



Микролазер: мал, да удал

Интервью с чл.-корр. РАН Алексеем Жуковым

В январе 2020 года в Высшей школе экономики в Санкт-Петербурге открылась новейшая Международная лаборатория квантовой оптоэлектроники. Питерская школа физика всегда славилась своими идеями и достижениями, которые были отмечены мировым научным сообществом, в том числе Нобелевской премией, которую получил выдающийся ученый Жорес Иванович Алфёров. Сегодня его ученик, член-корреспондент РАН Алексей Евгеньевич Жуков продолжает погружаться в наномир, создавая микролазеры на квантовых точках для оптоэлектроники будущего вместе с молодыми сотрудниками новой лаборатории ВШЭ. В интервью для «Научной России» Алексей Евгеньевич рассказал о квантовых точках – полупроводниковых нанокристаллах с заданными свойствами, которыми можно управлять. Для чего это необходимо и насколько реализуемо?



– Что собой представляют наноструктуры? И почему именно сейчас наблюдается такой интерес?

– На самом деле интерес к ним возник намного раньше. Просто сегодня мы подошли к такому этапу развития техники и технологии, что без наноструктур уже не обойтись. Если раньше это направление считалось интересным в рамках физики и реализовывалось в виде занимательных опытов, то теперь оно вышло на уровень реальных продуктов, которые окружают нас повсюду. Светодиоды, лазеры, транзисторы – всё это сегодня активно применяется как в науке, так и в повседневной жизни.

В свое время я выбрал для себя оптоэлектронику. И самый характерный пример использования наноструктур в этой области – это полупроводниковый лазер. 99% лазеров имеют в качестве активной области, где рождается свет, так называемую квантовую яму. Она ограничивает подвижность частиц с трех до двух измерений, тем самым заставляя их двигаться в плоском слое.

Малые размеры наноструктур вызывают новые эффекты, которые не присущи объемному полупроводнику. Один из таких эффектов известен как размерное квантование. Суть в том, что область, где «живут» электроны уменьша-

ется. Им становится тесно, и они начинают перестраиваться, формируя внутри кристалла свой кристалл. Пример характерного проявления размерного квантования – управление длиной волны излучения с помощью толщины структуры. Например, компания «Samsung» запустила серию QLED-телевизоров. Q – значит квантовая точка. Конечно, технологические принципы несколько иные, но внутренний физический принцип аналогичный: длина волны зависит от размера. В цветных дисплеях каждый пиксель содержит красный, зелёный и синий субпиксель. Эти цвета комбинируются с различной интенсивностью для получения миллионов оттенков. А содержащие квантовую яму транзисторы, например, на основе арсенида индия-галлия (InGaAs), позволяют достичь более вы-

В номере:

- **Микролазер: мал да удал** - интервью с чл.-корр. РАН Алексеем Жуковым.
- **КАК ЭТО БЫЛО...** Дедушка «Пересвета»
Как рождался лазерный локатор ЛЭ-1
- **ХРОНИКА**
- **Памяти В.И.Пустовойта**
- **ИНТЕРНЕТ-НОВОСТИ**

сокой подвижности электронов и, как результат, быстродействия.

– То есть эти технологии уже проникли в нашу жизнь?

– Да, и давно. Концепция использования размерного квантования применительно к лазерам на основе квантовых ям была впервые сформулирована в середине 70-х годов Робертом Динглом. В свою очередь, полупроводниковые квантовые ямы стали естественным продолжением идеи полупроводниковых гетероструктур, сформулированной в начале 60-х годов Жоресом Ивановичем Алфёровым.

В квантовой яме электроны могут двигаться свободно лишь в двух пространственных направлениях – вдоль плоскости слоя, тогда как в третьем направлении их движение ограничено другими слоями. А под квантовой точкой в настоящее время понимается пространственная область, в которой квантование носителей проявляется во всех трех направлениях.

И здесь позволю себе похвалить себя и коллег из Физико-технического института имени А.Ф.Иоффе. В 1994-м году именно здесь, в Санкт-Петербурге, был изготовлен первый лазер на квантовых точках. Мне посчастливилось принимать в этом деле участие. Мы первыми стали выращивать лазеры с квантовыми точками. Это стало настоящим прорывом. Все осознали, что российская наука способна создавать передовые технологии.

– Где сегодня применяются приборы на основе квантовой оптоэлектроники?

– Наиболее наукоемкое направление – это оптическая связь, связанная с быстрой передачей информации. Понятно, что её объем растет с каждым днем. Это значит, что передавать информацию по проводам становится невозможно в виду ограничения на произведение дальности связи на скорость передачи данных. Проще говоря, передача информации на большое расстояние происходит медленнее. Так вот произведение – дальность на скорость – у оптики гораздо больше, чем у проводов.

Сегодня оптоволоконные линии мы используем и в домах, и в офисах, и на дачных участках. Следующий этап – внедрение оптических систем связи внутри суперкомпьютеров мировых Data-центров. Следовательно, дальность связи, где используется оптика, постепенно сокращается. Предполагается, что в дальнейшем уже внутри каждого компьютера будет своя оптическая система или оптоэлектронная плата. А затем и внутри смартфонов.

Предел, к которому мы стремимся – оптическая схема внутри чипа. По сути, наши учителя 40 лет назад закладывали принципы оптической связи, создавая лазеры. Почему Жорес Алфёров стал Нобелевским лауреатом? Потому что он придумал полупроводниковые гетеро-

структуры и создал первые приборы на их основе. И за это спустя, к сожалению, много лет он получил главную научную премию.

– Это характерно для Нобелевской премии.

– Верно. Я вспоминаю этот день и тот взрыв эмоций, который испытали все сотрудники Физтеха, когда Алфёров стал Нобелевским лауреатом. Кстати сказать, Жорес Иванович пригласил меня на церемонию вручения в Стокгольме. Это была настоящая эйфория: отечественный ученый получил Нобелевскую премию.

– Чего удалось достичь за эти 50 лет?

– Колоссальнейшего прогресса. В чем состояло преимущество алфёровских гетероструктур? В том, что с их помощью впервые удалось создать лазер, работающий при комнатной температуре. При этом мощность излучения была очень низкая. Когда я стал заниматься этой тематикой, в физтехе появились мощные лазеры, которые называли «ватниками», поскольку их мощность была около 1 Вт. Через 10 лет мощность увеличилась в 10 раз, а вскоре и еще больше.

Увеличилась и скорость передачи, а также дальность. Если раньше один гигабит в секунду казался пределом мечтаний, то сейчас передача на уровне 20-30 гигабит в секунду – привычная реальность.

– Когда говорят о наноструктурах, упоминают метод молекулярно-пучковой эпитаксии. В чем его специфика?

– Представьте структуру в виде слоеного полупроводникового пирога. Суть в том, что на кристаллической подложке выращиваются нужные слои, некоторые из которых квантово-размерные. Как работает метод? В вакуумной камере, откуда откачан весь воздух и все ненужные вещества, помещена подложка, на которую наращиваются необходимые элементы. Исходное вещество хранится в тигле – эдаком «стакане» из жаропрочного материала. Самый распространенный вариант исходного вещества – это галлий и мышьяк. Элементы нагреваются и летят к кристаллической подложке, где соединяются вместе.

– Почему важно наращивать элементы в вакууме?

– Высокий вакуум прежде всего обеспечивает чистоту. Во-вторых, в вакууме молекулы летят словно снаряды, не меняя траекторию. Поэтому в вакууме поток атомов легко перекрыть просто механической заслонкой. Это очень удобно, поскольку позволяет создавать различные гетероструктуры. Был галлий-мышьяк, открыли заслонку с алюминием – стал алюминий галлий-мышьяк. Открыли индий – стал индий галлий-мышьяк. То есть мы можем менять химический состав на уровне монослоя, то есть атомного слоя.

На сегодняшний день это одна из наиболее продвинутых, передовых технологий создания

полупроводниковых гетероструктур для оптоэлектроники.

– От исходного вещества зависят конечные свойства?

– От вещества и от размеров. Важно, что в эпоху доквантовую единственным способом поменять, например, длину волны оставался подбор нужного химического состава. Но и здесь всегда существовали свои ограничения. Прежде всего, он должен быть согласован по параметру кристаллической решетки с подложкой и выдерживать определенные температуры.

Как оказалось, квантовая яма тонкая, она может быть выращена на подложке, чьи кристаллические параметры отличаются. Проще говоря, яма может подстроиться в определенных пределах. Плюс ко всему, мы можем, меняя толщину, подстраивать длину волны.

– Вы много говорили о квантовых точках, квантовых ямах и будущем оптоэлектроники. Некоторые специалисты сегодня активно занимаются созданием квантового компьютера. Используется ли здесь принципы из оптоэлектроники или эти сферы не пересекаются?

