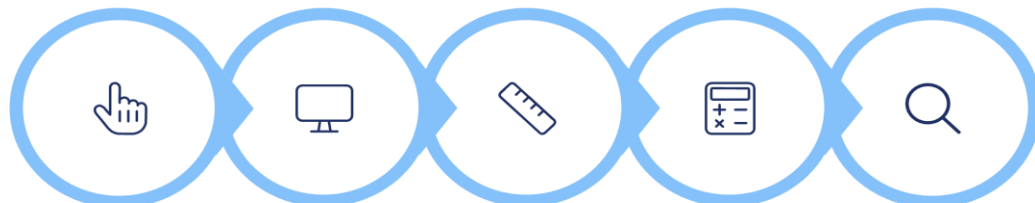


Физики использовали именно этот принцип для регистрации гравитационных волн.

Измерение длины волны лазера с помощью CD-диска



Пять шагов от подготовки установки до расчёта длины волны:



Настройка Наблюдение Измерение Вычисление θ Нахождение λ

Пример расчёта:

$L = 1,0$ м
Расстояние до экрана

$x = 0,42$ м
До первого максимума

$\theta \approx 0,42$ рад
Упрощённо

$\lambda = L/(d x) = 1,0/(1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,42) \approx 620$ нм

Красный лазер

CD — отражательная дифракционная решётка с периодом $d \approx 1,6$ мкм.

При $L \gg x$ используется упрощённая формула:

$\lambda = L/(dx)$ для первого порядка ($m=1$).

Угол: $\theta \approx x/L$ (в радианах).

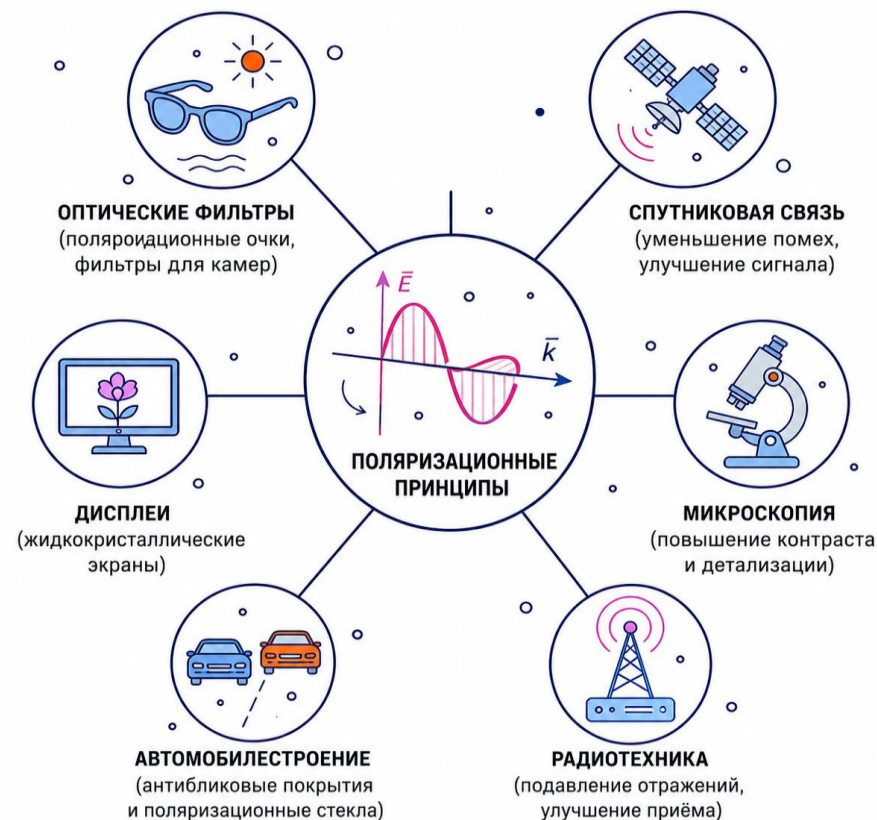
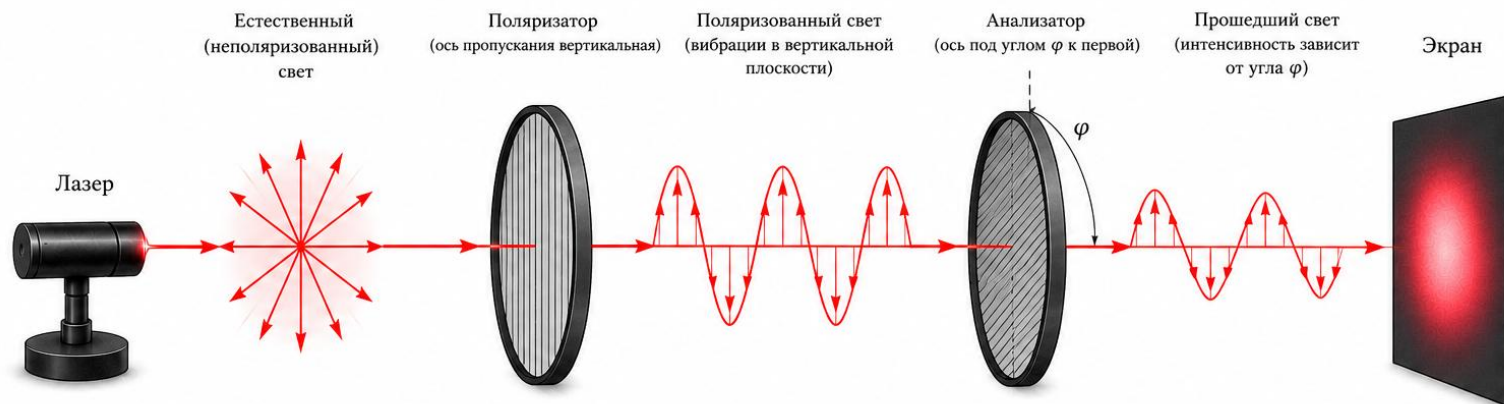


Поляризация



Поляризация света — это свойство поперечной электромагнитной волны, характеризующее ориентацию колебаний вектора электрического поля E в пространстве.

В электромагнитной волне электрическое и магнитное поля колеблются перпендикулярно направлению распространения. Обычно при естественном (неполяризованном) свете направление колебаний вектора E хаотически меняется со временем. Поляризация возникает тогда, когда колебания становятся упорядоченными.



Лазерное излучение часто имеет выраженную линейную поляризацию, то есть колебания электрического поля происходят в определённой плоскости. Если поляризованный свет проходит через линейный поляризатор, на выходе остаётся только составляющая поля, совпадающая с его осью пропускания.

Эта зависимость описывается **законом Малюса**:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Здесь I — интенсивность света после поляризатора, I_0 — начальная интенсивность,
а θ — угол между направлением поляризации и осью пропускания поляризатора.

Опыт 1

Поместите один поляризатор на пути лазерного луча. Наблюдайте, что яркость пятна на экране меняется слабо или остаётся близкой к исходной, если ось поляризатора совпадает с направлением поляризации луча.

