

На правах рукописи

АНИСИМОВ Андрей Александрович

ПРИЕМНИКИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА
НА ОСНОВЕ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2005

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент Медведев Андрей Викторович.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, ст.н.с. ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН Трифонов Алексей Сергеевич,

кандидат физико-математических наук, доцент каф. «Физика полупроводников и наноэлектроника» ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" Ушаков Александр Юрьевич.

Ведущая организация:

ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича"

Защита состоится 29 декабря 2005 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, II учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан 25 ноября 2005 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.01

доктор технических наук, профессор

Коротков А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Необходимость регистрации одиночных фотонов возникла достаточно давно, после фундаментальных работ М.Планка и А.Эйнштейна. Первые приборы, позволяющие осуществить такую регистрацию, многокаскадные фотоэлектронные умножители (ФЭУ), были созданы в 30-х годах прошлого века. Дальнейшее совершенствование ФЭУ заключалось в расширении их оптического диапазона, увеличении коэффициента усиления. Тенденция повышения быстродействия, квантовой эффективности и перехода от вакуумных приборов к полупроводниковым привела к созданию в 70-х годах твердотельных фотоэлектронных умножителей – лавинных фотодиодов (ЛФД).

В настоящее время все большее распространение получают волоконные системы, в которых излучение распространяется по одно- и многомодовым оптическим световодам. В таких системах используется излучение в диапазоне длин волн от 850 до 1600 нм (ближний ИК-диапазон). Разработка систем квантовой криптографии поставила задачу проектирования приемников фотонов, работающих в указанном диапазоне, имеющих высокую скорость счета, высокую квантовую эффективность и малую вероятность ложного срабатывания. До настоящего времени разрабатываемые для работы в ближнем ИК-диапазоне приемники фотонов на основе ЛФД имели сравнительно небольшую скорость счета, ограниченную эффектом послелавинных срабатываний. Малые вероятности темнового отсчета достигались за счет охлаждения ЛФД при помощи жидкого азота. Для этих приемников не были в достаточной степени исследованы вопросы выбора оптимальной температуры, временного разрешения, а также влияние ряда параметров на характеристики приемника. Этим вопросам, особенно актуальным для одного из основных применений приемников фотонов - систем квантовой криптографии, посвящена настоящая работа.

Целью диссертационной работы является разработка приемников фотонов для ближнего ИК-диапазона, удовлетворяющих условиям работы в составе систем квантовой криптографии (высокая скорость счета и квантовая эффективность при малой вероятности ложных отсчетов), исследование их характеристик и определение путей улучшения параметров.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

- Разработана новая схема регистрации тока лавинного пробоя, позволившая уменьшить число подводимых к ЛФД полосковых линий, что привело к уменьшению теплового потока и упростило конструкцию приемника.
- Разработан и создан оригинальный автоматизированный стенд для измерения характеристик ЛФД. Стенд позволил получить набор зависимостей, необходимый для выбора параметров приемника при его настройке для решения определенной задачи.
- Впервые предложен и реализован метод селектирования лавинных пробоев по времени их возникновения, позволяющий на порядок снизить вероятность ложных срабатываний при высоких скоростях счета фотонов.
- Продемонстрирована возможность оценки времен корреляции потока фотонов приемником, работающим в режиме стробирования. Определены диапазоны времен корреляции, для которых возможна оценка. Разработана новая методика, позволяющая расширить диапазон измерений в спектроскопии флуктуаций интенсивности.
- Исследован спектр излучения InGaAs/InP ЛФД, находящегося в режиме лавинного пробоя, и определены условия, при которых такое излучение может быть зарегистрировано приемником фотонов на базе аналогичного ЛФД.

Практическая ценность состоит в том, что результаты работы могут быть применены для создания приемников фотонов с высокими показателями и оценки их параметров. Такие приемные устройства могут быть использованы в широкой области приложений квантовой оптики.