– Конечно, используется. Эти сферы действительно связаны. Но пока неясно, какой способ наиболее эффективен для создания квантового компьютера, и на основе каких принципов будет проводиться обмен данными внутри его элементов. В любом случае, оптическая связь всегда выгоднее, чем использование проводов с точки зрения скорости действий.

Помимо этого, к сфере квантовых вычислений очень близко примыкает квантовая криптография. Здесь однозначно используются принципы квантовой оптоэлектроники, в частности – источники одиночных фотонов. Речь идет о связи, которую невозможно обмануть. Потому что свойства получаемого сигнала меняются, если кто-то хочет его похитить. А получатель сразу же об этом узнает.

Так вот источники одиночных фотонов основаны на квантовых точках, каждая из которых может быть одиночной и, соответственно, испускать одиночные фотоны. Поскольку в единицу времени в одной квантовой точке рождается один фотон.

– Поговорим о вашей лаборатории, которая создана совсем недавно. Когда и как возникла идея ее создания? И к чему вы пришли сегодня?

– Идея зрела долго. И я очень благодарен руководству Высшей школы экономики, что они решили заниматься и физикой тоже. И результатом этого решения стало наше появление здесь. Формально лаборатория открылась в январе 2020 года. Высшая школа экономики выделила довольно крупные деньги на приобретение оборудования, на обустройство лаборато-



Сотрудники международной лаборатории квантовой оптоэлектроники ВШЭ. Слева направо: менеджер Елизавета Котко, научный руководитель Алексей Евгеньевич Жуков, ведущий научный сотрудник Алексей Надточий, научный сотрудник Эдуард Мусеев.

рии. Этим мы и занимались весь прошлый «ковидный» год.

Разумеется, мы столкнулись с определенными трудностями. Всё взаимодействие с поставщиками приходилось вести удаленно. К счастью, сейчас уже всё куплено и установлено.

В международной лаборатории квантовой оптоэлектроники Высшей школы экономики мы делаем упор на исследования, связанные с микроразерами. Поскольку мы стремимся к «скрещиванию» оптической связи и микросхемы, необходимо уменьшать размеры лазера.

Работать в этом направлении нам помогает специальная оптическая измерительная аппаратура, которая позволяет исследовать мельчайшие объекты. Помимо этого, нас интересуют быстро меняющиеся процессы: быстрое измерение оптических сигналов и их модуляция. И то, и другое дает информацию о том, как быстро мы можем обмениваться данными с помощью такого лазерного источника, как быстро мы можем передавать информацию, какие есть внутренние ограничения.

Кроме того, мы нацелены и на температурные измерения. Важно, чтобы конечный прибор мог работать при комнатной, а еще лучше при повышенной температуре.

– Каков прикладной аспект?

– В лаборатории работают люди, которые «вышли» из академических институтов. Поэтому мы видим наше призвание, прежде всего, в поисковых исследованиях. Конечно, каждое из них имеет четкую прикладную перспективу. Но, когда дело дойдет до прикладного, мы надеемся, что за нами будут стоять люди, которые подхватят наши технологии и будут внедрять их непосредственно на производстве.

К сожалению, технологии лазеров на квантовых точках смогли развить на Западе наши отечественные ученые. Сейчас ситуация несколько изменилась. Есть надежда, что это направление

начнет развиваться в прикладном аспекте и в России.

Сегодня многие научные группы пытаются создать оптический лазерный источник, который способен передавать информацию между кремниевыми интегральными схемами или даже внутри интегральной схемы. Но необходимо соблюсти ряд требований: такой источник должен работать при повышенных температурах; быть маленьким и компактным; интегрирован с кремнием. Надо сказать, что кремний – это очень специфический материал, который не светит, при этом в электронике этот элемент – основной. Поэтому множество фундаментальных задач еще требуют решения.

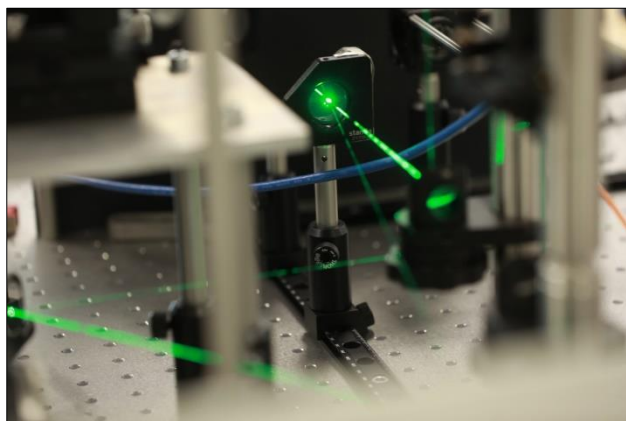
– А кто может быть конечным потребителем таких технологий?

– Конечным потребителем, по всей видимости, должны быть компании, которые занимаются разработкой и производством кремниевой электроники, кремниевых интегральных микросхем, либо компании, которые занимаются оптическими коммуникациями. Сейчас сферы оптических коммуникаций и микроэлектроники разрозненны. Что-то посередине должно их породнить. В этом мы видим свою задачу – соединить две области. Сейчас мы пытаемся такие контакты наладить.

– Какое оборудование здесь используется?

– Лаборатория обеспечена уникальной научной установкой «Комплексный оптоэлектронный стенд». Если говорить про быстрые измерения, то мы используем так называемую люминесценцию с временным разрешением. Наши сотрудники сейчас юстируют, тестируют и налаживают этот прибор.

Помимо этого, здесь применяется метод высокочастотной модуляции: с помощью быстрого сигнала меняется интенсивность излучения, а мы наблюдаем отклик. И, конечно, в нашей работе не обойтись без криостата. Современные криостаты отличаются от гигантских резервуаров, куда необходимо было заливать жидкий азот и гелий. Сейчас они более компактные и



Часть оборудования установки «Комплексный оптоэлектронный стенд».

удобные в пользовании.

Основа установки – виброзащищенный оптический стол. Он позволяет избежать ненужных вибраций и обеспечивает точность измерений даже очень маленьких объектов.

– Уже есть какие-нибудь интересные результаты, которыми вы можете поделиться?

– Конечно. Недавно мы опубликовали большой обзор о микролазерах с квантовыми точками в высокорейтинговом журнале «Light: Science & Applications». В целом, нам удалось сделать микролазеры, которые работают при 110 градусах Цельсия. Мы продемонстрировали оптическую передачу данных со скоростью 10 Гигабит в секунду. Это не рекорд для лазеров вообще, но очень хороший результат именно для микролазеров. Все это придает уверенность в том, что мы на правильном пути.

– Как вы заинтересовались этой темой?

– Позволю себе начать издали. Я учился в петербургской физматшколе, которая сегодня известна как Президентский физико-математический лицей № 239. После окончания школы встал вопрос – куда же мне пойти учиться? Так вышло, что два моих одноклассника заинтересовались кафедрой оптоэлектроники, созданной *Жоресом Ивановичем Алфёровым*. Поскольку мы дружили, я решил поступать с ними, хотя у меня не было никакого понимания, что такое оптоэлектроника и кто такой Алфёров. Но я окунулся в атмосферу такой учебы, когда тебе преподает человек, который реально занимается наукой. Мы четко осознавали, к чему нам стоит стремиться.

Студентов в то время брали в армию, поэтому после двух лет службы я вернулся в институт, где после окончания уже не было распределения. Я был в свободном плавании, но решил продолжать тему своей дипломной работы. В Физико-техническом институте тогда была создана новая научная группа, куда я как студент-практикант был приставлен. Тогда же появилась новая установка молекулярно-пучковой эпитаксии. С помощью новейших в то время приборов за два года наша группа продемонстрировала первый в мире работающий лазер на квантовых точках. Это принесло нам научную известность. Стали развиваться активные контакты с разными научными институтами, школами, в том числе – с коллегами из Технического университета Берлина, тесные связи с которыми сохраняются по сей день. Очень быстро я защитил кандидатскую диссертацию, а затем и докторскую.

Но направление оптоэлектроники и полупроводников продолжает меня увлекать, в особенности – микролазеры на квантовых точках.

– Есть ли интерес со стороны зарубежных коллег? И как вы поддерживаете контакты сегодня?

– Сейчас наше общение перешло в удаленный

формат. Но интерес, конечно, есть. В Германии, например, мои знакомые основали успешную фирму по производству полупроводниковых лазеров. Мы не только потребляем их продукцию, но и обмениваемся идеями и опытом.