Вывод: один поляризатор пропускает только компоненту света вдоль своей оси, поэтому интенсивность зависит от угла и в благоприятной ориентации почти не уменьшается.

Опыт 2

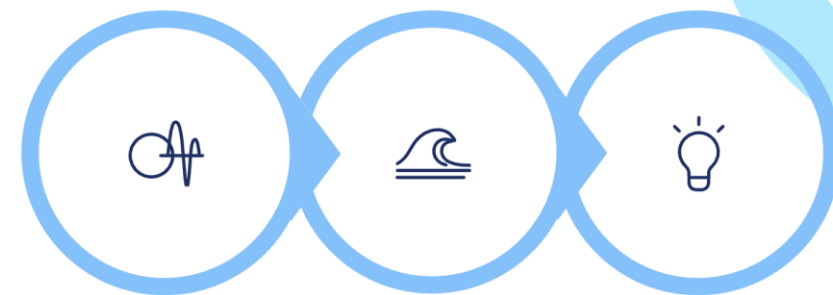
Вставьте третий поляризатор между двумя скрещёнными и поверните его примерно на 45° относительно каждого из них. После этого свет частично восстанавливается и появляется на экране.

Вывод: промежуточный поляризатор изменяет направление поляризации поэтапно, поэтому через систему проходит часть света. Это наглядно подтверждает, что интенсивность зависит от угла между осями поляризаторов.

Опыт 3

Вставьте третий поляризатор между двумя скрещёнными и поверните его примерно на 45° относительно каждого из них. После этого свет частично восстанавливается и появляется на экране.

Вывод: промежуточный поляризатор изменяет направление поляризации поэтапно, поэтому через систему проходит часть света. Это наглядно подтверждает, что интенсивность зависит от угла между осями поляризаторов.



Поляризатор 1 Поляризатор 2 Поляризатор 3

Почему свет появляется?

Средний поляризатор **поворачивает** поляризацию — часть света проходит через третий.

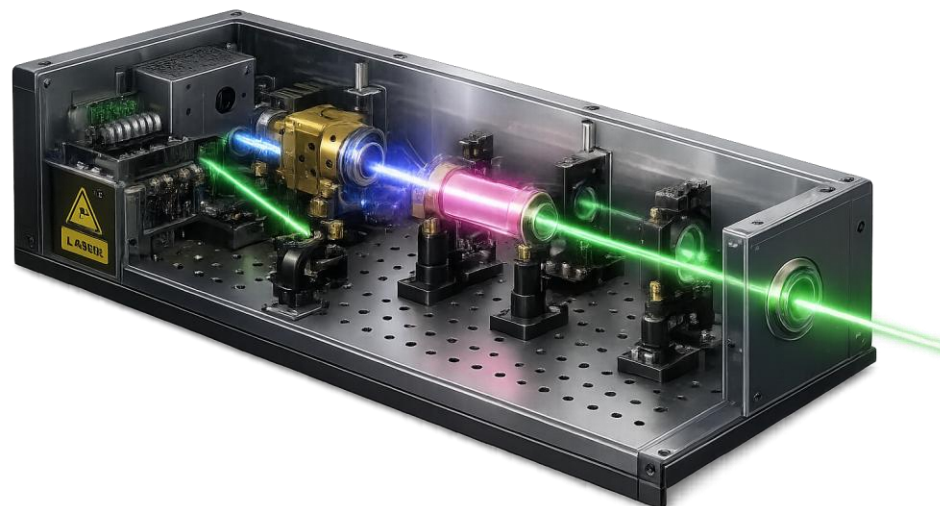
Лазерные платформы



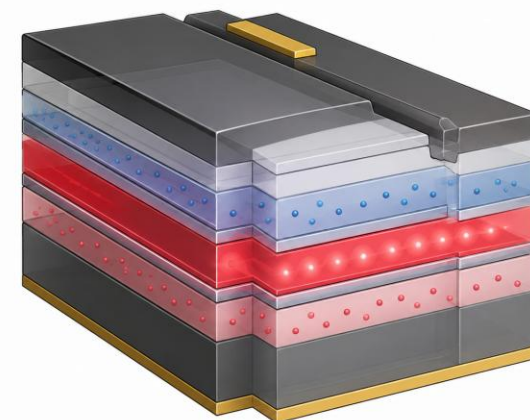
От физических принципов — к инженерным решениям:



Волоконные лазеры



Твердотельные лазеры

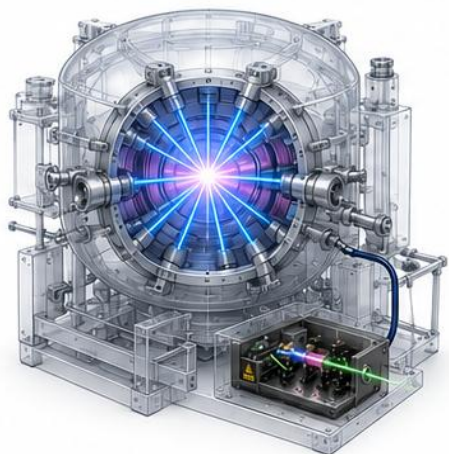


Полупроводниковые лазеры



ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Инициирование и нагрев топлива в установках инерционного удержания



АТТОСЕКУНДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение ультрабыстрых процессов в атомах, молекулах и материалах с аттосекундным разрешением



ЛАЗЕРНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Формирование микроскопических рисунков на кремниевых пластинах при производстве микрочипов



Высокая энергия импульсов для сжатия и нагрева плазмы до термоядерных температур



Сверхкороткие импульсы (аттосекунды) для наблюдения за движением электронов

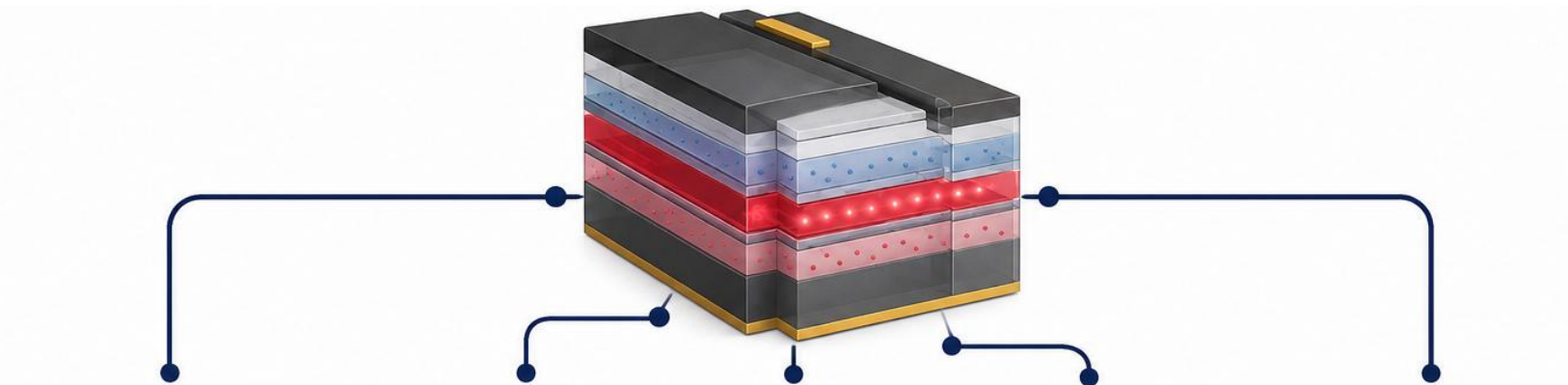


Высокая точность и стабильность луча для создания структур с нанометровым разрешением

Твердотельные лазеры

Высокая пиковая мощность.

