



КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова является лидером в России в области развития технологий квантовой оптики, создания электронной компонентной базы для квантовых компьютеров, защищённых систем квантовой связи и криптографии – как через волоконно-оптические, так через атмосферные каналы.

В декабре 2019 года Московский университет был признан победителем в конкурсном отборе "сквозных технологий" в направлении "Квантовые технологии". В итоге, решением конкурсной комиссии, МГУ им. М.В.Ломоносова стал получателем гранта на государственную поддержку центров компетенций Национальной технологической инициативы. В целях выполнения комплексного проекта по сквозной технологии «Квантовые технологии» и коммерциализации его результатов на физическом факультете был создан Центр квантовых технологий МГУ (<https://quantum.msu.ru/ru>).

Следует отметить, что для развития квантовых технологий Московский университет и, особенно, физический факультет, является уникальным местом – здесь создано и успешно работает несколько широко известных в мире научных школ, обеспечивающих весомый задел МГУ в фундаментальных, образовательных и прикладных аспектах. Это школы квантовой оптики (Д.Н.Клышко), квантовых измерений (В.Б.Брагинский), взаимодействия излучения с веществом (Л.В.Келдыш) и квантовой одноэлектроники



(К.К.Лихарев). В настоящее время функционирует научно-образовательная школа «Фотонные и квантовые технологии, цифровая медицина» – одна из семи в Московском Университете, – в рамках которой ведутся исследования и разработки по квантовым технологиям.

Помимо фундаментальных исследований в Центре ведутся разработки по всем направлениям современных квантовых технологий – коммуникациям, вычислениям и сенсорам.

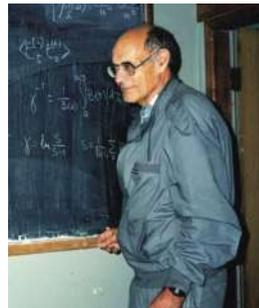
Большое внимание уделяется подготовке квалифицированных кадров и освоению практических навыков работы с современной измерительной аппаратурой: разработаны магистерские программы, программы повышения квалификации, дистанционные курсы, а также уникальный практикум, работающий в очном и в дистанционном формате.

Жизнь Центра строится в соответствии с Программой – комплексным документом, утвержденным ректором МГУ. Программа ориентирована на 4 года и обеспечивается финансированием из госбюджета (около 1 млрд.руб.) и привлеченных средств (около 1 млрд. руб.).

Утвержден документ, определяющий дальнейшую судьбу Центра – Стратегия его развития.



Л.В.Келдыш



Д.Н.Клышко



К.К.Лихарев



В.Б.Брагинский

Деятельность Центра тесно связана с **Консорциумом** – кооперацией научно-образовательных и коммерческих организаций, реализующих Программу. География Консорциума обширна – в него входят организации из Санкт-Петербурга, Новосибирска, Казани, Пензы, Саратова, Черногловки, Томска и Троицка. В состав Консорциума, кроме лидера – МГУ, входит 24 организации, в том числе:

семь ведущих вузов России:

- Санкт-Петербургский государственный университет;
- МГТУ имени Н.Э.Баумана;
- Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ;
- Национальный исследовательский университет МИЭТ;
- Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР);
- Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского;
- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

пять институтов РАН:

- Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»;
- Институт физики полупроводников имени А.В.Ржанова СО РАН;

- Институт физики твердого тела РАН;
- Физико-технологический институт РАН;
- Институт общей физики имени А.М.Прохорова РАН;

шесть коммерческих компаний – индустриальных партнеров Центра:

- ОАО "ИнфоТеКС";
- НТП "Криптософт";
- НПК «Авеста-Проект»;
- Издательский дом «Электроника»;
- Учебный центр "ИнфоТеКС";
- АО «ЮЛ-ком Медиа»;
- ООО «ЕТМ Фотоника».

некоммерческие организации:

- Иннопрактика;
- «Кванториум» г. Саратов;

представители двух государственных корпораций:

- ВНИИА имени Н.Л.Духова (Росатом);
- концерн "Автоматика" (Ростех);

общественная организация:

- Ассоциация защиты информации.

В настоящем каталоге представлены наиболее зрелые и перспективные продукты и технологии, созданные в ЦКТ. Это постоянно обновляющееся издание, которое учитывает текущий статус этих продуктов, включающий основные параметры и уровень технологической готовности.

Квантовые коммуникации

ViPNet Quandor

1

ViPNet Quantum Security System

2

Детектор одиночных фотонов

3

Квантовый генератор случайных чисел

4

Квантовые вычисления

Квантовый симулятор на основе одиночных нейтральных атомов

5

Линейно-оптический квантовый симулятор

6

Многоканальные перепрограммируемые оптические преобразователи

7

Полупроводниковые квантовые устройства

Одноатомный одноэлектронный транзистор

8

Интегральные нанопотонные устройства

Однофотонные источники света на чипе

9

Подготовка кадров

Научно-образовательный практикум по квантовой оптике и квантовой информатике

10

Курсы повышения квалификации

11



ViPNet Quantum Security System

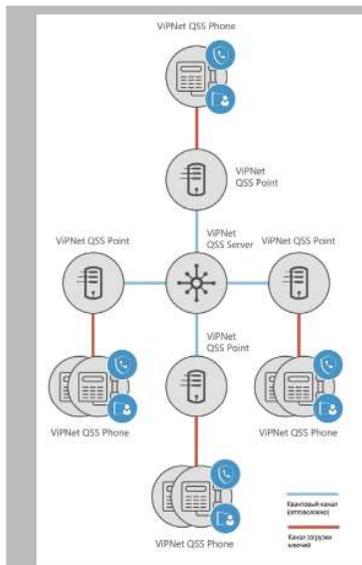
Оборудование квантового распределения ключей (КРК), сопряженное с ПО ViPNet Client и Connect на телефонах абонентов. Совместная разработка МГУ имени М.В.Ломоносова и ИнфоТеКС.

Сеть с квантовым распределением ключей (КРК) является расширением классической сети ViPNet. Она представляет собой виртуальную защищенную сеть, которая может быть развернута поверх локальных или глобальных сетей любой структуры. Однако, в отличие от стандартной ViPNet сети, в сети КРК для шифрования трафика используются не только симметричные ключи, которые создаются и распределяются централизованно, но и квантово-защищенные ключи обмена, выработанные узлами сети КРК.

Оборудование используется в составе Университетской Квантовой Сети.

Потенциальные потребители

- Крупные государственные и коммерческие корпорации
- Силовые структуры



- Расстояние СКРК-ККРК до 25 км 3 уровня оптической коммутации с резервированием каналов; 11 дБ затухания. При двух уровнях – 30 км, при одном – 44 км.
- До 800 Клиентов КРК 1 Клиент – N Абонентов (в пределах КЗ)
- ViPNet QSS Server и ViPNet QSS Point – КСЗ (КВ)
- ViPNet QSS Phone (Android) – КС1

Функциональная схема ViPNet Quantum Security System

QSS ViPNet Server и QSS ViPNet Phone

В систему входят три продукта, являющиеся СКЗИ:

- ViPNet QSS Server (Сервер КРК/СКРК) – ПАК, соответствующий требованиям ФСБ РФ к СКЗИ класса КСЗ. Совместно с клиентом КРК обеспечивает генерацию общего секретного квантового ключа (КК) на двух концах оптического канала.
- ViPNet QSS Point (Клиент КРК/ККРК) – ПАК, соответствующий требованиям ФСБ РФ к СКЗИ класса КСЗ. Совместно с СКРК обеспечивает генерацию общего секретного КК на двух концах оптического канала, а также генерирует квантово-защищенные ключи обмена для абонентов (КЗКО).
- ViPNet QSS Phone (Абонент КРК/АКРК) – ПАК, соответствующий требованиям ФСБ РФ к СКЗИ класса КС1-КСЗ. Выполняет роль абонентского пункта сети КРК, обеспечивает защищенную связь между конечными пользователями на КЗКО

Преимущества перед аналогами

- Интеграция с существующими сетями ViPNet VPN
- Симметричное шифрование данных, устойчивое к атакам с использованием квантового компьютера
- Защита от компрометации сети администратором
- Автоматическая смена ключей без участия человека.

Интеллектуальная собственность

Поданы заявки на патенты РФ



TRL-8

Имеются опытные образцы

infotecs®



ViPNet Quandor

Комплекс квантово-криптографической аппаратуры защиты информации, состоящий из 10G шифратора канального уровня (L2) и оборудования квантового распределения ключей (КРК). Совместная разработка ЦКТ МГУ имени М.В.Ломоносова и ИнфоТеКС.

Комплекс предназначен для передачи информации через сеть связи общего пользования информации и криптографической защиты этой информации. Защищаемая информация передается от источника к приемнику, находящихся за пределами комплекса в доверенных сетях передачи.

- Устойчивая работа на линии до 100 км (длина квантового канала с затуханием 20 дБ)
- Обновление ключей ~1 раз/мин при максимальном затухании в квантовом канале
- Шифрование данных со скоростью 10 Гбит/с в режиме симплекса; в режиме дуплекса – 20 Гбит/с
- Задержки не более 15 мкс



Базовый сценарий использования ViPNet Quandor – автоматическая доверенная доставка криптографических ключей для канальных шифраторов ViPNet L2-10G.