В Университетском Колледже Лондона (University College London) у нас есть связи с хорошей группой ученых, которые занимаются эпитаксией на кремнии, мы с ними довольно активно сотрудничаем. В Пекинском университете почты и телекоммуникаций (Beijing University of Posts and Telecommunications), где до пандемии я был приглашенным профессором, была создана лаборатория имени Ж.И.Алфёрова. Мы довольно часто туда ездили с лекциями и работали над совместными исследованиями с китайскими коллегами, продолжаем контакты и сейчас.

– Вы в начале интервью определили некий путь от оптоэлектронной связи между континентами до микрочипов. Основываясь на современных тенденциях, когда мы сможем прийти к этому результату?

– Патент об использовании квантовых эффектов в лазерах появился, если не ошибаюсь, в 1979 году. Реально работающие приборы пришли на конец 80-х – начало 90-х годов. То есть прошло около 11 лет. Поскольку 5 лет люди уже занимаются этим направлением, то, скорее всего, первых результатов стоит ждать лет через 6. В целом, экспериментальные образцы оптической связи между чипами уже продемонстрированы. Поэтому ждать реализации осталось недолго.

<https://scientificrussia.ru/articles/kvantovye-tochki-intervyu-s-chl-korr-ran-a-e-zhukovym>

КАК ЭТО БЫЛО...

Дедушка «Пересвета»

Как рождался лазерный локатор ЛЭ-1

Ю.В.Рубаненко, лауреат Ленинской премии, полковник в отставке



Успешное завершение испытаний экспериментальной системы «А» на Балхашском полигоне («Через барьер триангуляции») открыло дорогу для продолжения работ по противоракетной обороне. Однако перед разработчиками встали новые задачи, связанные с совершенствованием средств нападения. Появившиеся у вероятного противника многоэлементные («сложные») цели со средствами преодоления ПРО существенно осложнили перехват головных частей баллистических ракет (ГЧ БР). Каким путем пошли в решении этой проблемы советские конструкторы?

Пришлось отказаться от использования высокоточного метода триангуляции в связи с громоздкостью и дороговизной системы. В свою очередь отказ от него привел к ухудшению точностных характеристик радиолокационных средств. Возникла проблема селекции головной части. Генеральному конструктору системы ПРО Григорию Кисунько пришлось изыскивать новые, уникальные способы решения задачи.

Сила кооперации

Первая половина 60-х годов XX века была насыщена открытиями и изобретениями в области лазеров. Работы вели крупнейшие лаборатории США, СССР, Европы, Японии, Китая. Главным научным центром СССР, где под руководством *Александра Прохорова* и *Николая Ба-*

сова выполняли пионерские работы по лазерам, стал Физический институт им. П.Н.Лебедева Академии наук СССР (ФИАН). В 1962 году в СССР была утверждена первая государственная программа исследований направлений лазерной науки и техники. Наряду с ведущим институтом ФИАН к работам подключались коллективы многих НИИ, КБ и вузов.

В 1963 году по предложению *Кисунько* было принято решение о создании в ОКБ «Вымпел» специализированного отдела № 56 – для разработки внедряемого в комплексы ПРО экспериментального образца лазерного локатора, способного с высокой точностью (единицы угловых секунд по углу и до 30 метров по дальности) определять координаты фрагментов сложной баллистической цели. Отдел № 56, который возглавили *Олег Ушаков* и его заместитель *Виктор Морсков*, состоял из трех лабораторий: тематической *Германа Тихомирова*, лаборатории лазеров под руководством *Николая Устинова* и лаборатории приемных устройств *Игоря Матвеева*. Подразделению поручили разработать эскизный проект лазерного локатора и организовать реализацию проекта.

К разработке эскизного проекта подключились молодые специалисты *Вячеслав Ленский*, *Юрий Шилохвост*, *Вадим Шадрин*, *Николай Львов* и другие. Отдел установил деловые связи с лабораторией Государственного оптического института (ГОИ) им. С.И.Вавилова, Ленинградским оптико-механическим объединени-

нием (ЛОМО) – разработчиком главного телескопа локатора, а также центральным конструкторским бюро (ЦКБ) «Геофизика» – разработчиком оптико-механического тракта. Персональная ответственность за расчеты выходных параметров локатора (потенциала, точностных характеристик, временного баланса) возлагалась на общестанционную группу *Николая Куксенко*. *Вячеславу Ленскому* поручено было разработать описание и обоснование структурной схемы локатора, его оптической и функциональной схемы. *Юрия Подпалого* определили ответственным за разработку алгоритмов управления и устройств локатора – приемного, устройства обработки информации, синхронизатора, устройства сопряжения, вычислительного комплекса. Только благодаря такой кооперации дело сдвинулось с места.

Эскизный проект лазерного локатора ЛЭ-1 в составе 15 томов, где описывалось его устройство, был выпущен в конце 1964 года. В феврале 1965-го он был успешно защищен. На этом этапе к работам подключилось Министерство обороны в лице генерального заказчика по системам ПРО – 4-го Главного управления МО СССР и военного представительства № 1607, аккредитованного при ОКБ «Вымпел». Под их контролем велись проектирование и строительство сооружений для размещения локатора, разработка конструкторской документации, изготовление аппаратуры и монтаж оборудования, испытания изделия.

По замыслу разработчиков лазерный локатор ЛЭ-1 представлял 196 лазерных одножюльных импульсных излучателей на рубине, поочередно работающих с частотой 10 герц. Вся энергия излучателей выбрасывается в импульсе длительностью 30 наносекунд. С помощью оптико-механических переключателей и систем формирования и наведения в пространстве обзора и обнаружения цели строится индикатриса излучения с расходимостью в одну угловую минуту. Этим лучом локатор ведет поиск цели. Отраженный сигнал принимается на матричное приемное устройство из 196 высокочувствительных фотоэлектронных умножителей. Пройдя первичную обработку, сигнал подается на вычислительное устройство, которое выдает координаты цели в реальном масштабе времени.

Использование разработанного под руководством *Иммануэля Самуиловича Маршака* передающего устройства из 196 излучателей, существенно усложнившего оптический тракт локатора, объясняется отсутствием в тот период активных кристаллов для резонаторов, позволяющих спроектировать передатчик на базе одного лазера при выполнении требований по обнаружению и сопровождению цели на максимальном расстоянии. Заданная дальность была достиг-

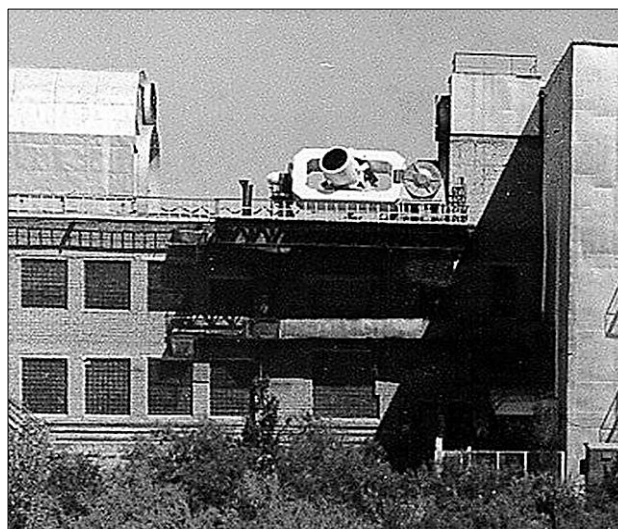
нута путем коллимации луча передатчика на выходе телескопа до 10 угловых секунд. При этом требуемый размер мгновенно облучаемого поля в пространстве 100x100 угловых секунд достигался посредством его засветки от 196 излучателей, каждый из которых облучал свою часть диаграммы направленности и был отъюстирован с одним из 196 элементов матричного приемного устройства. Оптический тракт обеспечивал сведение парциальных диаграмм излучения всех излучателей в единое поле обзора, строго сохраняя положение каждого луча в суммарной диаграмме излучения передатчика.

В течение 1965–1966 годов сотрудники отдела №56, преобразованного в январе 1966 года в СКБ №56, разработали частные технические задания на функционально законченные устройства локатора.

Локатор ценю в Ленинскую премию

Одновременно с этими работами была разработана документация на стендовый образец лазерного локатора ЛТ-1, который после изготовления на опытно-производственном участке смонтировали на крыше лабораторного корпуса №42 ОКБ «Вымпел». Настроенный при работе по удаленной на километр в районе станции метро «Войковская» вышке образец прошел этап летных испытаний, подтвердивший правильность принятых в эскизном проекте технических решений. Впервые в СССР было обеспечено сопровождение лазерным локатором реальной движущейся цели (специально оборудованного самолета Ту-134) с высокоточным измерением ее текущих координат.