Применяются в научных исследованиях и генерации ультракоротких импульсов.



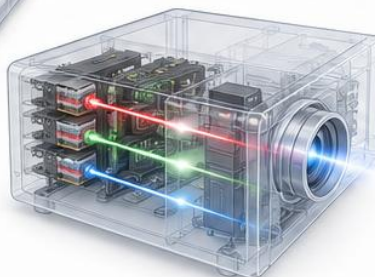
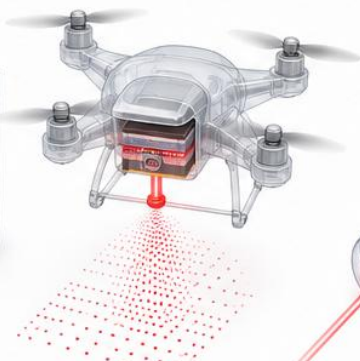
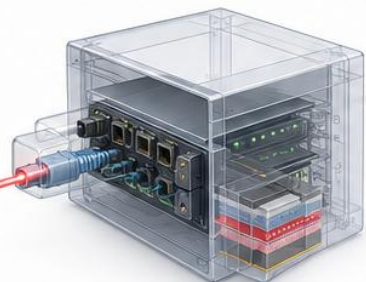
**СВЯЗЬ И
ОПТОВОЛОКОННЫЕ СЕТИ**
Передача данных
на высоких скоростях
по оптоволоконным линиям

**БЕСПИЛОТНЫЕ
УСТРОЙСТВА**
Лидары и системы
обнаружения препятствий
для навигации и картографии

**ИНДИКАТОРЫ И
ЛАЗЕРНЫЕ УКАЗКИ**
Лазерные указки, целеуказатели,
уровни, проекторы и другое
потребительское оборудование

ДИСПЛЕИ И ПРОЕКЦИЯ
RGB лазеры для проекторов,
дисплеев дополненной
реальности и пиксельных систем

**БИОМЕДИЦИНСКИЕ
ПРИБОРЫ**
Лазерные системы для
фототерапии, диагностики
и косметологических процедур



Высокая скорость,
большая дальность,
минимальные потери сигнала



Точное определение
расстояния и построение
3D-карт в реальном времени



Компактность,
низкое энергопотребление,
яркий и стабильный луч



Высокая яркость, широкий
цветовой охват, компактные
источники света



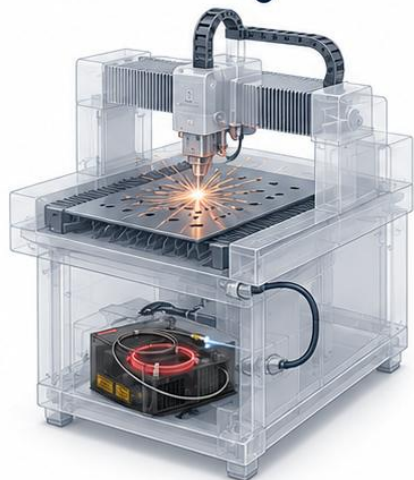
Точность, безопасность
и возможность настройки
длины волны

Полупроводниковые лазеры

Компактность и массовость.
Основа телекоммуникаций,
LiDAR-систем и фотонной
интеграции на чипе.

Волоконные лазеры

Высокая эффективность,
отличный теплоотвод,
компактность. Стандарт для
промышленной резки и сварки.



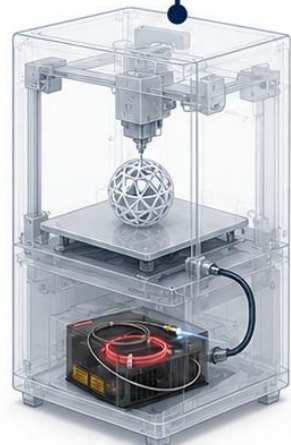
СТАНКИ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛА

Высокоточная резка
и сварка металлов



МЕДИЦИНСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Применение в хирургии,
дерматологии, офтальмологии
и стоматологии



3D ПЕЧАТЬ

Селективное лазерное
спекание и плавление
металлических порошков



НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использование в спектроскопии,
лазерных экспериментах
и наукоемких разработках

Университеты и международные центры



清华大学
Tsinghua University

北京大学
PEKING UNIVERSITY

上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

中国科学院上海光学精密机械研究所
SIOM
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics
Chinese Academy of Sciences

华中科技大学
HUAZHONG UNIVERSITY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

国防科技大学
National University of
Defense Technology

Университеты и национальные лаборатории — генераторы знаний и кадровая база индустрии. Международные центры объединяют ресурсы и ускоряют развитие технологий.

→ **МГТУ им. Н.Э Баумана, ИТМО, НГУ, MIT, Stanford**
Квантовая фотоника, нелинейная оптика, инженерия лазерных систем

→ **МИФИ, МФТИ, ИОФ РАН, Max Planck Institute, NIST**
Фундаментальные лазерные исследования и аттосекундная физика

→ **Международные проекты**
Координация усилий в термоядерном синтезе и квантовых технологиях

Российская наука обладает сильными школами в лазерной физике и оптике, формирующими основу для развития отечественных технологий.