ViPNet Quandor в составе комплекса квантовой криптографической аппаратуры защиты информации собранного в мобильных кофрах для демонстраций и опытных эксплуатаций на сетях заказчика

Потенциальные потребители

- Крупные провайдеры связи,
- крупные организации – представители банковской сферы



TRL-8

Имеются опытные образцы

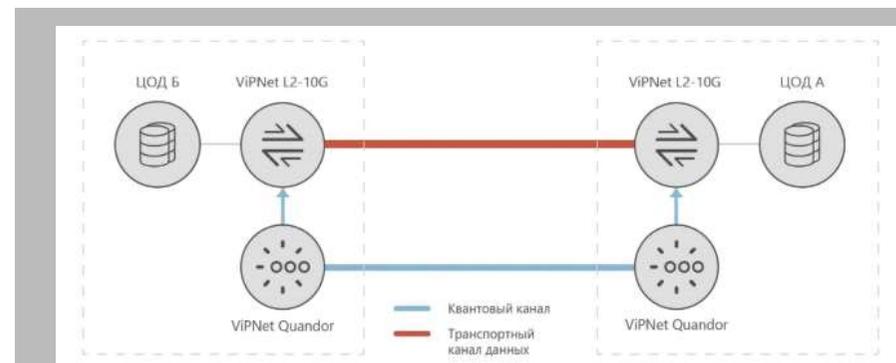


Схема базового сценария использования ViPNet Quandor

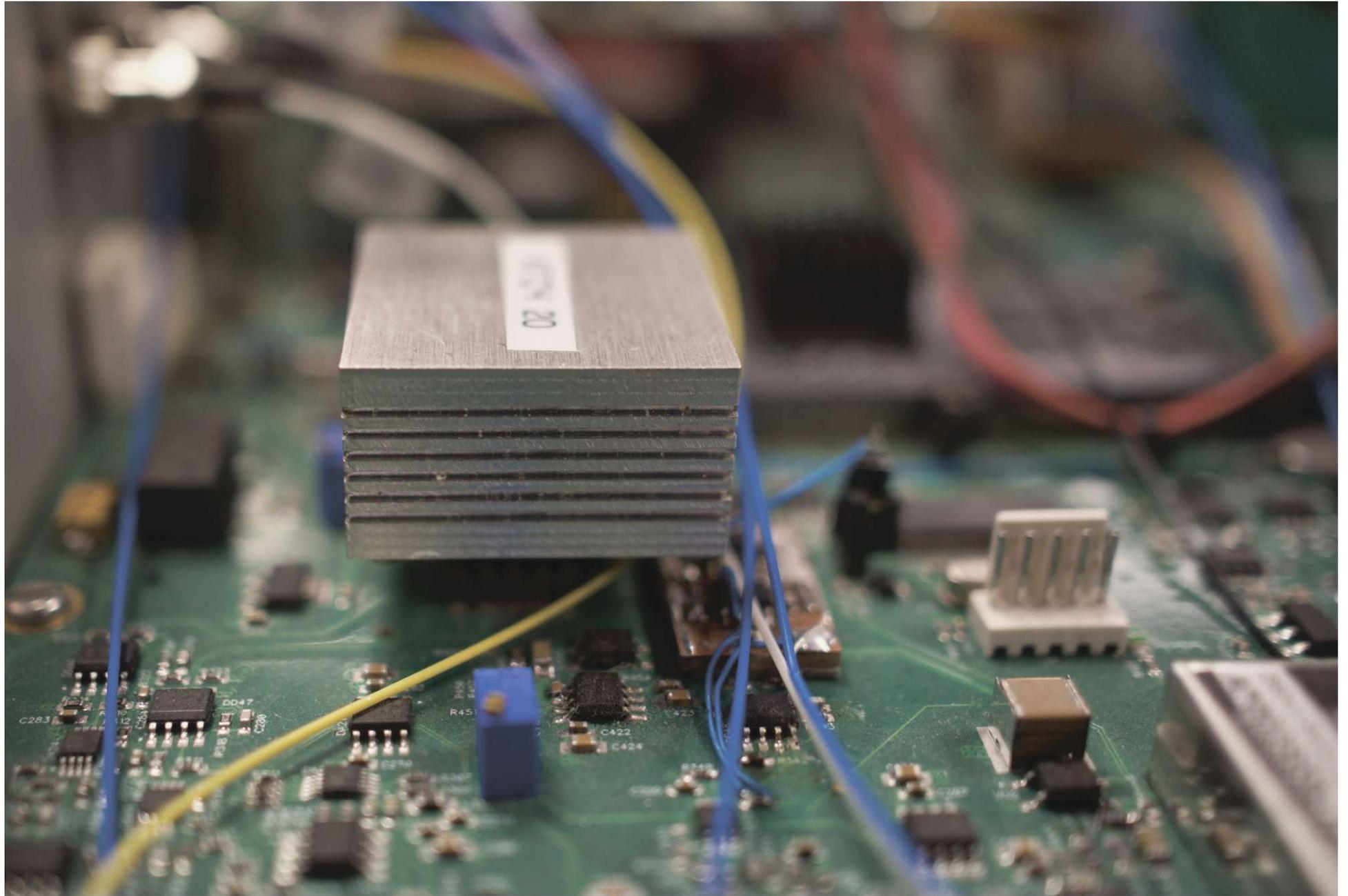
Для организации транспортного канала данных (ТКД) с использованием квантовых ключей необходимо наличие двух сопряженных составных частей оборудования квантового распределения ключей: сервера ViPNet Quandor Rx и клиента ViPNet Quandor Tx, а также двух квантово-криптографических шифраторов ViPNet L2Q-10G. При этом на одной стороне располагается один шифратор и сервер КРК, а на другой стороне – другой шифратор и клиент КРК. Два шифратора соединяются транспортным каналом, а сервер и клиент – каналом квантовой связи. Составные части ViPNet Quandor и ViPNet L2Q-10G на каждой из сторон ТКД связаны друг с другом служебным каналом, который позволяет шифратору получать квантовые ключи и осуществлять операции по запросу ViPNet Quandor.

Преимущества перед аналогами

- Расстояние СКРК-КРК до 100 км
- Скорость шифрования и имитозащиты 20 Гбит/с дуплекс
- Задержка не более 15 мкс
- Воздушное охлаждение
- Гибридная ключевая система на квантовых и предраспределённых ключах
- Скорость генерации КК – 1 ключ/мин.
- ФДСЧ на квантовых эффектах
- СКЗИ класса КСЗ

infotecs®

2

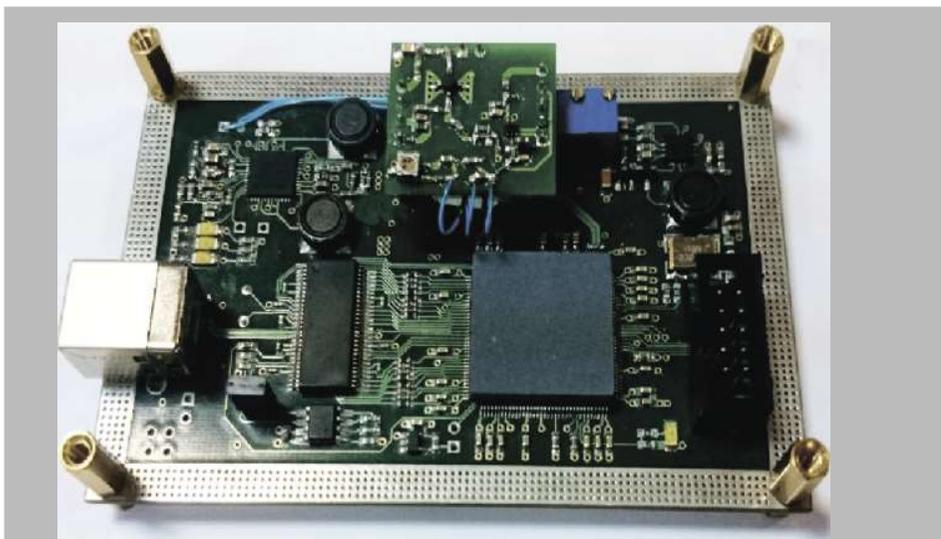


Квантовый генератор случайных чисел

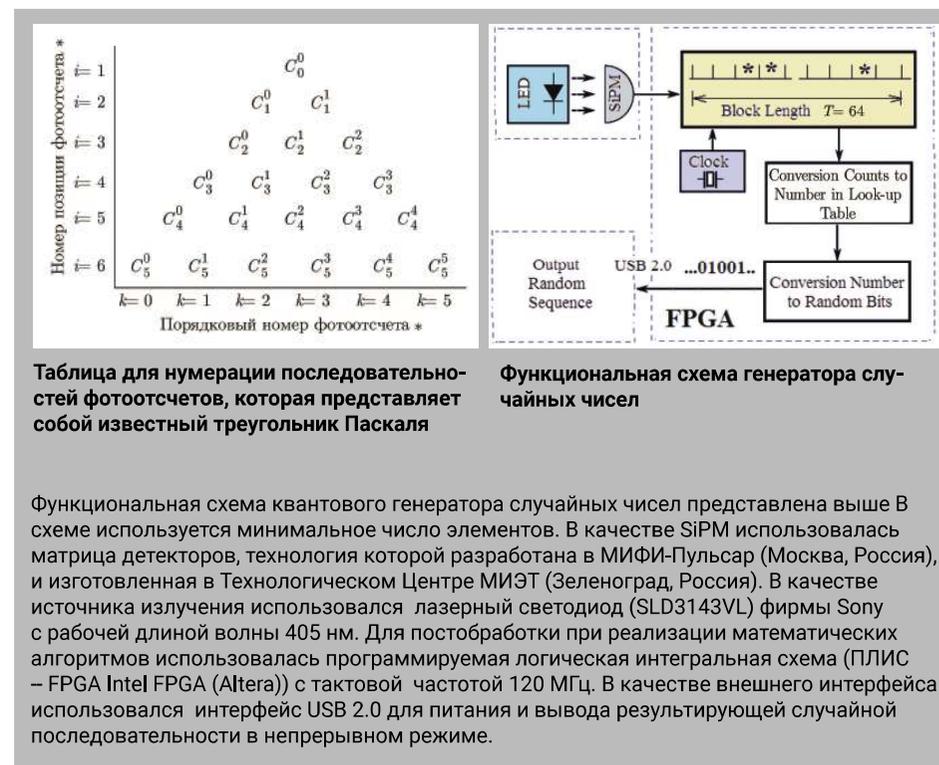
Экспериментальная реализация квантового генератора случайных чисел, основанного на пуассоновской статистике фотоотсчетов. Первичным источником случайности являются последовательности фотоотсчетов от квази-однофотонного излучения, которое регистрируется матрицей кремниевых лавинных детекторов – SiPM (Silicon Photo Multiplier). Использование SiPM позволяет надежно контролировать квантовый характер пуассоновской статистики фототсчетов. Специальный алгоритм неэкспоненциальной сложности позволяет извлекать из пуассоновского процесса всю случайность, содержащуюся в нем, а именно, случайную равномерную последовательность 0 и 1.

