

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук профессора Фельдмана Эдуарда Бенъяминовича 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