ИОФ РАН и ФИАН

Нелинейная оптика, мощные лазеры, фундаментальные исследования

МГУ и МФТИ

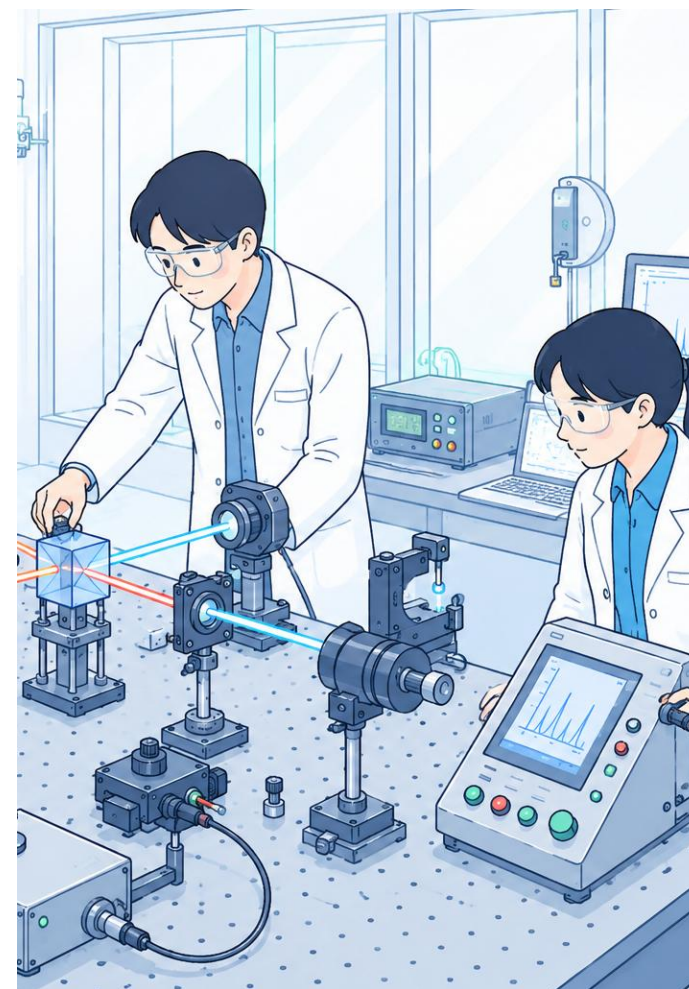
Подготовка специалистов, экспериментальные исследования в оптике

ИТМО и Сколтех

Фотоника, оптические технологии, современные квантовые системы

МГТУ им. Баумана

Инженерные аспекты лазерных систем и промышленные применения



Лазеры высокой мощности



Экстремальные условия, недостижимые иными способами: плазма со звёздными параметрами, инерциальный синтез, передовые промышленные применения.

Термоядерный синтез

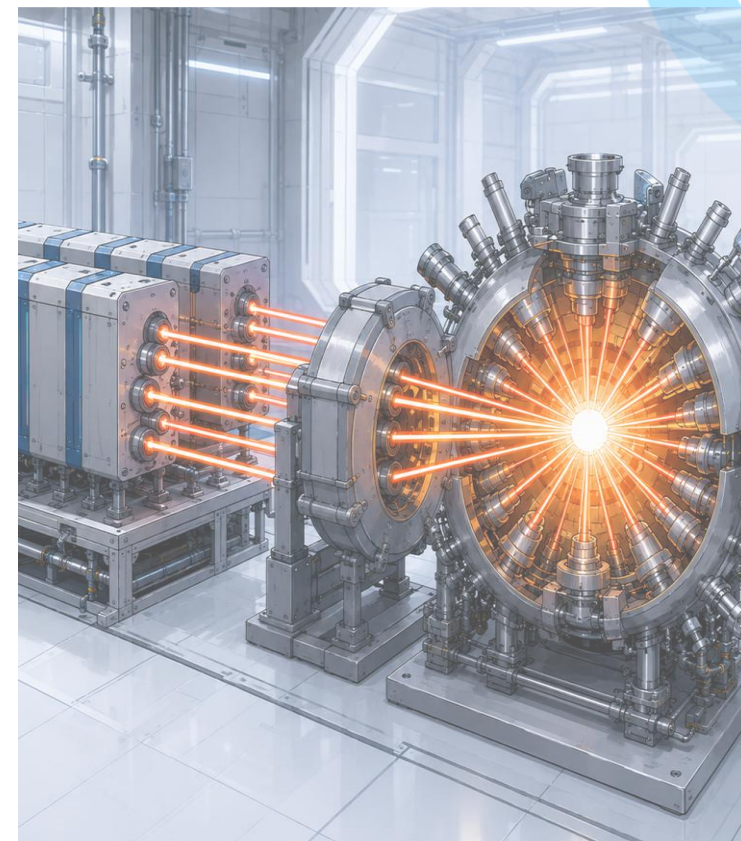
Лазерное облучение мишени вызывает сжатие и образование высокотемпературной плазмы

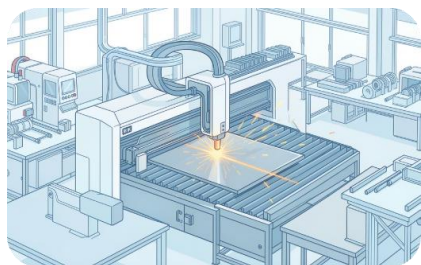
Обработка материалов

Высокая концентрация энергии позволяет резать, сваривать и структурировать вещество

Фундаментальные вызовы

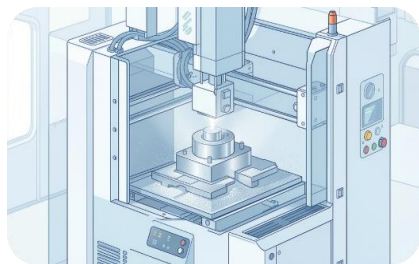
Устойчивость пучка, КПД и управление — ключевые нерешённые задачи