Потенциальные потребители

Корпоративные защищенные сети крупных коммерческих и государственных структур.



Внешний вид генератора



Функциональная схема квантового генератора случайных чисел представлена выше. В схеме используется минимальное число элементов. В качестве SiPM использовалась матрица детекторов, технология которой разработана в МИФИ-Пульсар (Москва, Россия), и изготовленная в Технологическом Центре МИЭТ (Зеленоград, Россия). В качестве источника излучения использовался лазерный светодиод (SLD3143VL) фирмы Sony с рабочей длиной волны 405 нм. Для постобработки при реализации математических алгоритмов использовалась программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС – FPGA Intel FPGA (Altera) с тактовой частотой 120 МГц. В качестве внешнего интерфейса использовался интерфейс USB 2.0 для питания и вывода результирующей случайной последовательности в непрерывном режиме.

Преимущества перед аналогами

Предлагаемая технология, в отличие от других реализация квантовых генераторов случайных чисел, допускает масштабирование, а также имеет доказуемую случайность выходной последовательности.

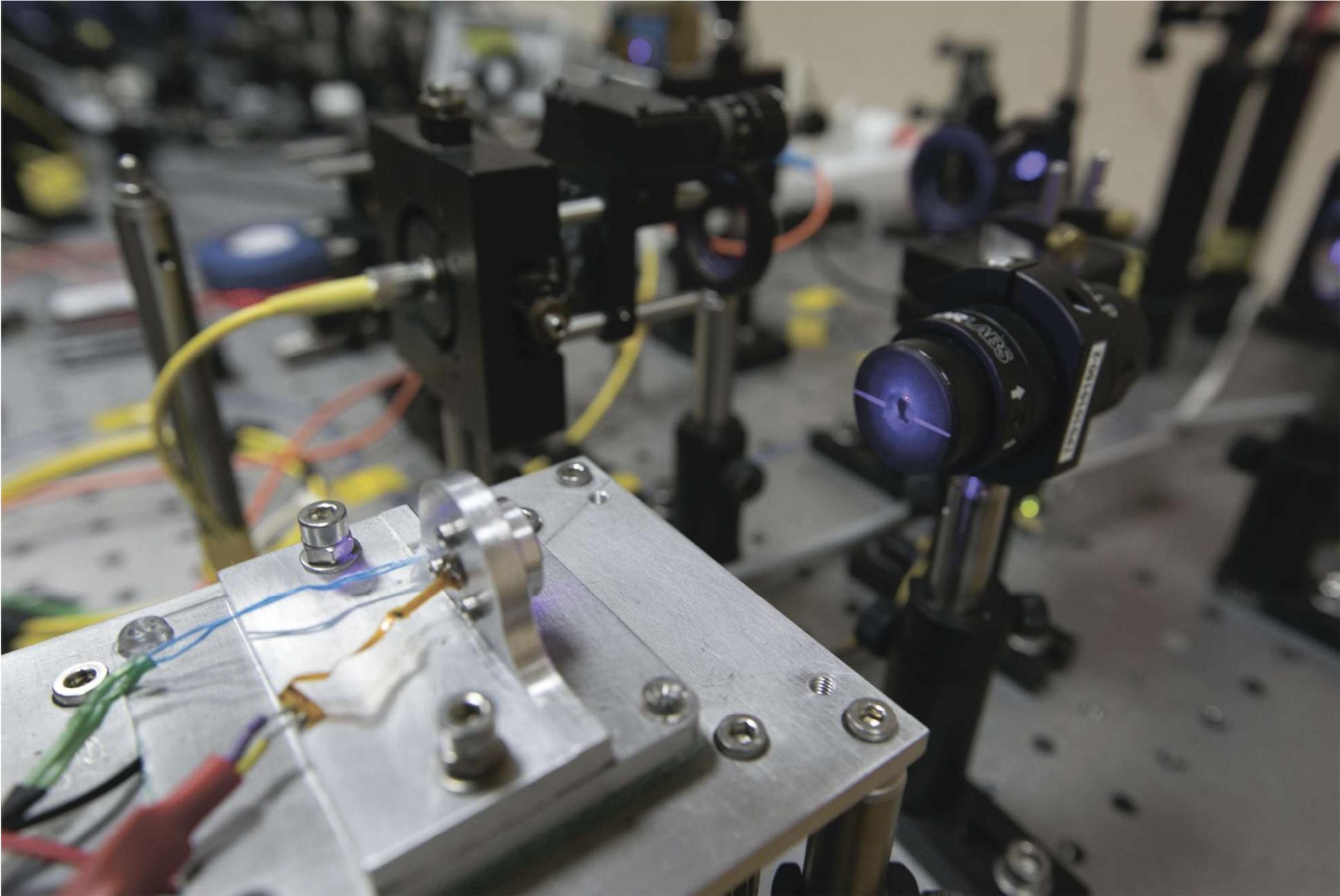
Интеллектуальная собственность

Квантовый генератор случайных чисел - RU 2662641



Имеются опытные образцы

TRL-8



Детекторы одиночных фотонов (проект «Лавина»)

Детектор одиночных фотонов на основе планарных лавинных фотодиодов (ОЛФД) на гетероструктурах InGaAs/InP для систем однофотонной квантовой связи. Устройства предназначены для работы в линейном и однофотонном "гейгеровском" режиме для применения в оптоволоконных системах однофотонной квантовой связи. Также их можно использовать для прецизионных измерений.

Ключевая особенность разрабатываемого детектора - температура работы. Устройство работает при температуре порядка 220-250 К (порядка -50...-20 град. Цельсия).

Разработка ведется совместно со специалистами Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова (ИФП СО РАН) на основе базовой технологии, предложенной и апробированной в ИФП.

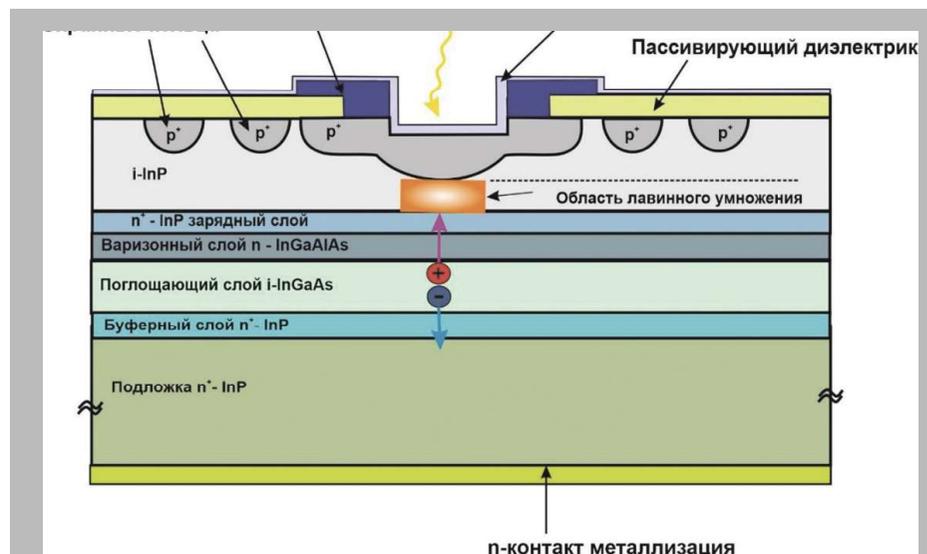
Оптимизация технологии получения методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) гетероструктур InGaAs/InP для реализации разработанной конструкции: состав и толщина переходного варизонного слоя, температура роста функциональных слоев. Оптимизация технологических процессов формирования функциональных слоев ОЛФД: создание омического контакта к р+ области, оптимизация просветляющего покрытия, разделения на чипы.

Потенциальные потребители

Для использования в оптоволоконных системах однофотонной квантовой связи с использованием российской элементной базы.

Преимущества перед аналогами

- Отечественная разработка
- Возможно использование в компактных приемных устройствах



Поперечное сечение реализуемой конструкции однофотонного лавинного фотодиода.