Разработка конструкторской документации на главный телескоп ТГ-1 диаметром 1,3 метра в КБ *Бориса Гутникова* и оптико-механический тракт в КБ *Давида Хорола* завершилась к концу 1969 года. Так как специалисты ОКБ «Вымпел»



Телескоп ТГ-1 лазерного локатора ЛЭ-1, полигон Сары-Шаган.



Руководители оборонно-промышленного комплекса СССР на площадке ЛЭ-1, 1974г. По центру в первом ряду - министр обороны А.А.Гречко, справа от него - Н.Г.Басов, затем - министр оборонной промышленности СССР С.А.Зверев.

не имели опыта и технологической базы в области оптического приборостроения, для ускорения работ по лазерной тематике, в частности, по лазерному локатору ЛЭ-1, в декабре 1969 года министр оборонной промышленности (МОП) СССР *Сергей Зверев* принял решение, поддержанное секретарем ЦК КПСС *Дмитрием Устиновым*, о создании на основе СКБ № 56 центрального конструкторского бюро «Луч» (в последующем ЦКБ и НПО «Астрофизика»). С переводом лазерной тематики в МОП СССР и организацией при ЦКБ «Луч» специального конструкторского бюро №1 по лазерным локационным комплексам (главный конструктор – *Николай Устинов*) работы по ЛЭ-1 стали на реальную основу. К ним привлечены дополнительные силы предприятий оптической отрасли. К контролю подключилось военное представительство Минобороны № 1133.

В 1972 году на Балхашском полигоне завершили строительные работы для размещения ЛЭ-1, поставили технологическую аппаратуру и развернули монтаж и наладку прибора. К 1974 году была проведена юстировка оптико-механического тракта, позволившая получить на выходе главного телескопа луч в 10 угловых секунд, стыковка и настройка всей аппаратуры локатора ЛЭ-1.

В период интенсивного развертывания работ на ЛЭ-1 Балхашский полигон посетили министр обороны *Андрей Гречко* и министр оборонной промышленности *Сергей Зверев* в сопровожде-

нии высшего командования военного ведомства, известных академиков.

Поэтапные испытания локатора проводились по согласованной с полигоном программе. Сначала устроили поверку по установленным на вышках измерительным приборам, затем – по оборудованному оптическими датчиками и самоотражателем самолету. В 1975 году началось тестирование по головным частям баллистических ракет различных классов и искусственному спутнику Земли (ИСЗ). Получены экспериментальные данные по всем параметрам ЛЭ-1, а также информация по отражательным характеристикам сопровождаемых целей. Подтверждена работоспособность локатора и высокая точность измерений. Однако из-за ограничений при работе в условиях облачности использование ЛЭ-1 в системе ПРО тогда признали невозможным и нецелесообразным.

В 1979 году локатор ЛЭ-1 был передан на совместное техобслуживание с полигоном как высокоточное средство внешнетраекторных измерений. Значимость работ по лазерному локатору ЛЭ-1 отмечена присуждением Ленинской и двух Государственных премий.

Разработанные для ЛЭ-1 технологии, элементы и материалы нашли широкое применение при создании лазерного локатора системы контроля космического пространства 30Ж6.

По материалам
<https://vpk-news.ru/articles/62544>

ХРОНИКА**Коллективные члены ЛАС представили свои разработки на выставке «Иннопром-2021»**

В Екатеринбурге с 5 по 8 июля с.г. проходила международная промышленная выставка «Иннопром-2021». Мероприятие было организовано на площадке выставочного комплекса «Екатеринбург-Экспо». Тема выставки в 2021 году — «Гибкое производство».



На стенде ООО «Лазерный центр» из Санкт-Петербурга были представлены разработанные компанией уникальные станки и решения по оптимизации и автоматизации лазерной обработки на примере конкретных производств (система лазерной очистки «TurboClean», лазерная маркировка «Data Matrix» кодом на лазерном станке «МиниМаркер2» с последующим сканированием двумерного кода приложением на смартфоне, микрообработка на лазерном станке «МикроСЕТ»).

6 июля стенд компании посетил Министр промышленности и торговли Российской Федерации *Денис Валентинович Мантуров*. Главе Минпромторга были продемонстрированы уникальные возможности лазерной обработки материалов и применение данных технологий в ювелирной отрасли – лазерная эрозионная обработка, в электронной отрасли – лазерная микрообработка электрокомпонентов, была продемонстрирована система считывания микро штрих-кодов, наносимых лазером.

На 7 июля компанией «Лазерный центр» было запланировано проведение семинара «Современные лазерные технологии для промышленности», где предполагалось рассмотреть новейшие лазерные источники, современные роботизированные решения, уникальные технологии лазерной обработки.

Среди заявленных докладчиков – представители ООО «Лазерный Центр», ООО НТО «ИРЭ-Полус», FANUC, ЗАО «ВНИТЭП», ООО «НТЛТ».

К большому сожалению, семинар был отменен в связи с ограничительными мерами, введенными региональными властями.

Компания «Швабе» представила на «ИННОПРОМ-2021» автоматизированный лазерный хирургический комплекс АЛХК-01-«Зенит», предназначенный для удаления новообразований и лечения различных гинекологических заболеваний.

В рамках выставки «Иннопром-2021» делегация торговых представителей РФ посетила Региональный центр лазерных технологий (РЦЛТ) в Екатеринбурге. В состав делегации вошли торгпреды РФ в Норвегии, Бельгии, Люксембурге, Дании, Испании, и многие другие их коллеги. Была организована экскурсия по производству Центра с действующим лазерным оборудованием, торгпредов познакомили с уже существующими и потенциальными возможностями уникального предприятия.



Уральцы продемонстрировали гостям кузов тяжелого карьерного экскаватора ЭКГ-35, который изготавливают здесь для «Уралмашзавода», а также различные детали из титановых и алюминиевых сплавов и сталей для военной и гражданской продукции, в том числе, комплектующие для радиолокационной станции, оснастку для испытания российского представительского автомобиля «Аурус», детали теплообменных изделий для металлургии и теплоэнергетики и другие изделия.

ИНТЕРНЕТ-НОВОСТИ**Фотон дважды зарегистрировали без его разрушения**

Физикам удалось дважды зарегистрировать один и тот же фотон и при этом не разрушить его. В качестве двух детекторов они использовали оптические резонаторы на атоме рубидия, между которыми фотоны путешествовали по оптоволокну. Ученые показали, что такое последовательное детектирование фотонов позволяет увеличить вероятность их регистрации и уменьшить шум.

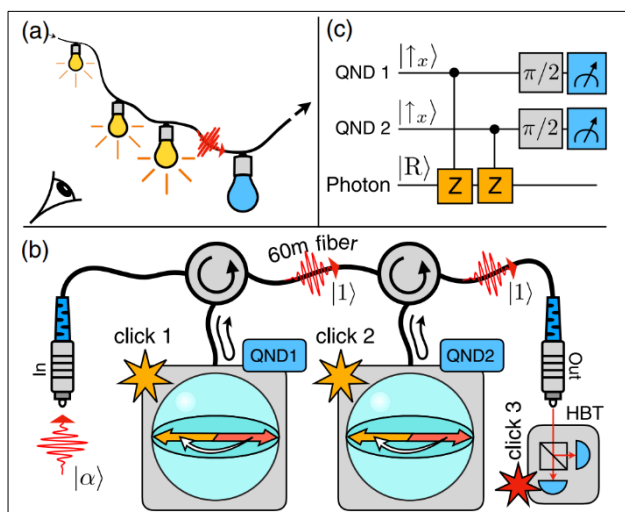


Схема установки в различных представлениях:
(a) – эмпирическая схема с лампочками
в качестве детекторов, (b) – физическая схема,
(c) – схема на языке квантовых операторов.

Обычно для того, чтобы зарегистрировать фотон, его необходимо поглотить. Это позволяет получить информацию о самом фотоне, но не дает возможности повторить такое измерение. Сама природа такого метода регистрации вносит ограничения на его возможности: так нельзя отследить эволюцию состояния одного и того же фотона во времени. Кроме того, в случае не идеальности детектора, фотон с определенной вероятностью может быть разрушен даже без его регистрации, а значит информация о нем будет потеряна.

Такие последствия особо неприятны в случае квантовых измерений, ведь в них состояние каждого конкретного фотона и его эволюция могут нести важную информацию. Тут особо полезными представляются концепт квантовых неразрушающих измерений, при которых сам факт измерения и его результат не влияет на неопределенности последующего измерения квантовой наблюдаемой при дальнейшей эволюции системы. На практике такой метод позволяет повторять одни и те же измерения без изменения их результата и обходить описанные выше проблемы разрушающих измерений.