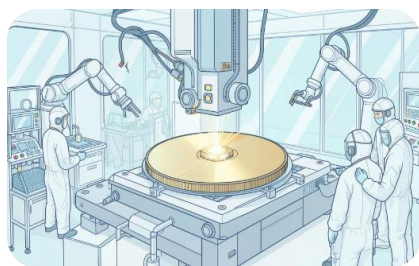
Резка и сварка

Точная обработка металлов в машиностроении и авиации



Аддитивные технологии

Послойное лазерное спекание: новые возможности производства



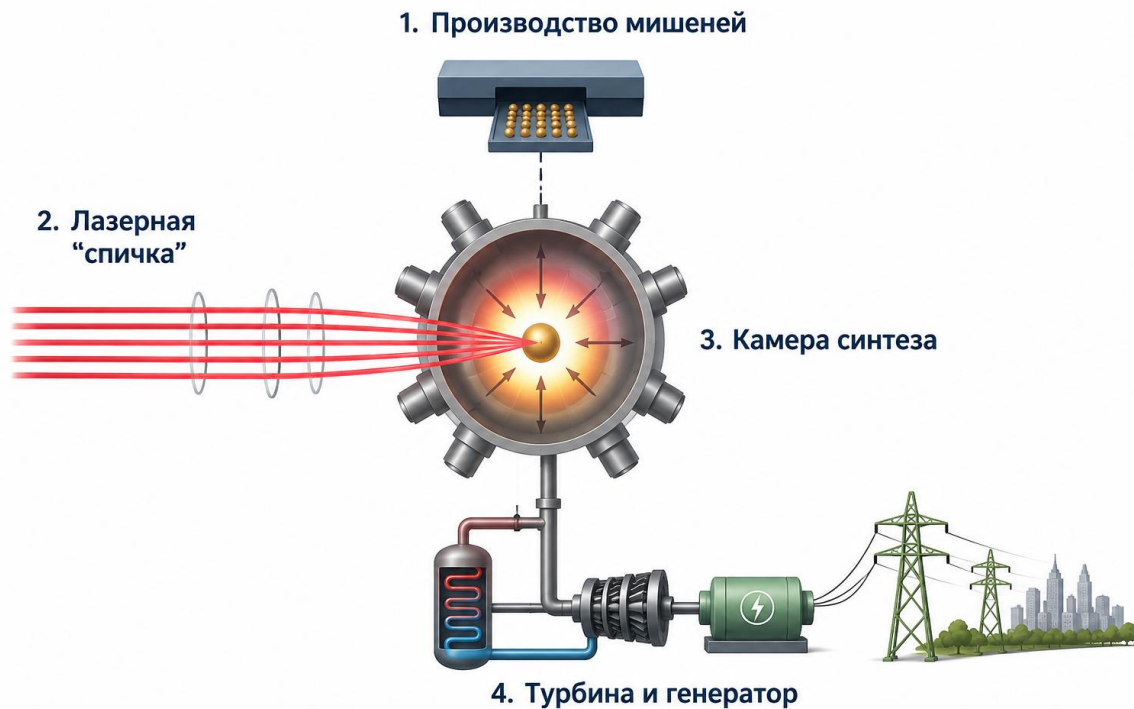
Микроэлектроника

Высокая точность локализации — необходима для нанотехнологий

Ключевое преимущество

Локализация энергии в малом объеме обеспечивает минимальное тепловое воздействие на окружающие области — критически важно в микроэлектронике и точном машиностроении.

Лазеры в энергетике. Инерциальный термоядерный синтез



Принцип работы

Мощные лазерные импульсы симметрично сжимают мишень с топливом, создавая плазму с экстремальными температурой и давлением — условия, аналогичные звёздным.

Ключевые задачи

- Однородность облучения мишени
- Контроль временного профиля импульса
- Стабилизация плазмы

□ Росатом ведёт исследования высокоэнергетических лазерных систем и управляемых режимов энерговыделения

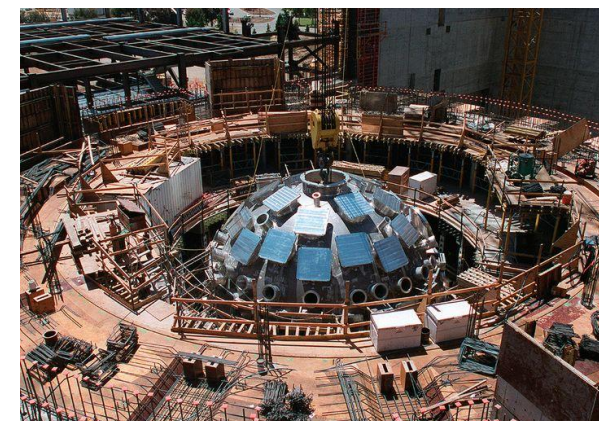
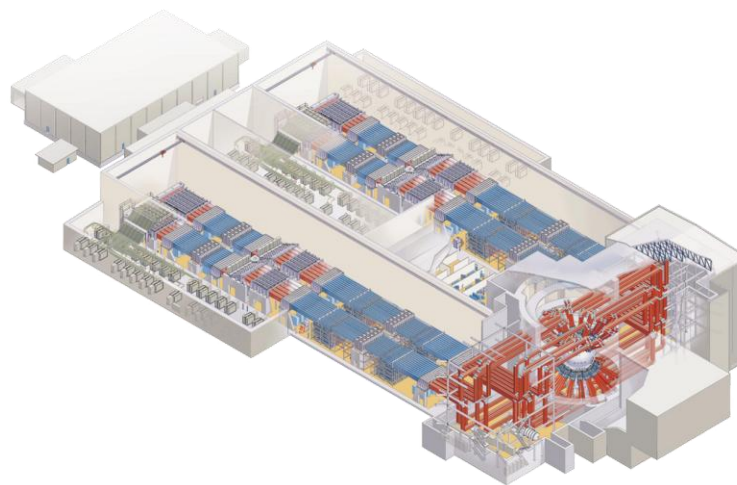
Лазеры в энергетике. Инерциальный термоядерный синтез



УФЛ-2М
Технопарк «Саров»



National Ignition Facility, NIF
Ливермор, штат Калифорния





Офтальмология

Коррекция зрения,
процедуры LASIK



Хирургия

Резка и
коагуляция тканей



Дерматология

Лечение кожных заболеваний
и косметические процедуры



Диагностика

Спектроскопия тканей —
раннее выявление
заболеваний

□ Будущее: персонализированное лечение и неинвазивная диагностика на клеточном уровне

Полупроводниковые лазеры — сердце современных оптических сетей. Интегральная фотоника переносит все компоненты на единый чип, радикально уменьшая размер и энергопотребление.

Когерентная связь

Фазовая информация увеличивает спектральную эффективность каналов

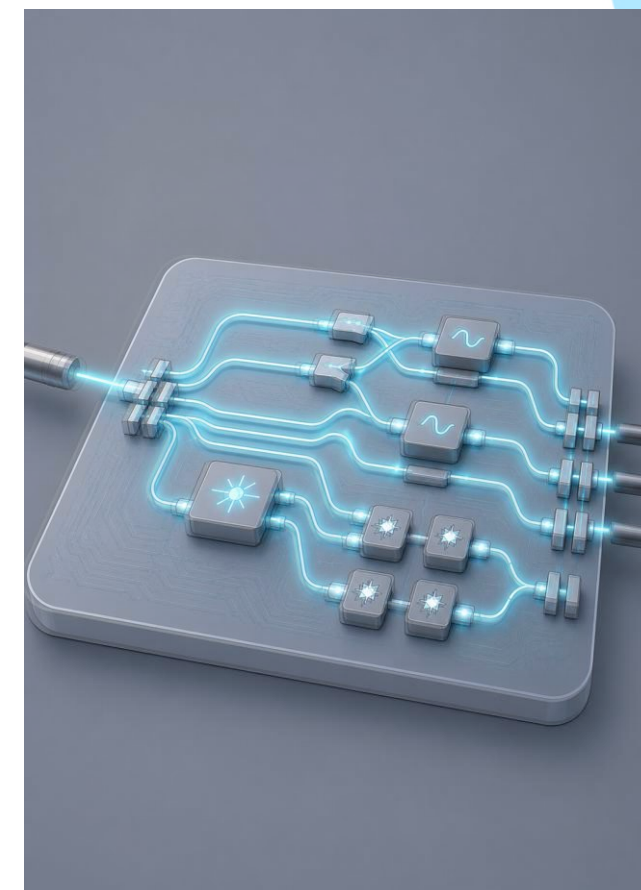
WDM-

мультиплексирование

Одновременная передача множества каналов по одному волокну

Фотонные чипы

МГТУ им Н.Э. Баумана, Сколтех, Cisco, Intel — интеграция лазеров в модули передачи данных



Лазеры обеспечивают скорость, дальность и надёжность передачи данных в глобальных сетях и внутри дата-центров крупнейших компаний.