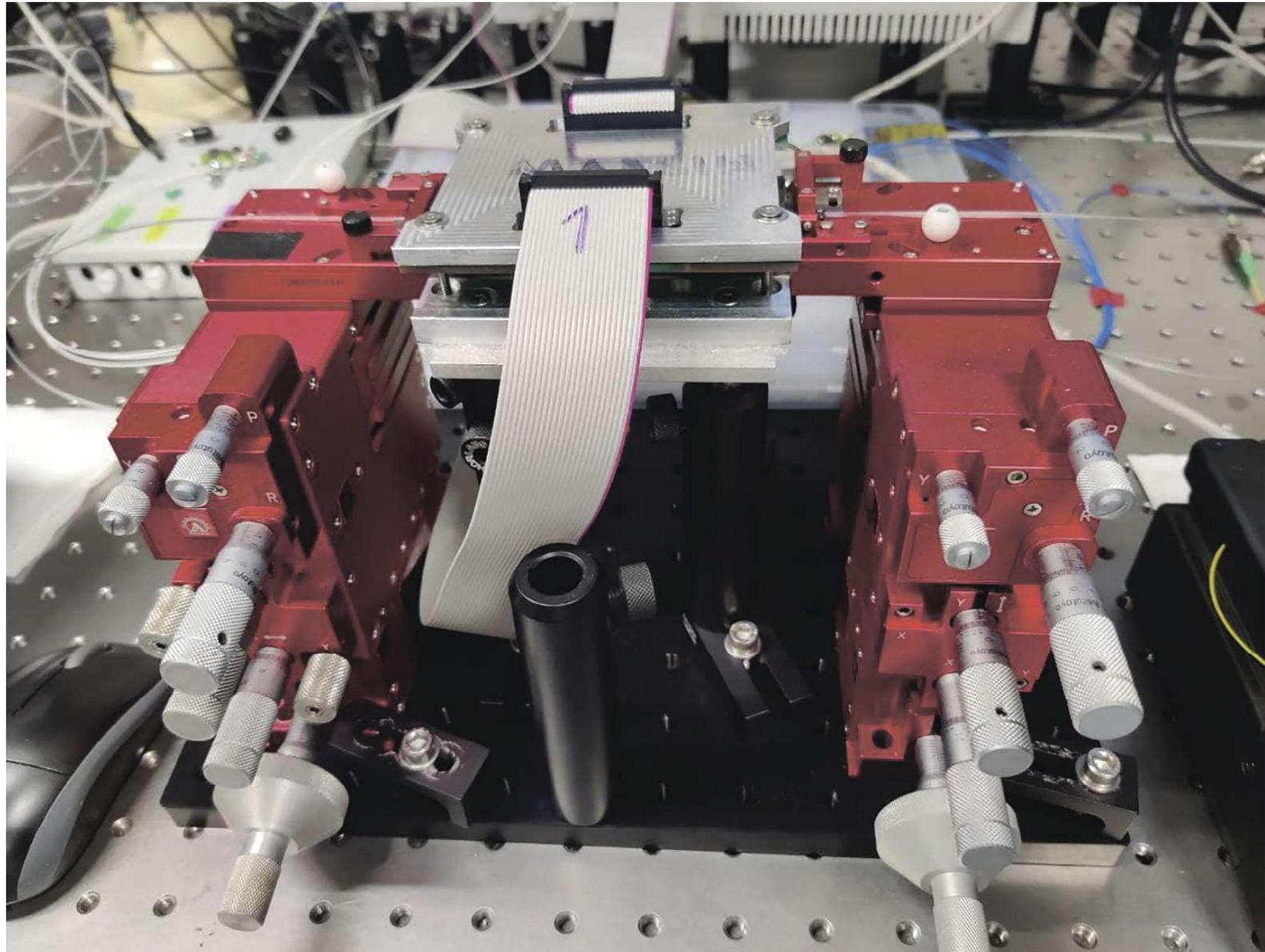
- Диаметр фоточувствительной области: 20-40 мкм
- Рабочий диапазон длин волн чувствительности: 1,3-1,55 мкм.
- Рабочая температура 220-250 К.
- Обратное напряжение пробоя: не более 80 В.
- Величина темнового тока при 90% величине пробивного напряжения и рабочей температуре: не более 10-10 А.
- Частота темновых импульсов в гейгеровском режиме при рабочей температуре менее 30 кГц.
- Вероятность регистрации одиночного фотона в гейгеровском режиме: 10-20%.

Исследования			Прототип			Серия		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эксперимент								

TRL-8

Имеются опытные образцы





Многоканальные перепрограммируемые оптические преобразователи

Многоканальные перепрограммируемые интерферометры находят применения в новых подходах к обработке информации, как классической, так и квантовой. До недавнего времени, перепрограммируемые интерферометры создавались с использованием архитектур (способов объединения элементарных блоков друг с другом), которые чувствительны к ошибкам, возникающим на этапе их изготовления. Предлагаемая технология решает эту проблему за счёт использования двух новых архитектур интерферометров, которые отличаются типом элементарных блоков и способом их соединения друг с другом в многоканальную схему. В отличие от известных до этого методов, в предлагаемых интерферометрах нет необходимости использования дополнительных элементов для возможности исправления ошибок.

Интеллектуальная собственность

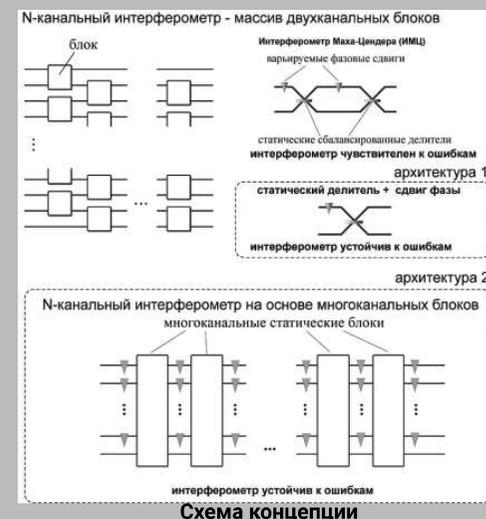
1. Заявка на изобретение №2020119934 «Устойчивый к ошибкам многоканальный поляризационный преобразователь электромагнитных сигналов»
2. «N-канальный линейный преобразователь электромагнитных сигналов» — RU2734454
3. Изобретение «N-канальный линейный преобразователь электромагнитных сигналов и способ осуществления многоканального линейного преобразования» — RU2723970
4. «Способ линейного оптического преобразования сигналов и интерферометр, реализующий такое преобразование» — RU2702806
5. РСТ

Потенциальные потребители

- Компании, занимающиеся разработкой оптических симуляторов, универсальных квантовых вычислителей.
- Компании-разработчики в области классической оптической обработки информации, в особенности в оптических нейронных сетях.

Архитектура 1

Использует в качестве двухканального блока одиночный статический делитель, снабжённый одним варьируемым сдвигом фаз. Массив таких блоков образует многоканальный интерферометр, который способен осуществлять широкий класс преобразований при высоком уровне статических ошибок.



Архитектура 2

Статические части интерферометров представляют собой многоканальные блоки, располагаемые между слоями независимых фазовых сдвигов. В отличие от статических делителей, преобразующие только два канала, многоканальные блоки преобразуют одновременно множество каналов.