Научные положения, выносимые на защиту:

- Разработанная схема регистрации лавинных пробоев позволяет уменьшить число полосковых линий, подводимых к ЛФД, что, в свою очередь, значительно упрощает разработку приемников фотонов.
- При проектировании приемников фотонов, предназначенных для конкретных задач, целесообразно использовать разработанный автоматизированный стенд. Стенд позволяет получить необходимый для целей оптимизации набор характеристик.
- Разработанная методика селектирования лавинных пробоев по времени возникновения позволяет на порядок снизить вероятность ложного срабатывания

приемника фотонов при высоких скоростях счета. Данная методика может использоваться для всех типов ЛФД с разделенными областями поглощения и умножения.

- Использование стробируемого режима работы приемников на основе ЛФД для оценки времени когерентности источника излучения позволяет расширить рабочий диапазон спектроскопии флуктуаций интенсивности, проводимой на базе этих приборов.
- В режиме лавинного пробоя ЛФД возникает оптическое излучение, мощность которого достаточна для регистрации приемником фотонов, построенном на аналогичном ЛФД.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- IV Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков, Старый Петергоф, 2002,
- VIII Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы "Фундаментальные исследования в технических университетах", Санкт-Петербург, 2004,
- Международная конференция "Lasers for Measurements and Information Transfer 2004", SPIE, Санкт-Петербург, 2004,
- IX Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы "Фундаментальные исследования в технических университетах", Санкт-Петербург, 2005,
- Международная конференция "Lasers for Measurements and Information Transfer 2005", SPIE, Санкт-Петербург, 2005.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы - 120 страниц, в том числе 62 страницы с рисунками, 2 страницы с таблицами, список литературы составляет 59 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе, являющейся обзором литературы, приведены результаты исследований ЛФД и как детектора фотонов и как полупроводниковой структуры. Также в обзоре литературы рассмотрены основные схемы включения, отмечены их преимущества и недостатки. При рассмотрении схем подавления лавинных пробоев отмечается, что по существу процесс лавинного пробоя в различных ЛФД происходит одинаково – он не зависит от типа и структуры ЛФД.

В п.1.1 в ходе рассмотрения процесса лавинного пробоя в полупроводниковых диодах определены характерные величины токов пробоя, лежащие в диапазоне от 100 мкА до единиц мА. Здесь же указаны основные типы структур ЛФД. Среди прочих можно выделить планарную гетероструктуру с разделенными областями поглощения фотонов (InP) и умножения фотогенерированных носителей (InGaAs), имеющую минимум шумов и максимум квантовой эффективности. Подводящий оптическое излучение световод в ЛФД такой конструкции расположен со стороны подложки (InP).

Также в данном пункте приведены характеристики ЛФД в линейном режиме и указаны основные параметры – величины темновых токов, максимальный коэффициент умножения и чувствительность. Особое внимание уделено зависимости напряжения пробоя от температуры.

В п. 1.2 проанализирован режим счета фотонов лавинными фотодиодами. Для того, чтобы использовать ЛФД в составе приемника фотонов, необходимо включить его в особом режиме. Во многих приложениях и, в частности, в системах квантовой криптографии, рассмотренных в статьях [1-3], заранее известно время прихода фотона. По результатам анализа данных литературы можно сделать заключение о несомненном преимуществе так называемого стробируемого режима при использовании априорной информации о времени прихода фотонов. В таком режиме на ЛФД подается постоянное смещение ($U_{см}$), меньшее напряжения пробоя ($U_{пр}$) и короткий импульс, называемый стробирующим, амплитудой $U_{стр}$ и длительностью $t_{стр}$, повышающий напряжение смещения и переводящий ЛФД в активный режим (рисунок 1).

Стробирующий импульс подается в момент времени ожидаемого прихода фотона. Во время действия импульса ЛФД работает подобно счетчику Гейгера: один фотогенерированный носитель вызывает лавинный пробой, ток которого имеет величину от сотен микроампер до единиц миллиампер. Импульс тока регистрируется внешним устройством, вырабатывающим сигнал, свидетельствующий о срабатывании приемника.

Для возникновения пробоя необходимо выполнение по крайней мере двух условий: напряжение на ЛФД должно превышать напряжение пробоя и в обедненном слое должен быть сгенерирован носитель заряда. Если за время $t_{стр}$ носитель не появится, пробой не произойдет.