1

Оптическое волокно

Низкие потери, передача сигнала на тысячи километров

2

WDM + когерентность

Многokратное увеличение пропускной способности канала

3

Дата-центры

Оптические соединения между серверами

4

Оптические процессоры

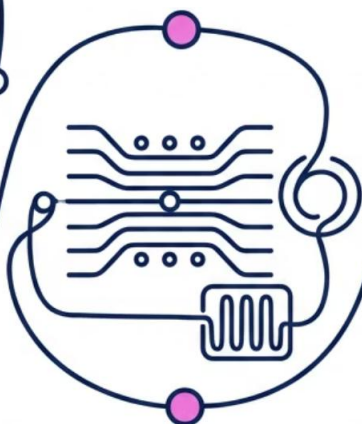
Интеграция лазеров в вычислительные системы будущего

ФОТОННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ



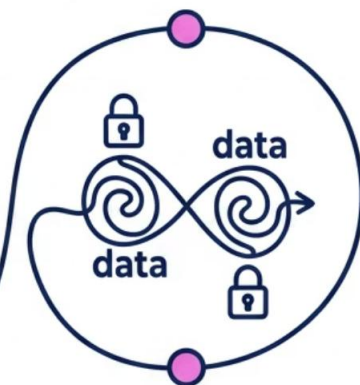
кодирование
в состояниях
света

ИОННЫЕ ЛОВУШКИ И СВЕРХП- ПРОВОДНИ- ДНИКИ



лазерное
охлаждение
лазерное
считывание

КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ



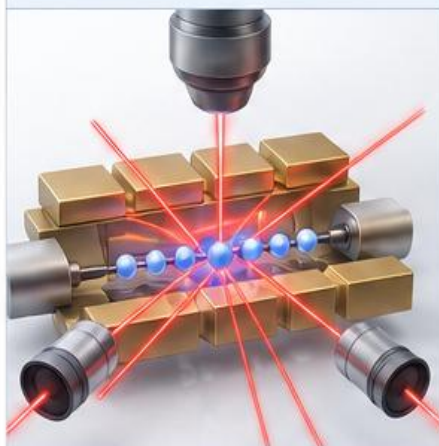
запутанные
фотоны
защищённая
передача
данных

В квантовой фотонике лазер — не просто источник света, а **инструмент управления квантовыми состояниями**. Требования к стабильности частоты и фазы здесь максимальны.

- Подготовка, манипуляция и считывание квантовых состояний фотонов
- Источники одиночных и запутанных фотонов для криптографии
- Лазерное охлаждение атомов и ионов в квантовых процессорах
- Будущие квантовые сети — синхронизация и передача сигналов

Лазеры используются для инициализации, управления, считывания и связи между квантовыми кубитами

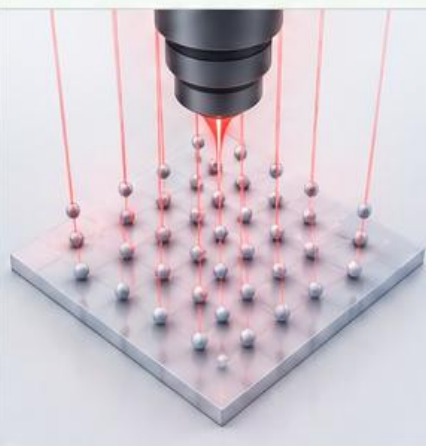
ИОННЫЕ ЛОВУШКИ






Зачем нужны лазеры

-  Охлаждение ионов до основного состояния (лазерное доплеровское охлаждение)
-  Управление квантовыми состояниями и квантовыми логическими операциями
-  Считывание состояния иона (флуоресценция под действием лазера)

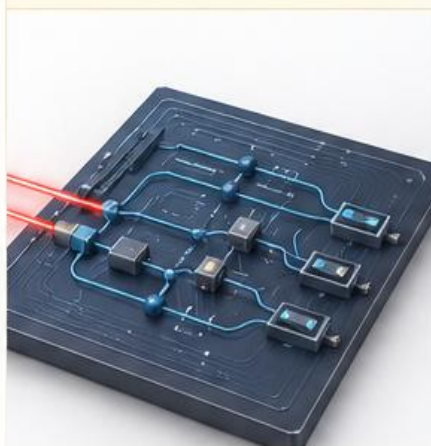
НЕЙТРАЛЬНЫЕ АТОМЫ (ОПТИЧЕСКИЕ ПИНЦЕТЫ)



Зачем нужны лазеры

-  Создание оптических пинцетов для захвата и перемещения атомов
-  Управление состояниями атомов и квантовыми операциями
-  Считывание состояния атомов (флуоресценция)

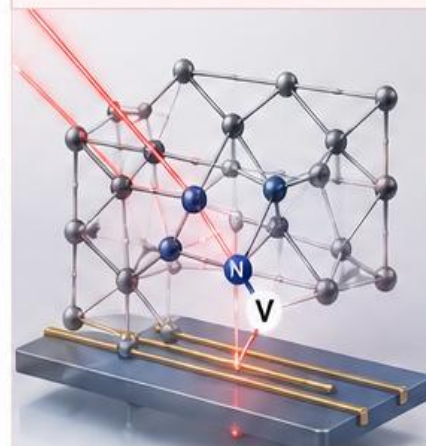
ФОТОННЫЕ КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛИ



Зачем нужны лазеры

-  Генерация одиночных фотонов или сжатого света
-  Управление фотонами в волноводах и интерферометрах
-  Настройка и стабилизация фотонных схем

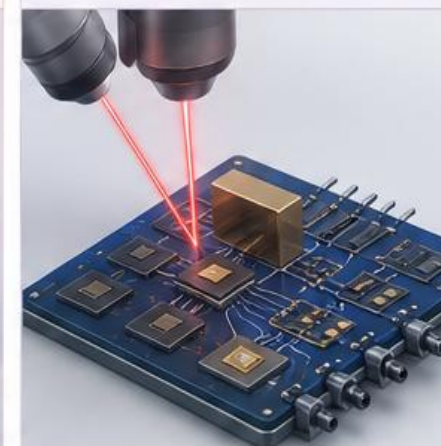
АЗОТ-ВАКАНСИОННЫЕ ЦЕНТРЫ В АЛМАЗЕ




Зачем нужны лазеры

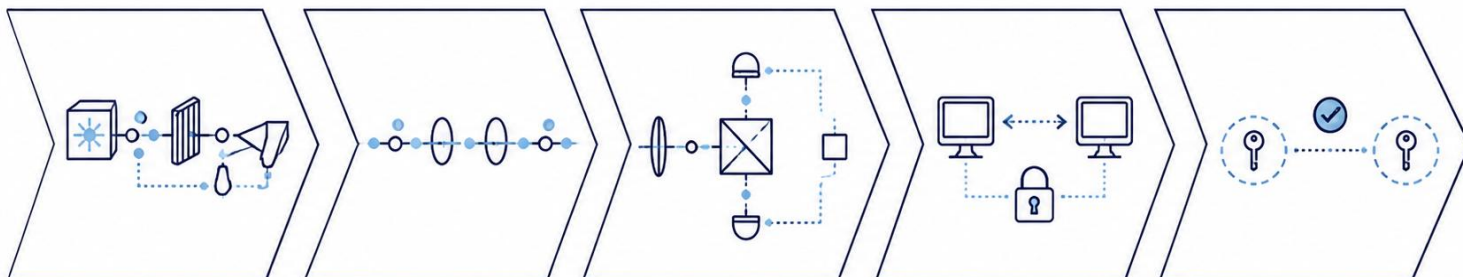
-  Инициализация спинового состояния NV-центров
-  Управление спиновыми состояниями (микроволново-оптические операции)
-  Оптическое считывание состояния (флуоресценция)

