

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук профессора Фельдмана Эдуарда Беньяминовича на диссертационную работу Кравцова Константина Сергеевича «Управление оптическими полями для задач связи и защиты информации» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 - «лазерная физика»

Диссертация Кравцова Константина Сергеевича посвящена разработке новых подходов к представлению информации в виде оптических сигналов, ее обработке, передаче и защите, а также развитию методов квантовой информации и квантового распределения ключей. С момента появления полупроводниковых лазеров и оптических волноводов с малыми потерями в начале 1970-х годов, оптика стала неизменной основой для систем глобальной связи и телекоммуникаций. Подавляющее большинство дальних линий связи использует оптические поля для передачи информации. Оптические линии связи лежат в основе сети «интернет», а также многих других информационных систем. Параллельно наблюдается большой прогресс в развитии оптических носителей информации.

Задача более сложного управления оптическими полями, позволяющая не только передавать и сохранять информацию, но и производить ее обработку непосредственно в оптическом виде, является крайне перспективной возможностью для дальнейшего развития информационных систем. Переход к *квантовым* оптическим системам также перспективен не только решением отдельной задачи квантового распределения ключей, но и может позволить достигать большей энергоэффективности при передаче и обработке информации. Поэтому диссертация К.С.Кравцова, безусловно, является актуальной. Среди многочисленных результатов, полученных автором, особый интерес представляет создание квантового генератора случайных чисел, позволяющее генерировать случайные битовые последовательности для задач квантовой криптографии. Прорывным

результатом является предпринятая автором попытка реализации “нейронных сетей” для оптических сигналов.

Диссертационная работа Кравцова К. С. изложена на 199 страницах и состоит из введения, 6 глав и заключения. В диссертации цитируются 218 источников.

Во **введении** разобрана актуальность данного исследования, его основные цели и задачи, а также сформулирована его значимость и научная новизна. Приведено краткое изложение основных достигнутых результатов.

В **первой главе** исследованы новые подходы к реализации модуляции оптических сигналов и их мультиплексированию. Предложен полностью оптический метод формирования сигналов с частотным разделением на ортогональных подчастотах, который реализуется с помощью специального класса планарных волноводных решеток. Во втором разделе главы рассмотрена технология цифровой планарной голографии, позволяющая создавать интегрально-оптические приборы с заданными параметрами. В качестве примера использования технологии предложены топологии для демодулятора фазового кодирования с возможностью спектрального демультиплексирования, а также кодера/декодера для спектрально-фазового кодового мультиплексирования.

**Вторая глава** посвящена демонстрации возможности реализации нейроморфной обработки сигналов непосредственно в оптическом виде. Для этого предложена оригинальная оптическая схема «нейрона», имитирующего поведение биологических нейронов в соответствие с одной из возможных моделей. Функционал «нейроноподобного» поведения реализован за счет кросс-модуляции коэффициента усиления в полупроводниковом оптическом усилителе, накачиваемого электрическим образом. В продемонстрированном эксперименте удалось добиться реализации как возбуждающих, так и тормозящих входов, а также необходимого временного накопления сигнала.



В **третьей главе** разобран метод генерации условно-секретных ключей шифрования непосредственно в волоконно-оптической линии связи между двумя абонентами. Для этого линия связи организуется в виде большого интерферометра Маха-Цандера, фазовые флуктуации которого, наблюдаемые абонентами, являются источником случайных бит для ключа шифрования. В работе аргументирована существенная сложность подслушивания в такого рода системе распределения ключей. Для успешного подслушивания, злоумышленник должен обладать существенно более продвинутыми техническими средствами, чем легальные абоненты.

**Четвертая глава** посвящена исследованию свойств каналов по открытому пространству применительно к передаче данных с разрешением по пространственным модам. В работе предложена оригинальная теоретическая модель для вычисления характеристик пропускания для конкретных пространственных мод, а также для определения силы перекрестных помех между модами. Разработанная теория подтверждена экспериментально с помощью установки с контролируемыми параметрами турбулентности.