Сами по себе квантовые неразрушающие измерения уже нашли применение в целом ряде областей: от детектирования гравитационных волн и астрономии до высокоточной метрологии. Такую методику используют при работе с индивидуальными ионами, сверхпроводящими кубитами и атомными ансамблями, но с фотонами все оказалось сложнее. Причиной стала сложность создания детекторов, которые были бы в состоянии зарегистрировать фотон без его поглощения. Концепты детекторов для однократного неразрушающего измерения фотонов разработали и реализовали как для микроволновых, так и для оптических фотонов, однако

многократной регистрации одних и тех же фотонов пока достигнуть не удавалось.

Теперь же Эмануэль Дистант (*Emanuele Distante*) и его коллеги из Института квантовой оптики Общества Макса Планка дважды зарегистрировали оптический фотон без его разрушения. В качестве фотонных детекторов ученые использовали два оптических резонатора, каждый из которых представлял собой пойманный между маленькими зеркалами атом рубидия. Резонаторы были настроены на частоту определенного перехода между состояниями атома, а с помощью рамановских лазеров атом помещался в состоянии суперпозиции своих двух различных уровней. За состоянием атома рубидия в каждом детекторе следили с помощью отдельных лазеров, настроенных на частоту оптических резонаторов. Два детектора были соединены друг с другом оптоволоконном длиной 60 метров. Кроме того, в начале схемы находился источник слабых когерентных фотонных импульсов с длиной волны 780 нанометров, а в конце — простой детектор одиночных фотонов. Ученые использовали фотонные импульсы вместо одиночных фотонов для того, чтобы исследовать поведение такой схемы детектирования в зависимости от среднего числа фотонов в импульсе.

Сама регистрации проходила по следующему принципу. Каждый из двух детекторов, следующего принципу квантовых неразрушающих измерений, был устроен так, что при попадании на него пучка фотонов атом рубидия в нем менял состояние, если число фотонов было нечетным (в том числе — один), и оставался в начальном состоянии в обратном случае. Фотонный импульс при этом отражался от детектора и направлялся в следующий детектор, а затем поглощался детектором одиночных фотонов. В результате ученые могли отслеживать, с какой вероятностью срабатывал каждый из детекторов, а также изучить суммарную эффективность регистрации. Оказалось, что максимальная эффективность двух детекторов при работе по одному составила 81,3 процента и 87,0 процента (отличия обусловлены качеством настройки каждого детектора), а при совместной работе она увеличилась до 95,1 процента.

Также физики показали, что совместное использование двух детекторов увеличивает и другой важный показатель регистрации фотонов — отношение сигнала к шуму. Этот параметр для комбинации двух детекторов оказался в 61 раз выше, чем для второго детектора, и в 227 раз выше, чем для первого детектора. Таким образом, квантовые неразрушающие измерения позволили существенно улучшить эффективность и качество детектирования оптических фотонов. Ученые отмечают, что уменьшение потерь при

движении фотонов по оптоволокну между детекторами (в исследованной установке — 53 процента) и добавление разрешения по времени позволят использовать такую схему в качестве источника состояний Фока. Кроме того, такая система неразрушающих детекторов может быть использована для работы с фотонными кубитами и тем самым ускорить работу существующих квантовых алгоритмов.

Неразрушающие измерения особо полезны при работе с кубитами, и эту методику развивают не только для устройств на основе фотонов: такие измерения уже провели для кубитов на квантовой точке. А микроволновые фотоны без разрушения предложили регистрировать с помощью квантового метаматериала.

Никита Козырев,

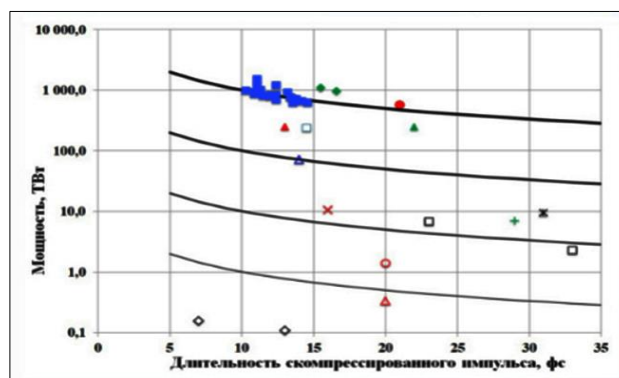
<https://nplus1.ru/news/2021/07/13/detecting-optical-photon-twice>

★ ★ ★

В ИПФ РАН на лазере PEARL впервые в мире получены оптические импульсы длительностью 11 фемтосекунд и мощностью 1,5 петаватта

Впервые в мире получены импульсы длительностью менее 15 фемтосекунд ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) на установке мощностью более одного петаватта ($1 \text{ ПВт} = 10^{15} \text{ Вт}$). Рекордное значение — 11 фс для импульса 1,5 ПВт — было получено на лазерном комплексе PEARL Института прикладной физики Российской академии наук. Это стало возможным благодаря уникальному методу дополнительной компрессии — сокращения длительности — лазерных импульсов CaFCA (*Compression after Compressor Approach*). Оптический импульс становится в несколько раз короче исходного, и во столько же раз возрастает его пиковая мощность, поскольку при преобразовании энергия импульса практически не изменяется.

Метод основан на уширении спектра оптического излучения при его прохождении через нелинейный элемент. Внесённая нелинейным элементом спектральная зависимость фазы излучения компенсируется при отражении от специального зеркала, приводя к укорочению импульса. Получены рекордные значения фактора компрессии импульса — больше шести. При создании оптической схемы использовался эф-



Сравнение всех опубликованных результатов по одностадийной компрессии фемтосекундного излучения. Закрашенные элементы — результаты сотрудников ИПФ РАН.

фект самофилтрации мелкомасштабных флуктуаций оптического излучения высокой интенсивности, открытый авторами ранее.

К несомненным плюсам данного способа увеличения мощности ультракоротких лазерных импульсов следует отнести:

- простоту реализации — для создания необходимо минимальное количество оптических элементов (нелинейный элемент — тонкая пластинка из вещества с высокой нелинейностью и малой дисперсией; квадратичный корректор фазы — специальное зеркало; вакуумная камера, в которой располагаются оптические элементы);
- универсальность — может быть использован на любом существующем мощном фемтосекундном лазере для уменьшения длительности и увеличения мощности импульсов;
- масштабируемость — работает с излучением практически любой доступной апертуры;
- каскадируемость — нет ограничений для последовательного использования нескольких каскадов дополнительной компрессии оптических импульсов.

Коллектив авторов:

В. Гинзбург, И. Яковлев, А. Кочетков, А. Кузьмин, С. Миронов, И. Шайкин, А. Шайкин, Е. Хазанов.

<https://ipfran.ru/institute/news/2021/2021-06-23-optic-impuls>

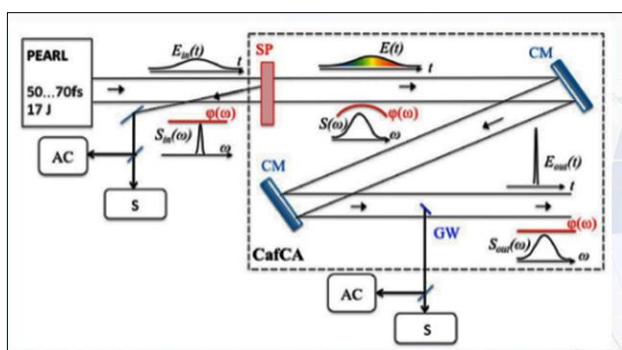


Схема эксперимента.

Показаны источник излучения — лазерный комплекс PEARL; кварцевая пластинка — «SP»; chirпирующие зеркала — «CM»; система диагностики параметров излучения («SP» и «AC»).

Схематично показаны оптические импульсы, распространяющиеся в установке ($E(t)$), их спектры ($S(\omega)$) и спектральные фазы ($\phi(\omega)$).

Как долететь до Альфы Центавра — технические подробности

Не так давно Мильнер и Хокинг нашумели анонсом своего проекта *Breakthrough Starshot*. Проект стоит \$100 млн, которые будут потрачены на исследование технической возможности полета до Альфы Центавра. Инженерная и исследовательская фаза продлятся некоторое количество лет, после чего разработка самой миссии полета к Альфе Центавра потребует бюджета крупнейшего на сегодня научного эксперимента. Итак, что же известно на данный момент от разработчиков проекта?

Проект **Breakthrough Starshot**, по словам авторов, — это попытка подойти к космическим путешествиям со стороны Кремниевой Долины. Он предполагает постройку массива лазеров в высокогорных районах Земли, и создание специальных нанокрафтов — массива космических фемтоспутников, которые разгоняются излучением этих лазеров.