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ КУБИТЫ (ГИБРИДНЫЕ С ЛАЗЕРАМИ)



Зачем нужны лазеры

-  Управление сверхпроводниковыми кубитами через оптические интерфейсы
-  Преобразование микроволновых сигналов в оптические (квантовые трансдьюсеры)
-  Связь между удалёнными кубитами по оптическим каналам



1. Генерация квантовых состояний — фотонов

Источник создает кванты света в определенных состояниях (например, поляризация).

2. Передача квантовых состояний

Фотоны передаются по квантовому каналу (оптическому волокну или свободному пространству).

3. Измерение состояний получателем

Получатель измеряет каждый фотон в случайно выбранной базе (например, прямой или диагональной поляризации).

4. Классический канал связи

Отправитель и получатель обмениваются информацией о выбранных базах по открытому каналу.

5. Формирование общего ключа

Совпадающие результаты измерений используются для формирования общего секретного ключа. Любая попытка перехвата нарушает квантовые состояния и обнаруживается.

Системы защищённой связи на квантовых протоколах: синхронизация источников, компенсация потерь в волокне, защита от аппаратных атак.

Безопасность основана не на вычислительной сложности, а на законах квантовой механики

Дисперсия

Зависимость скорости света от частоты приводит к растяжению импульсов в волоконных системах. В телекоммуникациях дисперсия ограничивает скорость передачи данных и компенсируется специальными волокнами и цифровой обработкой сигналов.

Однако баланс дисперсии и нелинейности порождает **солитоны** — импульсы, сохраняющие форму при распространении.

Нелинейная оптика

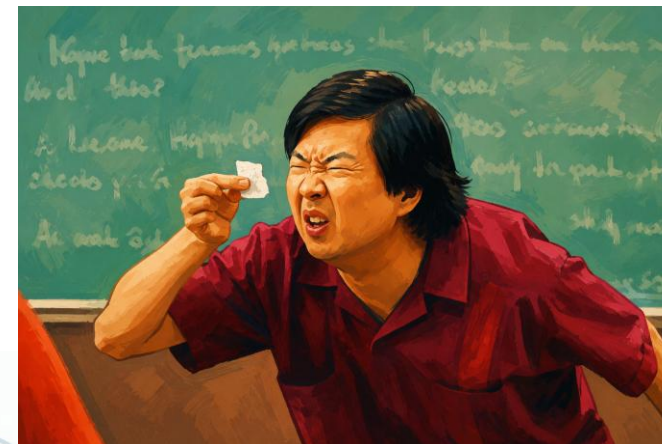
Нелинейные эффекты позволяют получать лазерные импульсы с предельно короткой длительностью — **ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ!**



Что такое фемтосекунда?



Фемтосекунда — это невероятно малая единица времени, равная 1×10^{-15} секунды, или одной квадриллионной секунды. Это значит, что 1 секунда содержит столько же фемтосекунд, сколько примерно секунд в 31,69 миллионе лет.



Через 35 млн лет я стану человеком

Для наглядности: за одну фемтосекунду свет проходит всего около 0,3 микрометра. Это соответствует размеру крошечных объектов, таких как микоплазма — мельчайшая бактерия, которая может свободно жить и размножаться.

Джоуль: базовая единица энергии

Один джоуль энергии — это количество, необходимое, чтобы нагреть всего пять капель воды на один градус Цельсия. Это привычная для нас величина, но её восприятие меняется в контексте времени.



Петаватт: невероятная пиковая мощность

Когда тот же один джоуль энергии выделяется за одну фемтосекунду, мощность достигает невероятных 1 петаватт. Это в 1000 раз больше, чем мощность удара молнии!

1 джоуль за 1 секунду = 1 Ватт



Характеристики фемтосекундных лазеров



- **Энергия импульса:** от наноджоулей (нДж) до миллиджоулей (мДж)
- **Длительность импульса:** от фемтосекунд (фс) до пикосекунд (пс)
- **Частота повторения импульсов:** от кГц до ГГц

❑ Мощный волоконный фемтосекундный лазер

- **Средняя мощность:** 20 Вт
- **Длительность импульса:** 220 фс
- **Энергия импульса:** 40 мкДж
- **Пиковая мощность:** 150 МВт

Для сравнения, пиковая мощность такого лазера в 150 МВт эквивалентна мощности крупной электростанции, например, **Адыгейской ВЭС.**



Применение фемтосекундных лазеров в обработке материалов



Фемтосекундные лазеры — это революционный инструмент для высокоточной обработки материалов благодаря их уникальным свойствам. Сфокусированное пятно излучения имеет размер всего в несколько микрон, что позволяет работать с невероятной точностью.



Раз-два... и в плазму!

Ультракороткие импульсы испаряют материал мгновенно, превращая его в плазму еще до того, как тепло успеет распространиться. Это обеспечивает "холодную" абляцию и идеальное качество обработки.



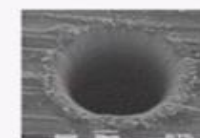
Нелинейная зависимость от интенсивности позволяет формировать детали много меньше фокального пятна



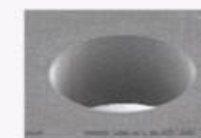
Непрерыв



Нано



Пико



Фемто



Фемтосекундные лазеры открывают новые возможности в различных медицинских областях, предлагая высокоточную и минимально инвазивную терапию.

Урология

Эффективное удаление камней и лечение урологических заболеваний.

Дерматология

Прецизионное удаление новообразований и коррекция кожных дефектов.

Офтальмология

Революционные методы коррекции зрения и лечения глазных болезней.

Стоматология

Малоинвазивные процедуры для лечения зубов и десен.

В урологии фемтосекундные лазеры совершают прорыв в литотрипсии, предлагая беспрецедентную точность и эффективность по сравнению с традиционными методами.

Наносекундная литотрипсия



Традиционный метод разрушения камней, основанный на использовании импульсов наносекундной длительности. Менее точный и может вызывать больше побочных эффектов.