В **пятой главе** разработан метод томографии пространственных квантовых состояний с помощью деформируемого зеркала. Состоятельность метода доказана на эксперименте, в котором производится томография набора условно-неизвестных квантовых состояний, продемонстрировавшая неплохую точность восстановления.

В **шестой главе** рассмотрены методы квантового распределения ключей. Предложена экспериментальная реализация квантового генератора случайных чисел, основанная на измерении временных интервалов между событиями в Пуассоновском процессе. Экспериментально реализованы два варианта релятивистского протокола квантового распределения ключей. Теоретически предложен и исследован протокол на геометрически-однородных квантовых состояниях, в котором за счет использования

бóльшего числа неортогональных квантовых состояний достигается бóльшая защищенность от потенциальных уязвимостей в реальных системах.

В совокупности, данные исследования формируют целый комплекс различных методов управления оптическими сигналами, позволяющий решать задачи достаточно широкого круга, начиная от оптимизации систем связи до создания интегральных оптических платформ на чипах, квантового распределения ключей и систем связи по открытому пространству. Диссертант уверенно пользуется продвинутыми современными методами в оптических экспериментах, а также соответствующим математическим аппаратом для теоретических выкладок. По материалам диссертации опубликовано 20 статей, в основном, в изданиях первого квартала, получено 5 патентов. Результаты работы многократно докладывались на престижных Международных конференциях.

Диссертационная работа не лишена недостатков. Отметим некоторые из них.

1. В главе 4, посвященной турбулентным каналам связи по открытому пространству, недостаточно внимания уделено дискуссии о различиях между пространственными модами классического излучения и пространственными квантовыми состояниями фотонов. Поскольку оба этих понятия тесно взаимосвязаны, следовало бы более тщательно описать применимость разработанной теории к первому и второму объектам, а также рассмотреть какие-либо примеры практического использования полученных соотношений в первом и втором сценарии.

2. Аналогичное замечание можно предъявить и к главе 5, в которой недостаточно четко проведено различие между томографией пространственных квантовых состояний и измерением модового состава классических электромагнитных полей. Существуют ли такие различия и в чем заключаются их особенности. Такая дискуссия позволила бы показать более полную картину.



3. В разделе, посвященном, квантовому генератору случайных чисел практически полностью опущено теоретическое рассмотрение вопроса регистрации одиночных фотонов, которое может быть охарактеризовано с помощью формулы Манделя. Такое рассмотрение также могло бы дополнить картину изложения и сделать ее более завершенной.

В то же время, указанные недостатки больше являются пожеланиями, нежели существенными упущениями в представленной диссертации. Их наличие никоим образом не ставит под сомнение достоверность, новизну и значимость полученных результатов.

Диссертантом разработано и исследовано новое научное направление, связанное с управлением оптическими полями для решения задач передачи, обработки и защиты информации. Экспериментально и теоретически предложены различные сценарии использования преобразований оптических полей для решения ряда важных задач. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

### **Заключение по диссертационной работе**

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Кравцова Константина Сергеевича «Управление оптическими полями для задач связи и защиты информации» по актуальности темы, научной новизне, практической значимости полученных результатов, обоснованности сделанных выводов и уровню исполнения является логически законченным исследованием, содержащим разработку нового научного направления, и соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, в том числе п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года (с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении

ученых степеней»). Автор работы, Кравцов Константин Сергеевич, заслуживает присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 - «лазерная физика».

Официальный оппонент главный научный сотрудник лаборатории спиновой динамики и спинового компьютинга Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН),		
д.ф.-м.н., профессор		Э.Б. Фельдман
Подпись сотрудника ИПХФ РАН Э.Б. Фельдмана заверяю: Ученый секретарь ИПХФ РАН		
д.х.н.	 Б.Л. Психа	



19 июля 2022 г.