Компоненты системы

Нанокрафты — это роботизированные космические корабли массой порядка граммов, состоящие из двух частей:

1) *Электронный модуль StarChip*: Закон Мура позволил значительно уменьшить в размерах электронные компоненты. Это позволяет создать граммовые устройства, несущие на себе камеры, фотонные подруливатели, питание, навигационное и коммуникационное оборудование, представляющие собой полностью функциональный космический зонд. При этом стоимость этих зондов при массовом производстве будет равна стоимости смартфона.

2). *Солнечный парус*. Достижения в области нанотехнологий позволили создавать невероятно тонкие и легкие метаматериалы. Это обещает возможность создания метровых парусов толщиной в сотни атомов и массой порядка граммов.

Лазерные излучатели

Последние годы рост мощности лазеров и падение их стоимости подчиняется закону Мура. Это позволяет создать специальные фазированные массивы лазеров (*«light beamers»*), мощностью до 100 гигаватт.

Всего проект *Breakthrough Starshot* потребует:

- постройки в высокогорных районах километрового массива лазерных излучателей;
- генерации и хранения нескольких гигаватт-час энергии для каждого запуска;

- запуска «материнского корабля», который выведет на высокую орбиту тысячи нанокрафтов;
- использования возможностей адаптивной оптики в реальном времени для компенсации атмосферных явлений;
- фокусировки луча света на световом парусе в течение нескольких минут для разгона нанокрафтов до необходимой скорости (20% от скорости света);
- учета влияния столкновений с межзвездной пылью в пути;
- захвата изображения планет, передачи другой научной информации на Землю с помощью бортовой лазерной коммуникационной системы;
- использования лазерных излучателей для получения данных с нанокрафтов более 4 лет спустя.

Некоторые из этих требований представляют собой значительные инженерные вызовы, которые предстоит решить команде проекта. Предлагаемая лазерная двигательная система по своим масштабам значительно превосходит все работающие сегодня аналоги. Сама суть проекта предполагает глобальную кооперацию и взаимодействие.

Технические особенности проекта

Концепт системы из нанокрафтов, лазерных излучателей и электронного модуля *StarChip* — это на сегодня самый правдоподобный и реалистичный способ запустить миссию к Альфе Центавра в нашем поколении. Ключевые элементы предлагаемой конструкции системы основаны на технологиях, которые уже имеются либо будут доступны в ближайшем будущем, при разумных предположениях.

Команда ученых-экспертов проекта не видит технически нереализуемых вещей. Но, как и при любом «полете на Луну», существуют инженерные вызовы, которые предстоит преодолеть.



Авторы проекта перечислили ([eng](#)) проблемы и особенности миссии:

Электронный модуль StarChip

4 фотонных двигателя малой тяги

Лазерные диоды мощностью 1 Ватт массой менее грамма широко доступны сегодня по очень низкой цене. Производственные тенденции таковы, что происходит удвоение мощности лазеров при той же массе каждые два года. Можно ожидать, что этот тренд сохранится еще некоторое время. Это поможет создать эффективные подруливатели для нанокрафтов.

4 камеры

Камеры на 2 мегапикселя массой менее грамма доступны по низкой цене. Их развитие также подчиняется закону Мура, позволяя удваивать количество пикселей для той же массы матрицы каждые два года.

Интересны также потенциальные возможности камер, работающих по принципу плоского массива Фурье-захвата (PFCA). Они не требуют зеркал, линз и других движущихся частей, состоят из массива полупроводниковых элементов, которые реагируют на свет в зависимости от его угла падения.

По объему PFCA могут быть в 100 тысяч раз меньше самой маленькой фокусной камеры. Впрочем, пока данная технология находится на старте своего пути.

Защитное покрытие

Специальное покрытие необходимо для защиты конструкции нанокрафтов от столкновения с частицами в межзвездном пространстве. Один из таких материалов — это бериллиево-медный сплав.

Батарея

Конструкция батареи представляет собой один из самых сложных технических вызовов проекта. В настоящее время в качестве основного источника энергии на борту рассматривается плутоний-238 или америций-241. На питание системы отведено 150 грамм. Сюда включена масса радиоизотопа и суперконденсатора, который будет заряжаться от ядерного распада.

Существуют также идеи воспользоваться нагревом фронтальной части поверхности нанокрафтов (из-за взаимодействия с межзвездной пылью). Тепловой источник может обеспечить подачу 6 мВт на каждый квадратный сантиметр своей площади во время крейсерской фазы миссии в межзвездном пространстве.

Сам световой парус, возможно, удастся покрыть тонкой пленкой из фотоэлектрического материала, как это было сделано в японской миссии солнечного паруса IKAROS. Это может оказаться очень полезным при приближении к другой звезде на расстоянии 2 астрономических единиц. На расстоянии 1 астрономической единицы подобный материал, даже обладая эффективностью всего 10%, будет способен обеспечить 2 кВт мощности. Это более чем в 100 тысяч раз превышает мощность радиоактивного источника энергии, и, вероятно, позволит достигнуть значительно более высоких скоростей передачи данных по лазерной связи.

Коммуникация

Ориентация передатчика на Землю

Поиск Земли — достаточно простая задача, учитывая ее близость к Солнцу — очень яркой звезде, если смотреть со стороны Альфы Центавра.

Из-за дифракционного предела, угловой диаметр луча длиной волны 1 микрон на антенне метрового класса составит около 0.1 угловой секунды. Ориентация такой точности может быть достигнута при использовании фотонных двигателей малой тяги.

Посылка изображений с помощью лазера, используя парус как антенну

Изображения целевых планет могут передаваться одноваттным лазером на борту, в импульсном режиме. При подходе к цели парус будет использоваться для фокусировки лазерного сигнала. Например, для паруса размером 4 м дифракционный предел размера пятна на Земле будет порядка 1000 м. Примерно такого же масштаба планируется делать принимающий массив антенн. Использование паруса в качестве оптической системы может потребовать разных форм паруса на старте миссии (при разгоне) и во время коммуникационной фазы. Для более эффективной передачи информации, при приближении к цели, парусу может быть придана форма линзы Френеля. Из-за доплеровского эффекта при сдвиге нанокрафтов относительно Земли, необходимо использование волн лазера короче, чем у системы запуска — это позволит поддерживать высокую скорость передачи через атмосферу нашей планеты.

Получение изображений с помощью массива лазерных излучателей

Недавние успехи группы MIL Lincoln Labs и Лаборатории Реактивного Движения [показали](#) возможность детектировать единичные фотоны, испускаемые лазером с очень больших расстояний. В настоящее время рекордсменом является система LADEE, которая способна работать на лунных расстояниях. Она использует методику криогенно охлажденных нанотрубок. Это позволяет передавать 2 бита на фотон. Система использует 10-см оптику на космическом корабле и однометровой телескоп на земле.

Массив лазерных излучателей, задействованный при разгоне нанокрафтов, будет использована в инверсном режиме, как массив принимающих антенн.

Солнечный парус

Целостность паруса под тягой

На этапе исследования предполагается использование в миссии 100-гигаваттного лазера. Как такое излучение повлияет на солнечный парус?

Самый совершенный отражающий материал на сегодня — это диэлектрическое зеркало — композитный материал с толщиной слоя подобранной под длину волны. Диэлектрическое зеркало способно снижать количество поглощаемого тепла на 5 порядков, отражая 99.999% излучения.

Для лазера 100 ГВт и паруса 4x4 м — это значит, что каждый квадратный метр паруса будет

нагреваться энергией в 60 кВт. Это очень много — около 50 электрических чайников на полной мощности. Такую мощность рассеять излучением трудно. Но, как утверждают разработчики, это нагреет парус, но не расплавит его. Предполагается, что, используя полностью диэлектрический парус с оптимизированными материалами, будет возможно снизить поглощение ниже 9 порядков от приходящего излучения.

Рассматриваются варианты использования новых материалов вроде графена. Возможно также использование материалов с низким поглощением, даже без высокой отражающей способности (например, стекло). Подобные материалы применяются в оптоволоконной оптике при высоких нагрузках.

Кроме защиты со стороны паруса, электроника модуля StarChip должна быть защищена от набегающего потока. Это может быть достигнуто сочетанием геометрии (ориентируя электронику «в профиль», с низким поперечным сечением) и покрытием самых важных компонентов специальной защитой. Такими покрытиями могут выступать упоминавшиеся многослойные диэлектрические решения, уже продемонстрированные в лабораториях. Слабо поглощающий материал паруса вместе с ограниченным использованием высокоотражающего материала для защиты электроники, будет защищать StarChip не превышая граммового масштаба массы модуля. Для дальнейшего производства изучается конструкция из кремниевых микрокубов на подложке из диоксида кремния.