Фемтосекундная литотрипсия



Инновационная технология, использующая ультракороткие лазерные импульсы для точечного и безопасного разрушения камней в почках и мочевыводящих путях.

Фемтосекундные лазеры обеспечивают исключительную точность в дерматологических процедурах, минимизируя повреждение окружающих тканей и улучшая результаты.

Микросекундные и наносекундные лазеры

Традиционные лазеры, используемые для удаления пигментных пятен и татуировок. Длинные импульсы могут приводить к термическому повреждению кожи.

Фемтосекундные лазеры

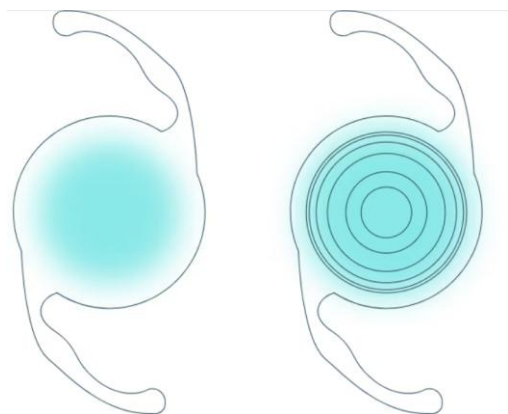
Благодаря ультракоротким импульсам, фемтосекундные лазеры позволяют точно воздействовать на целевые структуры, минимизируя термическое повреждение и обеспечивая быстрое заживление.

Фемтосекундные лазеры в офтальмологии



Фемтосекундные лазеры изменили подходы к глазной хирургии, обеспечивая высокую точность и безопасность при операциях на роговице и хрусталике.

Фемтосекундные лазеры обеспечивают минимальное повреждение тканей и более быстрое восстановление пациентов.



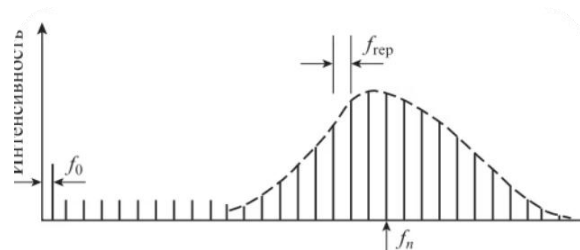
Эти лазеры используются для создания точных разрезов в роговице при операциях LASIK, SMILE, а также при трансплантации роговицы.



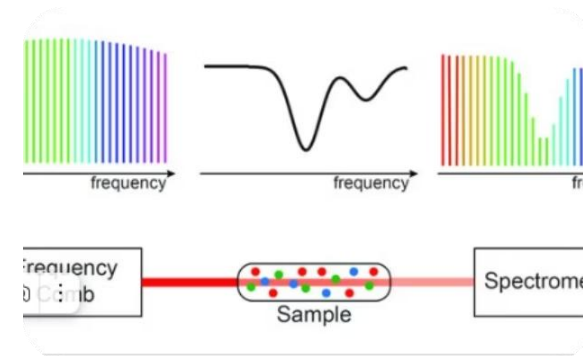
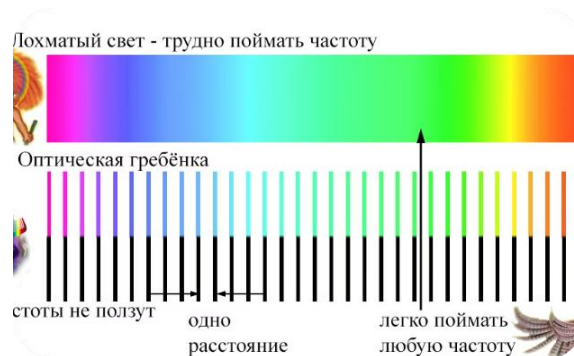
Метрология: Частотная гребёнка для спектроскопии



Частотные гребенки, основанные на фемтосекундных лазерах, революционизируют спектроскопию, предлагая беспрецедентную точность и скорость измерений.



с.1. Спектр излучения непрерывного фемтосекундного лазера (наглядности показано малое число линий, в действительности число может достигать ~1 млн).



Высокая точность

Позволяют измерять частоты оптических переходов с точностью до аттосекунд.

Широкий диапазон

Охватывают широкий спектральный диапазон, позволяя исследовать различные молекулы и атомы.

Многофункциональность

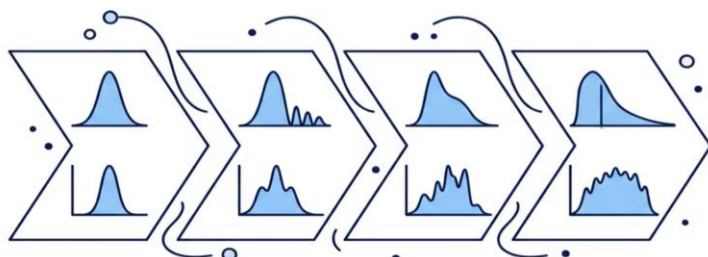
Применяются в научных исследованиях, контроле качества воздуха и производстве.

Распространение фемтосекундных импульсов в нелинейной среде



Мастер-класс с программой «Лазерный импульс в волокне» — визуальное исследование дисперсии, нелинейности и спектрального уширения.

Четыре режима: от дисперсии до суперконтинуума



Mode 1

ТОЛЬКО ДИСПЕРСИЯ. Импульс растягивается во времени. Спектр не меняется.

Mode 2

ТОЛЬКО НЕЛИНЕЙНОСТЬ. Появляются осцилляции. Спектр уширяется за счет ФМС.

Mode 3

ДИСПЕРСИЯ + НЕЛИНЕЙНОСТЬ. Импульс искажается асимметрично. Спектр расширяется сложно.

Mode 4

СИЛЬНОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ УШИРЕНИЕ. Формируется широкий спектр. Суперконтинуум.

Нелинейность

Показатель преломления зависит от интенсивности — порождает новые частоты

Дисперсия

Зависимость скорости света от длины волны — растягивает импульс во времени

Суперконтинуум

Сверхширокий спектр при сильном нелинейном взаимодействии

Фазовая самомодуляция

Интенсивность импульса меняет его собственную фазу

Итог: Распространение лазерного импульса определяется балансом дисперсии и нелинейности.

При малой мощности — дисперсионное растяжение; при высокой — уширение спектра и генерация новых частот.

Лазер становится не просто источником света, а универсальным инструментом, связывающим физику, инженерию и индустрию.



Медицина

Воздействие на уровне клеток



Оптические вычисления

Обработка информации с помощью оптического излучения — альтернатива электронным архитектурам



Энергетика

Новые источники дешевой энергии



Квантовые сети

Глобальная передача квантовых состояний



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

Сазонкин Станислав Григорьевич,

к.т.н., нач. лаборатории НОЦ «Фотоника и ИК-техника»

sazstas@bmstu.ru

Орехов Илья Олегович,

к.т.н., ведущий инженер НОЦ «Фотоника и ИК-техника»

orekhovio@bmstu.ru