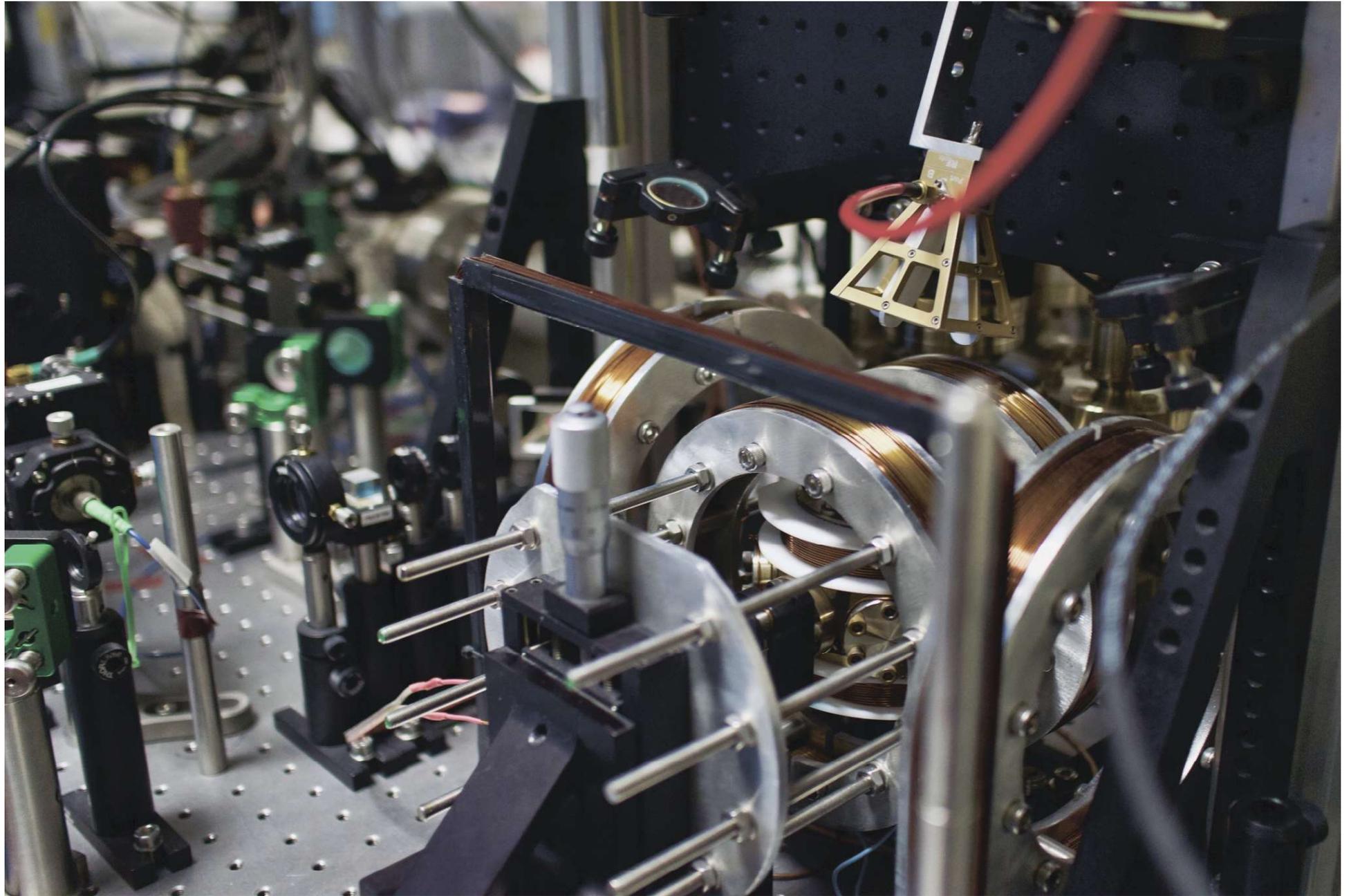
Преимущества перед аналогами

Программируемые многоканальные интерферометры, созданные с использованием известных до недавнего времени архитектур, подвержены влиянию ошибок, возникающих в статических элементах интерферометров на этапе их изготовления. В результате, чтобы иметь возможность исправления этих ошибок в дизайн интерферометров на этапе проектирования нужно вносить дополнительные активные и пассивные оптические элементы, что приводит к укрупнению размеров схемы и усложняет их перепрограммирование. Предлагаемые архитектуры программируемых интерферометров вовсе не подвержены влиянию статических ошибок и при этом не требуют внесения дополнительных элементов в схемы.



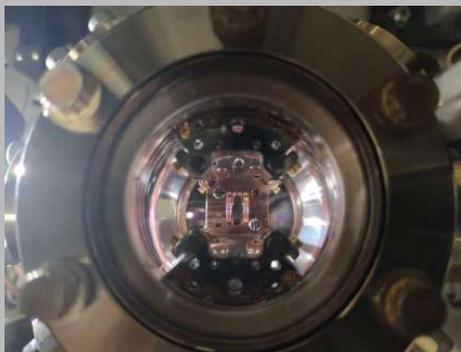
TRL-6

Модель системы/подсистемы или прототип продемонстрированы в окружении, близком к реальному

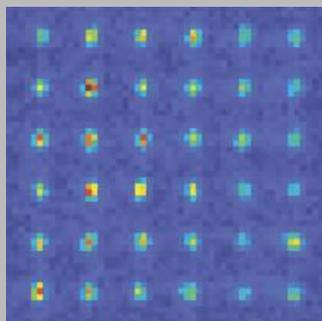


Квантовый симулятор на основе одиночных нейтральных атомов

Цифровой квантовый симулятор – это устройство для выполнения специализированных квантовых алгоритмов для решения задач моделирования квантовых систем и широкого круга оптимизационных задач. В основе одного из прототипов квантового симулятора, разрабатываемого в ЦКТ МГУ, лежит квантовый регистр из одиночных атомов рубидия, захваченных в массив оптических пинцетов. Эта технология позволяет создавать двумерные массивы атомов с контролируемым взаимодействием, которые можно использовать в качестве физических кубитов в квантовом симуляторе. В скором времени будет реализована система облачного доступа к разрабатываемому симулятору.



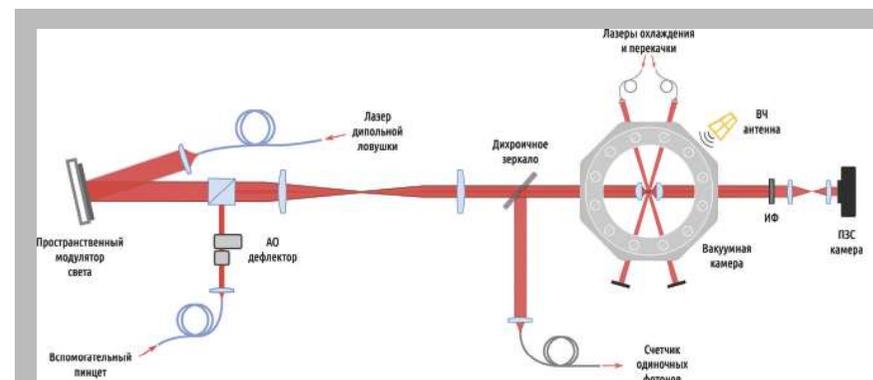
Вакуумная камера с системой линз для создания оптических пинцетов



Флуоресценция одиночных атомов в массиве пинцетов



TRL-4



Упрощённая схема экспериментальной установки для создания массивов одиночных атомов

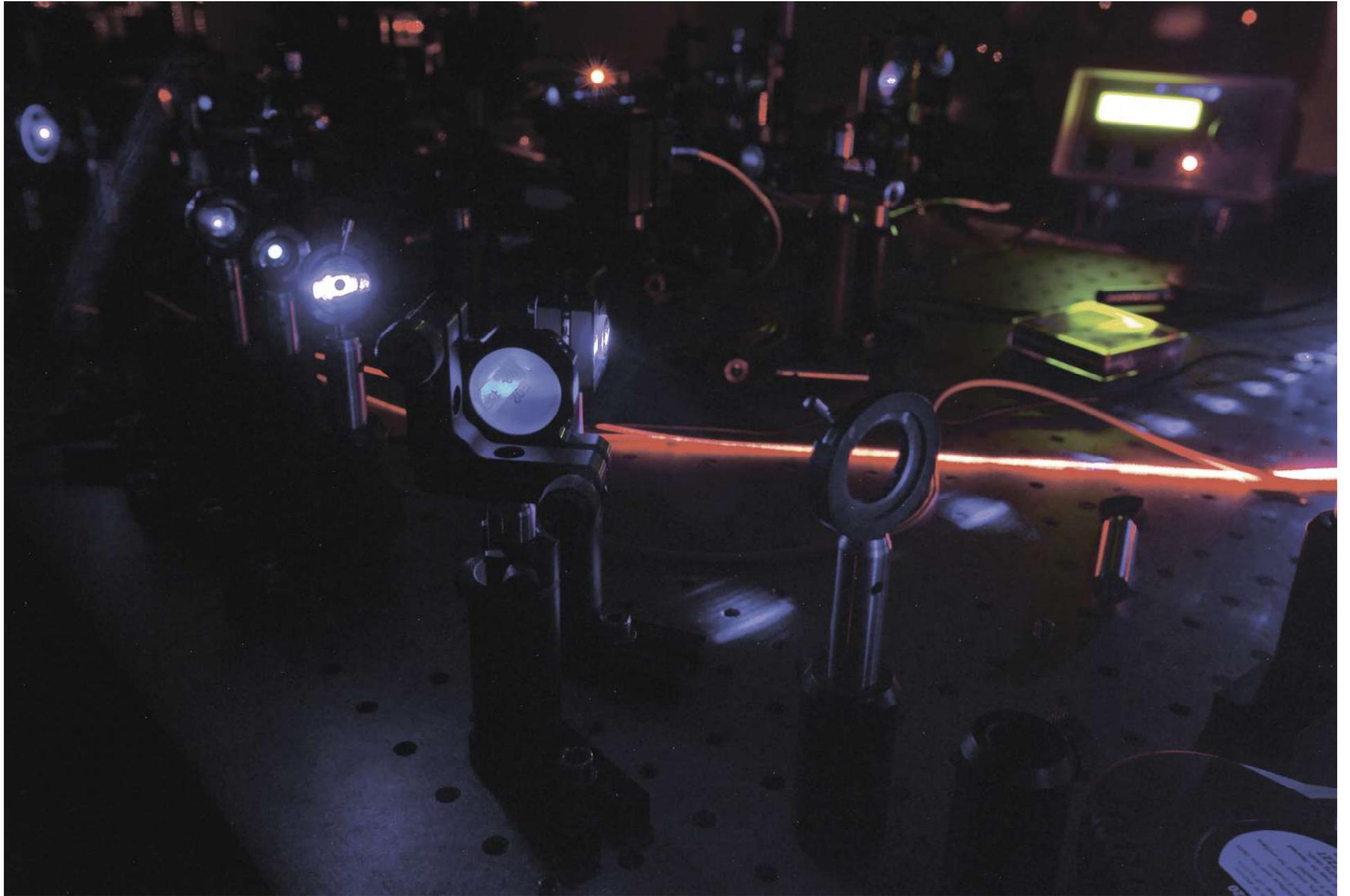
Технология позволяет создавать двумерные и трёхмерные упорядоченные структуры из более чем 36 одиночных атомов рубидия. Каждый атом играет роль физического кубита, для кодирования логических состояний используются подуровни сверхтонкого расщепления основного состояния. Индивидуальная адресация возможна с помощью вспомогательного оптического пинцета.