Устройство

Необходимо разработать скелет паруса, который будет держать нагрузку при разгоне устройства, быть устойчивым к взаимодействию с межзвездной средой, и будет способен менять форму паруса. В данный момент рассматривается ряд композитных материалов на основе графена, которые способны менять свою длину в зависимости от электрического напряжения, приложенного к ним. Ранее было показано, что центробежное ускорение крошечных масс по краям может натягивать парус.

Удержание на луче

Форма луча и устройства светового паруса должны быть оптимизированы для стабильности на фазе запуска. В этот период порядка 10 минут, парус получает 1 тераджоуль световой энергии. По этой причине, даже мелкие различия свойств паруса или неоднородности луча, переместят центр давления с центра масс паруса, и сместят его вектор тяги.

Современная индустрия оптических покрытий при массовом производстве смартфонов и телескопной оптики уже находится на приемлемом для миссии уровне качества. Но конечный материал паруса пока не существует и должен быть разработан.

Лазерный излучатель

Стоимость

Оценка ориентировочной стоимости лазерного массива на Земле основана на экстраполяции двух последних десятилетий, а также на перспективах удешевления при массовом производстве.

Стоимость лазерных усилителей снижается

экспоненциально с 1990г. по 2015г., сокращаясь вдвое каждые полтора года. Если тренд продолжится, строительство большого излучателя в ближайшие десятилетия обойдется на несколько порядков дешевле. Пока разработчики сравнивают стоимость с крупнейшим научным проектом в мире. Это может быть, например, МКС (стоимостью \$157 млрд) или экспериментальный термоядерный реактор ITER (\$15 млрд).

Фаза

Для проверки возможностей системы был изучен случай с парусом метрового масштаба. Например, для фокусировки луча света на парусе 4x4м на расстоянии в 200 тысяч километров, требуется угол фокусировки в 2 нанорадиана (0.4 угловых миллисекунд). Это дифракционный предел для километрового лазерного излучателя, работающего на длине волны в 1 микрон. Интерферометрия для [Event Horizon Telescope](#) продемонстрировала возможность достижения суб-нанорадианной точности на длине волны 1 мм.

Атмосфера

Атмосфера вводит два эффекта:

- поглощение (нарушение целостности передачи);
- снижение качества луча (размывание луча).

Передающая способность атмосферы на длине волны 1 мкм очень хороша — более 90% для объектов, расположенных высоко в горах. При таком расположении установки это снизит размывание луча в атмосфере, что позволит адаптивной оптике максимально приблизиться к дифракционному пределу. Атмосферная турбулентность, которая размывает луч, примерно в 4 раза ниже на высоте 5 км, чем на уровне моря. Еще больше нивелировать действие атмосферы можно коррекцией режима работы лазерных излучателей с помощью маяка в космосе.

Проект Breakthrough Starshot хочет достичь дифракционного предела для оптических лазерных систем в 0.2-1 км. Это на 1-2 порядка лучше существующих решений, однако нет никаких фундаментальных ограничений в достижении этой цели.

Запуск

Точность наведения на метровый парус

Лазерный излучатель должен фокусироваться в пятно на парусе меньше, чем размер самого паруса на орбите 60 000 км над землей. Наведение лазера должно быть согласовано с положением звездной системы Альфы Центавра так, чтобы пролет системы проходил в пределах двух астрономических единиц. Использование фотонных двигателей малой тяги позволит корректировать курс на 1-2 астрономических единицы.

В задаче позиционирования луча основной является проблема удержания паруса на луче. Это зависит от размеров паруса и расстояния до него. Для метрового паруса рабочее расстояние для запуска может достигать нескольких миллионов километров. Точность прицеливания, необходимая на такой дистанции, составляет несколько угловых миллисекунд. Существует несколько способов решения этой проблемы.

Модель атмосферы калибруют с помощью радара, лазерного луча и оптических измерений в

реальном времени. Это позволит достичь необходимой точности позиционирования.

Большинство земных телескопов (например, телескоп Кека) имеют точность порядка нескольких угловых секунд и ограничено могут отслеживать объекты в режиме 100 угловых миллисекунд. Для целей миссии необходимо значительное улучшение точности. Тем не менее, генерация лазерного луча системой с фазированной решеткой, с системой отслеживания сигнала маяка (для коррекции влияния атмосферы) космического аппарата может позволить достичь необходимой точности.

Удержание на паруса на луче

Существует ряд эффектов, которые делают эту задачу сложной. Это нестабильность луча, режимы работы лазера, силы, действующие на парус, нагревание паруса, неоднородности атмосферы, вызванные энергией излучателей.

Вышеописанные проблемы можно решать вращением паруса и регуляция формы как паруса, так и пучка лучей, приходящих на него. Обратная связь поможет работе лазерных излучателей, но короткое время полета требует самостоятельной стабилизации системы.

Один из перспективных подходов заключается в том, чтобы придавать парусу специальную форму, стабилизирующую его положение на луче. Т.е. при вращении на парус будут воздействовать такие крутящие моменты и силы, которые будут стремиться восстановить его ориентацию. Высокочастотная дрожь снизит общее количество передаваемой парусу энергии, но хорошая динамика паруса может снизить его восприимчивость к помехам, выше определенной частоты.

Поскольку для формирования луча будет использоваться массив с фазированной решеткой, профиль пучка может иметь такую форму, чтобы максимизировать способность паруса сохранять свою собственную позицию на луче, даже без механизма обратной связи.

Производство и хранение энергии

Производство и хранение энергии является технологическим вызовом. Генерация 100 ГВт мощности и доставка ее в течение нескольких минут вполне достижимо на современном уровне технологий. Электростанции на природном газе могут генерировать энергию по цене \$0.1 за киловатт-час. В настоящее время так же доступны батареи и суперконденсаторы, которые способны обеспечить необходимую емкость хранения по разумной цене.

Точное определение орбитальной позиции экзопланеты

Для того, чтобы доставить нанокрафт к экзопланете с точностью до 1 астрономической единицы, может потребоваться точный учет всех массивных тел вблизи траектории полета. Часть информации может быть собрана первыми миссиями проекта и учтена в последующих запусках. Также принимаются усилия для лучшего понимания эфемерид — орбитальных позиции крупных объектов в конкретные моменты времени, способных повлиять на траекторию движения. Это включает в себя сотрудничество с крупнейшими телескопами в южном полушарии, включая Very Large Telescopes и Gemini.

Крейсерский этап

Межзвездная пыль

Основываясь на оценках плотности пыли в ближайшей к нам межзвездной среде, за время путешествия к Альфе Центавра каждый квадратный сантиметр фронтальной площади поперечного сечения электронного модуля StarChip и светового паруса, столкнется примерно с 1000 пылевых частиц размером от 100 нанометров и выше. Тем не менее, вероятность столкновения с частицей в 1 микрометр за все время полета, составляет около 10%. А вероятность встретить более крупные частицы — незначительна.

Пылевая частица размером 100 нанометров, двигающаяся на скорость в 20% от скорости света, проникнет в электронный модуль на глубину порядка 0.4мм. Для оценки эффекта, приведены расчеты для модуля, размерами 10см x 0.1мм. Площадь поперечного сечения такого модуля составляет 0.1 см². Защитное покрытие из бериллиевой бронзы, нанесенное на переднюю часть такого модуля, может обеспечить его защиту от воздействия пыли и эрозии. При необходимости, геометрия StarChip может быть изменена (например, в форме «иглы») для дальнейшего уменьшения площади поперечного сечения. Сам парус, для минимизации повреждений, может быть свернут в более обтекаемую конфигурацию во время крейсерской фазы полета. Импульс от удара частицы размером 100 нм сравнительно мал и может быть компенсирован фотонными подривателями.

Влияние межпланетной пыли внутри солнечной системы незначительно по сравнению с межзвездной пылью. О наличии пыли в системе Альфы Центавра известно мало.

Межзвездная среда и космические лучи

Средняя длина свободного пробега и ларморовский радиус частиц межзвездной плазмы намного больше, чем размер нанокрафта. Это означает, что такие частицы будут влиять на стенки независимо друг от друга, не образуя ударный шок.

Протоны из межзвездной плазмы на скорости 20% от скорости света, будут воздействовать на нанокрафт с кинетическими энергиями 18 МэВ, а электроны будут иметь энергию 10.2 кэВ. При этом не имеет значения, объединены ли протон и электрон в атом водорода, или прилетают по отдельности. Будет происходить эрозия поверхности нанокрафта из-за распыления. Количество распыленных таким образом атомов будет составлять порядка 1000 на см². Полная потеря массы передней поверхности устройства составит лишь несколько слоев.

Протоны на энергии 18 МэВ будут проникать на глубину порядка нескольких миллиметров. Поэтому будет необходим защитный слой, способный остановить такие частицы, чтобы избежать повреждения электроники.