Преимущества перед аналогами

- Перестраиваемая структура квантового регистра
- Возможность создания трёхмерных структур
- Гибкая настройка и возможность программного переключения цифровой/аналоговый симулятор

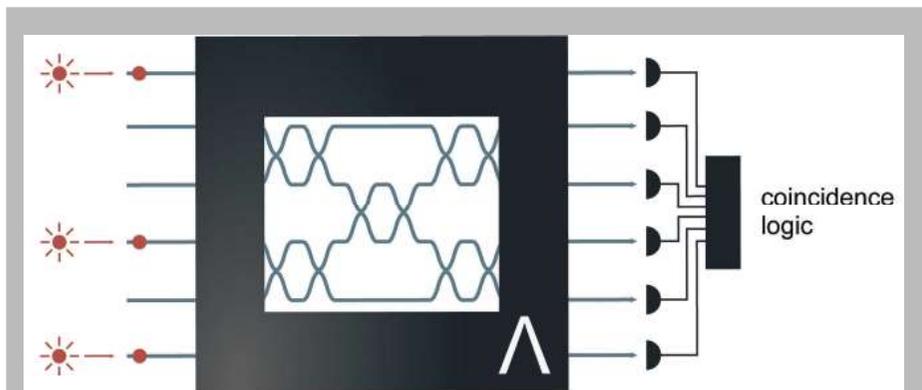
Потенциальные потребители

- Научные организации
- Индустриальные компании



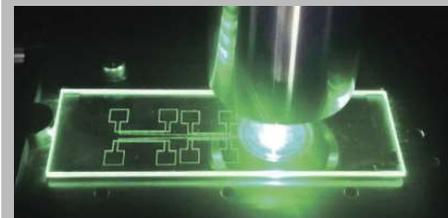
Линейно-оптический квантовый симулятор

В основе линейно-оптического квантового симулятора лежит кодирование информации в квантовые состояния одиночных фотонов. Многофотонные состояния затем преобразуются с помощью программируемого линейного оптического интерферометра и детектируются на выходе с помощью счётчиков одиночных фотонов. Размерность пространства логических состояний в такой системе может быть очень большой, что позволяет реализовать вычислительное превосходство над классическими компьютерами в ряде задач.



Упрощённая схема линейно оптического квантового симулятора

Ключевыми компонентами технологии являются источники одиночных фотонов, интегрально-оптические интерферометры и детекторы. Используются два основных типа источников – источники на основе спонтанного параметрического рассеяния в нелинейных кристаллах и источники на основе полупроводниковых квантовых точек. Активные интегральные схемы изготавливаются по двум технологиям – фемтосекундной лазерной печати в кварцевом стекле и литографически в нитриде кремния (в сотрудничестве с НОЦ ФНМ МГТУ им. Н.Э.Баумана). В качестве детекторов используются сверхпроводящие счётчики одиночных фотонов. В настоящий момент мы располагаем источником до 6 одиночных фотонов, технологией изготовления интерферометров с десятками каналов и 24 канальным блоком однофотонных детекторов.



Изготовление активной интегрально-оптической структуры методом фемтосекундной лазерной печати



Программируемый интегрально-оптический чип (изготовлен в сотрудничестве с НОЦ ФНМ МГТУ им. Н.Э.Баумана)



Источник 6-фотонных состояний на основе спонтанного параметрического рассеяния света

Потенциальные потребители

- Научные организации
- Индустриальные компании

Преимущества перед аналогами

- Низкий уровень ошибок и декогеренции состояний фотонов
- Большая размерность пространства состояний
- Возможность интегрального исполнения большинства компонентов

Интеллектуальная собственность

1. Способ линейного оптического преобразования сигналов и интерферометр, реализующий такое преобразование - RU2702806

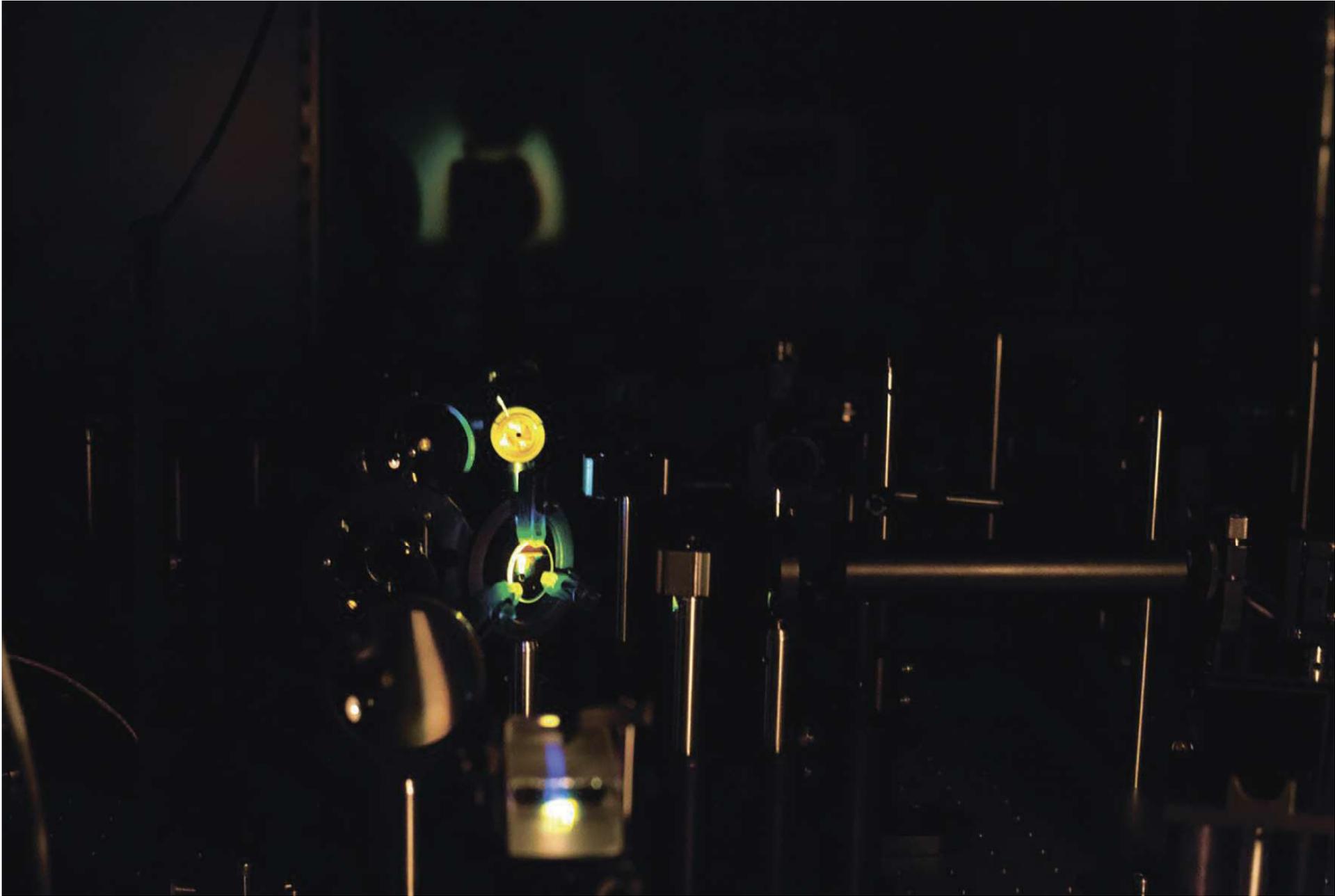
2. N-канальный линейный преобразователь электромагнитных сигналов и способ осуществления многоканального линейного преобразования - RU2723970

3. N-канальный линейный преобразователь электромагнитных сигналов - RU2734454

Исследования			Прототип			Серия		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эксперимент								

TRL-4

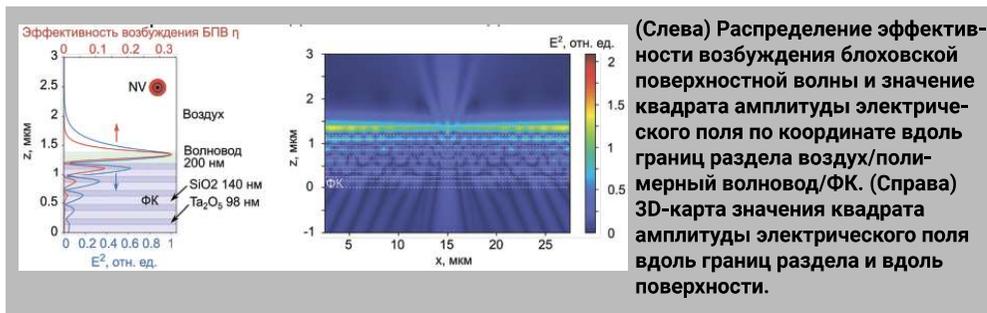
7



Однофотонные источники света на чипе

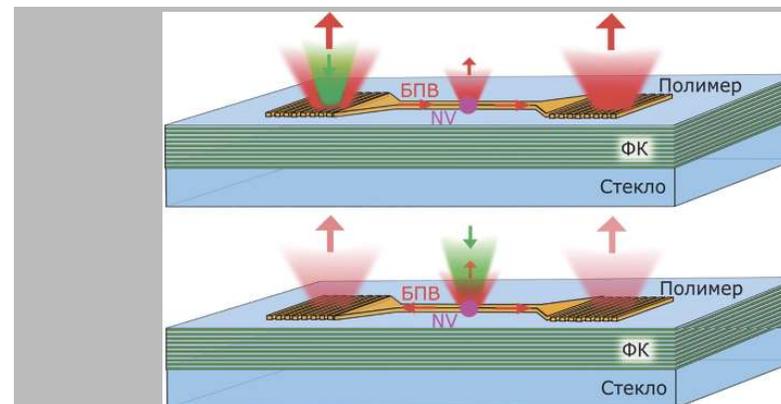
Однофотонный источник света (однофотонный излучатель) излучает ровно один фотон за раз в заданном пространственно-временном режиме, при этом все фотоны идентичны.

Разрабатываемая технология основана на внедрении твердотельных однофотонных источников в полимерные волноводы, поддерживающие распространение блоховских поверхностных волн (БПВ) на поверхности фотонных кристаллов. Для упрощения изготовления и повышения качества однофотонных излучателей можно использовать твердотельные однофотонные источники на основе атомоподобных эмиттеров в виде люминесцирующих квантовых точек (атомных дефектов) из наноалмазов с азотно-замещёнными вакансиями (NV-центры). Преимуществами данного метода являются отличные свойства алмазов и возможность масштабируемого изготовления на их основе интегральных схем на поверхностных волнах с помощью методик лазерной литографии.



Потенциальные потребители

- Компании, создающие квантово-вычислительные устройства и схемы, устройства квантовой защищённой связи и квантовой обработки информации.
- Компании, занимающиеся созданием 2D-материалов и полупроводниковых структур, в частности квантовых LED-систем (QLED), реализованных с использованием квантовых точек и дефектов.



Однофотонные излучатели представляют из себя квантовую точку (нанообъект) на поверхности фотонного кристалла (ФК), люминесцирующую в присутствии блоховских поверхностных волн (БПВ). Наноалмазы наносятся на верхний слой ФК, после чего покрываются слоем полимера: в области наноалмазов с необходимым сигналом люминесценции происходит создание волноводных структур с помощью двухфотонной лазерной литографии. Таким образом, реализуется комбинированный метод встраивания однофотонных источников в волновод за один сеанс изготовления с помощью комбинирования двух технологий: технологии сканирования и построения карты люминесценции наноалмазов с последующей технологией лазерной литографией волноводов вблизи наноалмазов.

Преимущества перед аналогами

- Не требуют сложных алгоритмов настройки.
- Имеют высокую скорость работы.
- Применение технологии двухфотонной лазерной литографии позволяет создавать сложные компактные волноводные структуры за один сеанс изготовления без увеличения стоимости конечного устройства.
- Для БПВ отсутствует фиксированный закон дисперсии, а у устройств на их основе – омиические потери. Использование БПВ позволяет управлять законом дисперсии за счет подбора материалов и толщин слоёв фотонного кристалла, а также существование как ТМ-, так и ТЕ-поляризованных волн.

Исследования			Прототип			Серия		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			Эксперимент					

TRL-3

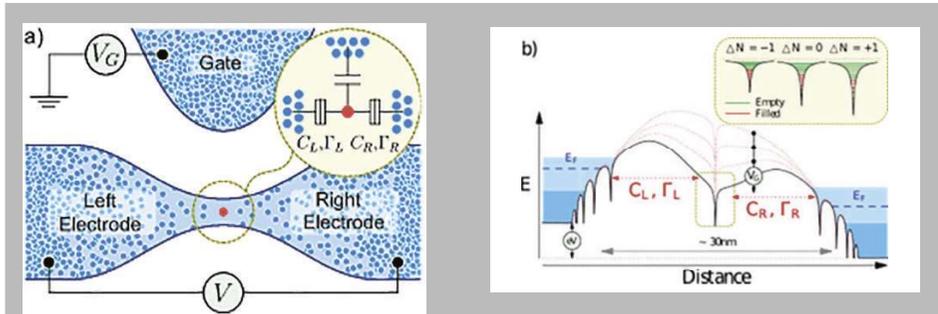
Разработка и лабораторная проверка ключевых элементов технологии



Одноатомный одноэлектронный транзистор

Твердотельный одноатомный одноэлектронный транзистор, изготовленный на поверхности монокристалла полупроводника или диэлектрика с имплантированным в приповерхностный слой одиночным примесным атомом. Электронный транспорт осуществляется в системе исток - примесный атом - сток. Управление током через транзистор осуществляется электростатическим затвором. Свойства примесного атома и полупроводниковой или диэлектрической подложки целиком определяют транспортные свойства такого транзистора.

Одноатомные одноэлектронные транзисторы могут использоваться в элементах твердотельного квантового компьютера, в квантовых сенсорах, зарядовых клеточных автоматах, зарядовых резервуарных нейронных сетях.

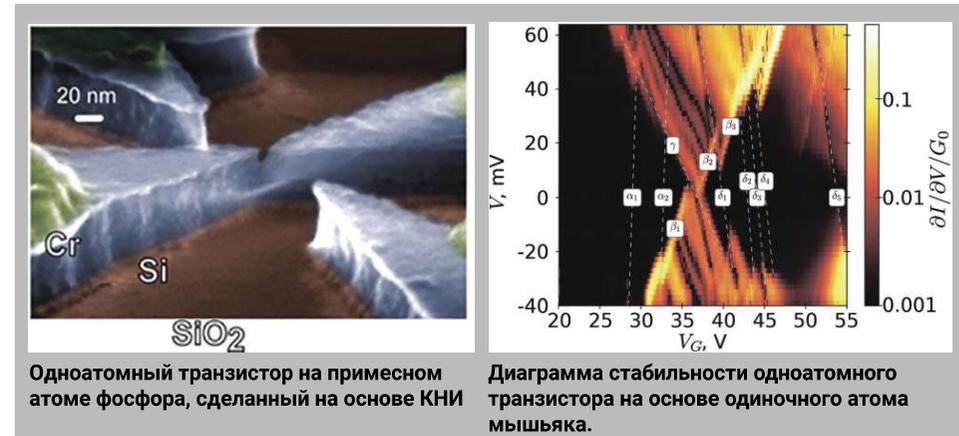


Блок-схема одноатомного одноэлектронного транзистора на основе примесного атома. Синими кружками отмечены примесные атомы. Красным кружком отмечен атом, который является рабочим зарядовым центром транзистора.

Энергетическая диаграмма одноатомного одноэлектронного транзистора. Пунктиром показаны профили эффективного потенциального барьера для различных затворных напряжений.

Интеллектуальная собственность

1. Способ изготовления одноэлектронных одноатомных транзисторов с открытым каналом транзистора и транзистор, изготовленный таким способом — RU 2694155
2. Способ определения электрической емкости уединенной наночастицы — RU2321011
3. Программы для ЭВМ поданы на регистрацию



Одноатомный транзистор на примесном атоме фосфора, сделанный на основе КНИ

Диаграмма стабильности одноатомного транзистора на основе одиночного атома мышьяка.

Преимущества перед аналогами

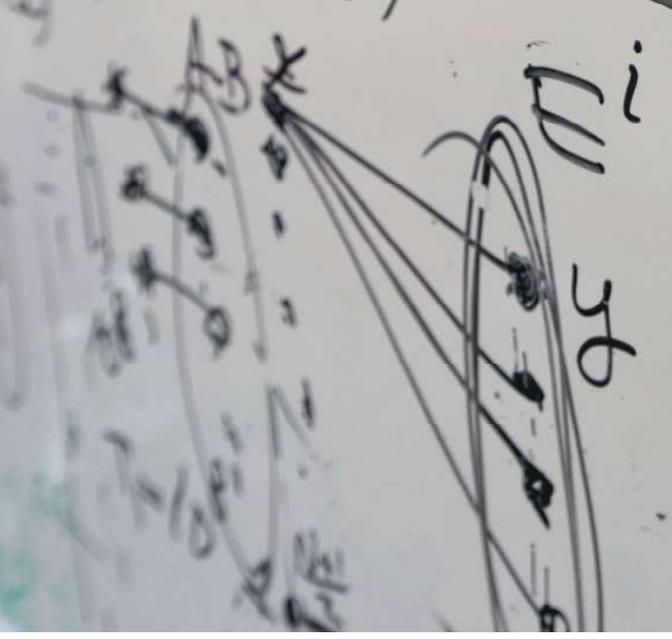
- Создание одноатомных одноэлектронных элементов и устройств открывает дорогу к созданию электронных устройств с атомной функциональной структурой и субнанометровыми характерными размерами рабочих элементов.
- Возможность управлять транспортом одиночных электронов, вплоть до электрического считывания заселенности одночастичных состояний. В них реализуется возможность функционального использования особенности дискретного энергетического спектра электронов.

Цель работы

- Исследование одноатомных структур (транзисторов) в широком диапазоне температур - от 3К до комнатных 300К.
- Изучение экспериментальных особенностей исследования одноатомного транзистора.
- Изучение основных методов достижения низких температур и устройства криостата, а также получение базовых навыков управления криостатом и высокоточной измерительной аппаратурой.

$$G(x|y) = G(x, y)$$

$$G(x|y) = \sum_i p(x_i|y)$$



$p(x_i|y)$

Курсы повышения квалификации

Курсы повышения квалификации «Экспериментальные квантовые технологии в онлайн-лаборатории» и «Квантовая обработка информации и квантовые технологии» позволяют слушателям овладеть практическими и теоретическими навыками в области квантовых технологий.

Слушатели курса «Квантовая обработка информации и квантовые технологии» познакомятся с основными понятиями квантовой информации, квантовых вычислений, основными квантовыми алгоритмами и протоколами квантовых коммуникаций.

Слушатели курса «Экспериментальные квантовые технологии в онлайн-лаборатории» познакомятся с основами квантовой оптики и квантовой информатики и под руководством научных сотрудников Центра выполнят экспериментальные задачи на реальной физической установке практикума ЦКТ МГУ, доступ к которой осуществляется онлайн.

В конце обучения, после сдачи итогового экзамена, слушатель получает сертификат о повышении квалификации установленного образца МГУ.

Преимущества перед аналогами

- Курсы читают специалисты высочайшего уровня, имеющие большой опыт в области квантовых технологий.
- Курс «Экспериментальные квантовые технологии в онлайн-лаборатории» не имеет аналогов на рынке



TRL-9

Серийное производство



Очно-дистанционный курс «Экспериментальные квантовые технологии в онлайн-лаборатории»

Срок обучения: 4 месяца
Интенсивность: 72 часа
Форма обучения: очно-дистанционная
Группа до 10 человек



Очный курс «Квантовая обработка информации и квантовые технологии»

Срок обучения: 3 месяца
Интенсивность: 88 часов
Форма обучения: очно-заочная
Группа от 5 человек.