Космические лучи гораздо менее редки, чем межзвездные протоны, а значит могут быть проигнорированы. Столкновения с более тяжелыми элементами должны быть смягчены защитным покрытием: ядра гелия имеют энергии порядка 72 МэВ

и их количество составляет около 10% от количества свободных протонов. Ядра элементов углерода, азота и кислорода несут энергии в 200-300 МэВ и присутствуют в количестве 0.01% от общего количества.

Для разработки технологий защиты необходимо проведение лабораторных экспериментов для ионов, движущихся со скоростью 20% от скорости света и сталкивающихся с твердым телом.

Столкновения с межзвездными ионами и электронами теоретически может иметь свои преимущества: они могли бы придать нанокraftу потенциал до 10 кВ (кинетическая энергия на электрон). Фронтальная поверхность нанокraftов будет нагреваться со скоростью 6 мВт на см², что даст небольшой термоэлектрический источник энергии при путешествии в межзвездной среде.

<https://habr.com/ru/post/372165/>

Владислав Иванович Пустовойт

15.11.1936 – 05.07.2021

На 85-м году жизни 5 июля 2021 г. скончался российский ученый, специалист в области акустоэлектроники, акустооптики, физики полупроводников, оптоэлектроники, лауреат Государственных премий СССР и РФ, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН **Владислав Иванович Пустовойт**.



Владислав Иванович Пустовойт родился 15 ноября 1936 года в городе Бердянске Днепропетровской области, Укр. ССР. В 1959 г. окончил Днепропетровский государственный университет, в 1963 г. – аспирантуру Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР. В 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему: «К теории усиления низкочастотных волн в полупроводниках и плотной плазме при наличии дрейфа», в 1972 г. – докторскую диссертацию на тему: «Теория распространения, усиления и генерации акустических волн в полупроводниках». В 1973 г. ему было присвоено звание профессора. В 1990 г. В.И.Пустовойт был избран членом-корреспондентом РАН по Отделению информационных технологий и вычислительных систем РАН (специальность «научное приборостроение»), в 2006 г. стал действительным членом РАН по Отделению информационных технологий и вычислительных систем РАН (специальность «научное приборостроение»).

В. И. Пустовойт — признанный специалист в области физики твердого тела, акустоэлектроники и акустооптики. Им совместно с академиком Ю. В. Гуляевым впервые была выдвинута идея использования поверхностных акустических волн в электронике, что явилось базовой идеей акустоэлектроники и как раздела физики твердого тела, и как подотрасли промышленности. Фундаментальные исследования В. И. Пустовойта и его школы (взаимодействие световых волн с акустическими волнами в кристаллах) привели к разработке и созданию целого семейства спектрометров ИК-, видимого и УФ диапазонов с уникальными техническими характеристиками. Ученым впервые была предложена идея о

возможности использования интерферометра Майкельсона для обнаружения гравитационных волн. Эта физическая идея положена в основу уникальных проектов (в США (LIGO), Японии (TAMA), Франции, Италии (VIRGO), Германии и Великобритании (GEO600)).

В. И. Пустовойт был научным руководителем Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, членом Бюро Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук, председателем диссертационного совета Д 002.135.01 при НТЦ УП РАН, главным редактором журнала «Физические основы приборостроения», заместителем главного редактора журнала «Радиотехника и электроника», членом редколлегий журналов «Успехи современной радиоэлектроники», «Электромагнитные волны и электронные системы», членом экспертного совета ВАК России, членом Научного совета РАН по акустике, членом научного совета по проблеме «Развитие приборной базы научных организаций и учебных заведений» Федерального агентства по науке и инновациям, членом научного совета по программе «Исследование природы Мирового океана», членом бюро Научного совета РАН по научному приборостроению.

Автор и соавтор более 450 научных работ, авторских свидетельств и патентов. Автор книги «Избранные труды» в серии «Памятники отечественной науки. XX век». Им подготовлено 9 докторов и 27 кандидатов наук.

Владислав Иванович Пустовойт – дважды лауреат Государственных премий СССР (1974, 1984 гг.) и трижды лауреат Государственных премий Российской Федерации (1993, 2006, 2018 гг.).

Академик В.И.Пустовойт в течение многих лет руководил организацией-коллективным членом Лазерной ассоциации и принимал активное участие во многих проектах ЛАС.

Выражаем глубокие соболезнования семье, родным и близким Владислава Ивановича.

*Сотрудники НИЦ УП РАН, коллеги и ученики
Президент и НТС ЛАС, редакция «Лазер-Информ»*

Первооткрыватель гравитационных волн Владислав Пустовойт

Он подсказал способ, как измерить Большой взрыв, тот самый, что породил Вселенную

Физики *Владислав Пустовойт* и *Михаил Герценштейн* в далеком 1962 году придумали метод измерения гравитационных волн, которые были предсказаны теорией относительности Эйнштейна, но на тот момент оставались неуловимыми. То есть как физик *Пустовойт* понимал, что эти волны должны быть. Но как их зафиксировать? И вышла научная статья, где подробно было рассказано – нужно устройство из лазерных излучателей: интерферометр Майкельсона. Выкачать воздух и спрятать от света.

«*Определять ничтожно малые перемещения. Только для этого что нужно? Нужен когерентный источник! Но 62-й год? Где взять такой источник? Еще не понимали, что значит слово «лазер». Нужно брать лазер как источник когерентного излучения. И тогда можно было на что-то надеяться*», – рассказывал *Пустовойт*. И сразу было понятно, что такое измерительное устройство будет фантастически дорогим, но невероятно важным для науки.

«*Важно, что он в 26 лет это придумал!* – подчеркивает заместитель директора по научной работе и связям с органами государственной власти Курчатовского института *Олег Нарайкин*. – *Я уж не говорю о том, что все наши мобильные телефоны созданы на теории, которую Владислав Иванович вместе с Юрием Васильевичем Гуляевым создали*».

«*Он предположил новые связанные гравитационные волны. Это позволило решить много теоретических проблем*», – говорит заведующий кафедрой «Физика» МГТУ имени Н.Э.Баумана, член-корреспондент РАН *Александр Морозов*.

О гравитационных волнах обычно рассказывают, используя размеченную ткань и шары – похоже влияет движение гигантских тел на пространство-время. Слияние нейтронных звезд или двух черных дыр дают ту самую энергию гравитационной волны, которая без преград передается по всей Вселенной со скоростью света. Нужно лишь волну прочитать, а это микроскопические изменения в излучении интерферометра.

Процесс детально был описан *Пустовойтом*



и *Герценштейном* в 1962 году. Но Нобелевскую премию за фиксацию гравитационных волн получили в 2017-м ученые *Торн, Бэриш и Вайсс*, создававшие детектор LIGO. По мнению президента РАН *Александра Сергеева*, именно *Пустовойт* должен был оказаться в списке нобелевских лауреатов 2017 года за сенсационное открытие гравитационных волн. Когда в 2019 году наш ученый за это открытие был удостоен Государственной премии РФ, нобелевский лауреат *Кип Торн* прислал письмо с поздравлением. Он, в частности, писал: «Ваша работа 1962 года была прародителем этого направления, к которому *Вайсс* пришел спустя много лет».

На вручении Госпремии академик *Пустовойт* рассказывал *Владимиру Путину*, как гравитационные поля можно применить для систем навигации, что позволит вообще отказаться от орбитальных спутников. Кстати, эта премия была уже пятой для этого ученого.

«*Нужно искать искусственные методы возбуждения гравитационных волн. Возбуждения и приема. И вот если это удастся сделать в ближайшие 50 лет – то это, действительно, будет революция*», – говорил *Пустовойт*.

Он всегда надеялся, что этот интерферометр будет построен и у нас как передовое в науке устройство, сравнимое с коллайдером или термоядерным реактором. Он приближал науку к той самой революции в физике, которой еще только предстоит случиться.

По материалам

<https://www.vesti.ru/nauka/article/2584818>

«Лазер-Информ»

Издание зарегистрировано в межведомственной комиссии МГСНД 26.12.91. Рег. № 281
© Лазерная ассоциация.
Перепечатка материалов и их использование в любой форме возможны только с разрешения редакции.

Отпечатано в НТИУЦ ЛАС
Тираж 500 экз.

Главный редактор
И.Б.Ковш
Редактор Т.А.Микаэлян
Ред.-издательская группа:
Т.Н.Васильева
Е.Н.Макеева

Наш адрес:

117342, Москва, ул. Введенского, д.3, ЛАС
Тел: (495)333-0022 Факс: (495)334-4780
E-mail: info@cislaser.com
http://www.cislaser.com
Банковские реквизиты ЛАС:
р/с 40703810538000006886
В ПАО «Сбербанк» г.Москва
к/с 3010181040000000225
БИК 044525225