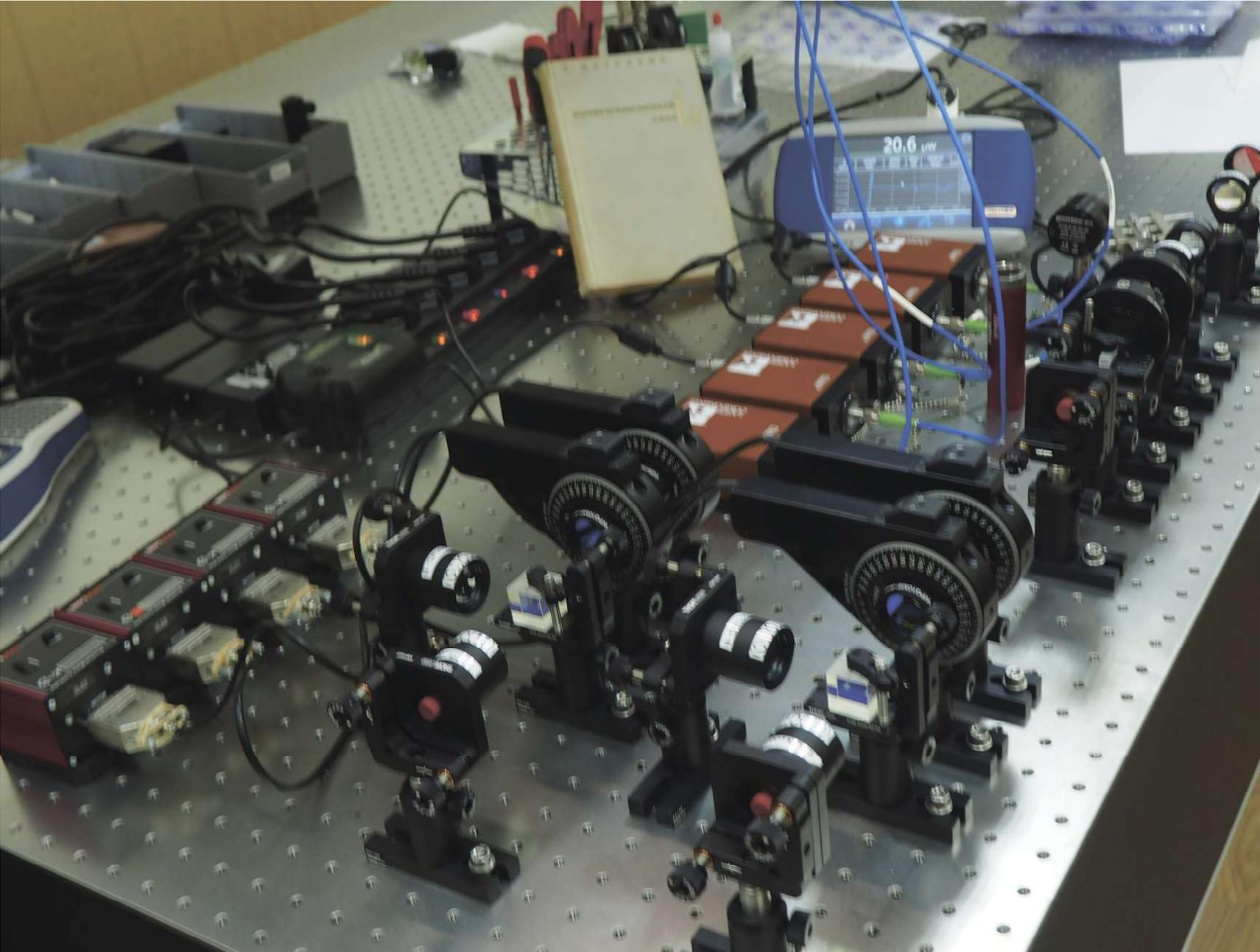
Потенциальные потребители

Курс «Квантовая обработка информации и квантовые технологии»

- Руководители и кадровый резерв предприятий ОПК РФ
- ФОИВ
- государственные корпорации, специализирующиеся в области технологий квантовой обработки информации

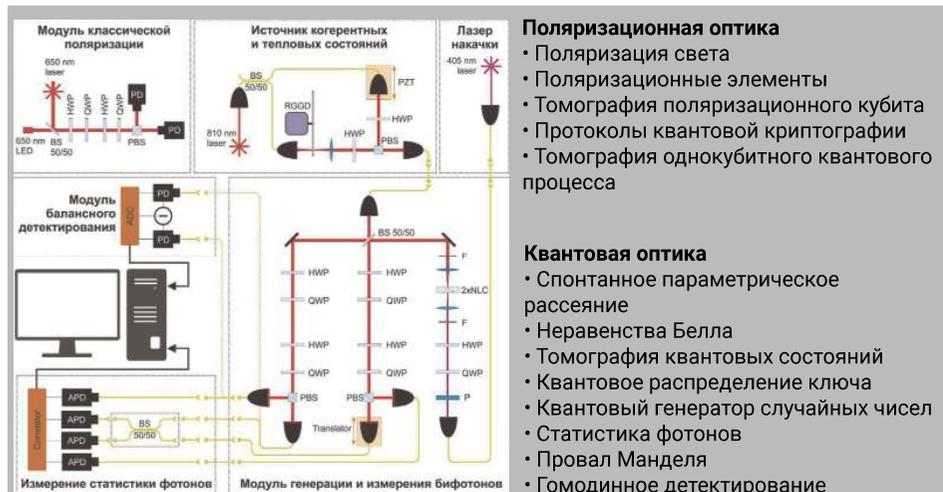
Курс «Экспериментальные квантовые технологии в онлайн-лаборатории»

- Студенты, аспиранты, сотрудники вузов и организаций, занимающихся квантовыми технологиями



Научно-образовательный практикум по квантовой оптике и квантовой информатике

Одним из самых сложных и вместе с тем востребованных в современном мире разделов физики является квантовая физика. Ее востребованность обусловлена развитием квантовых (в особенности квантово-информационных) технологий. В то же время, ее сложность связана с тем, что ее базовые принципы полностью противоречат нашему опыту. Данный практикум позволяет экспериментально исследовать базовые законы квантовой физики (принцип суперпозиции, соотношение неопределенностей, явление перепутанности, нарушение неравенств Белла и др.) на примере задач квантовой информатики (квантовое распределение ключа, квантовый генератор случайных чисел, томография квантовых состояний и процессов), реализованных на самой простой и наглядной физической платформе — платформе квантовой оптики.



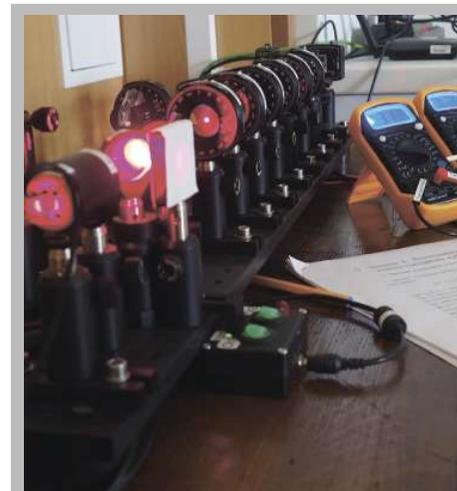
Блок-схема модулей практикума

Поляризационная оптика

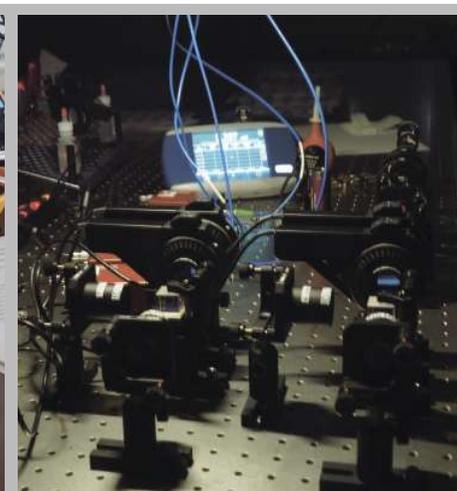
- Поляризация света
- Поляризационные элементы
- Томография поляризационного кубита
- Протоколы квантовой криптографии
- Томография однокубитного квантового процесса

Квантовая оптика

- Спонтанное параметрическое рассеяние
- Неравенства Белла
- Томография квантовых состояний
- Квантовое распределение ключа
- Квантовый генератор случайных чисел
- Статистика фотонов
- Провал Мандела
- Гомодинное детектирование



Поляризационная оптика



Квантовая оптика

Потенциальные потребители

- Образовательные организации
- Научные организации
- Индустриальные компании, работающие в области квантовых технологий

Преимущества перед аналогами

- Универсальный — небольшое число модулей позволяет решать большое число учебных и исследовательских задач
- Модульный — возможность подобрать индивидуальную конфигурацию и в дальнейшем расширить её новыми модулями
- Удаленный доступ — возможность выполнять работы дистанционно, управляя аппаратурой через сеть Интернет

Исследования			Прототип			Серия		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Эксперимент								

TRL-9

Серийное производство

Интеллектуальная собственность

1. Встроенное программное обеспечение коррелятора импульсов — RU2019662679
2. Программный комплекс для работы с коррелятором импульсов — RU2019662680
3. Учебно-научный лабораторный стенд для квантовой оптики и квантовой информатики — RU2734455

<https://quantum.msu.ru>
VK - https://vk.com/msu_quantum
FB - <https://www.facebook.com/quantum.msu/>
E-mail для связи - contact@quantum.msu.ru

ФОНД НТИ Фонд Национальной
технологической инициативы