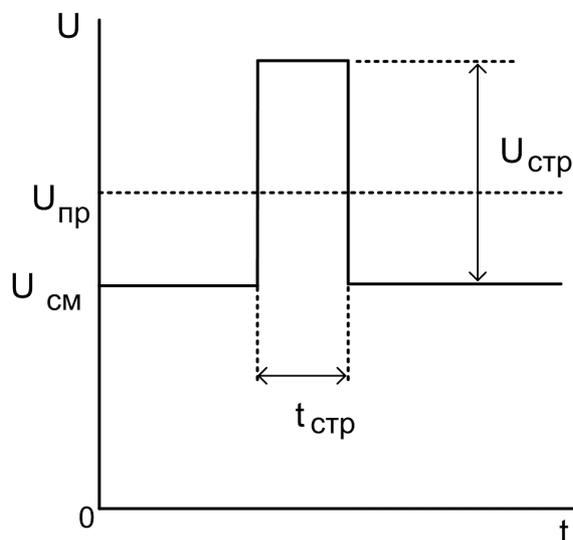


Рис.1 Форма напряжения, подаваемого на ЛФД

Из анализа данных литературы можно сделать вывод о том, что существует несколько процессов, приводящих к появлению ложных срабатываний. Это тепловая генерация носителей заряда в ЛФД, туннелирование и эмиссия захваченных ловушками носителей заряда [4]. Последняя приводит к появлению так называемых послелавинных срабатываний, проявляющихся в виде одного или нескольких ложных отсчетов, возникающих после очередного срабатывания приемника.

В п. 1.3 рассматриваются вопросы проектирования приемников фотонов. Среди них – вопросы охлаждения, выбора величины напряжения смещения, амплитуды, длительности и частоты стробирующих импульсов.

Также, в данном пункте рассмотрена задача снижения вероятности ложных срабатываний устройства, регистрирующего ток лавинного пробоя. Мешающим фактором здесь являются импульсы токов заряда собственной емкости ЛФД, возникающие во время действия фронта и спада стробирующего импульса. К настоящему времени разработано несколько вариантов компенсации таких помех: вычитание на входном дифференциальном усилителе [6], компенсация при помощи коаксиальных линий [7], компенсация на ВЧ-мосте [8] и регистрация изменения амплитуды помех [9]. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Вместе с тем, все они при прочих равных условиях дают примерно одинаковые результаты.

В п. 1.4 рассматривается решение вопросов моделирования ЛФД. Большинство изученных работ, одной из которых является [4], посвящено вычислению характеристик в линейном режиме. В отдельных работах, например [5], изучены и промоделированы механизмы распространения лавинного пробоя, вычислены вероятности его возникновения и прекращения.

В результате изучения работ, посвященных InGaAs/InP ЛФД, были выяснены их характеристики спектральной чувствительности в линейном режиме работы. Нет оснований полагать, что спектральная характеристика ЛФД в режиме счета фотонов отличается от приведенных в литературе. Диапазон рабочих длин волн ЛФД – от 0,9 до 1,6 мкм. Нижняя граница (0,9 мкм) определяется возрастающим поглощением излучения в подложке, а верхняя (1,6 мкм) – шириной запрещенной зоны слоя поглощения.

В п. 1.5 приведен обзор применений приемников фотонов. Среди них – квантовая криптография, рефлектометрия, телепортация состояния фотонов, квантовые неразрушающие измерения и т.д. Особое внимание уделено системам квантовой криптографии, имеющим тенденцию быстрого развития. Отчетливо прослеживается прогресс в увеличении скорости передачи ключа – с 100 бит/с до более 1000 бит/с, а также в увеличении расстояния, при котором система остается защищенной – с 10 км до 150-200 км.

Отмечены также перспективные направления развития прикладной оптики, в частности, исследования в области квантовых вычислений, также требующие использования приемников фотонов.

Материалы обзора послужили основой для дальнейших расчетов и стали начальным приближением в вопросах проведения экспериментов. Были выяснены недостатки существующих приемников, прежде всего, низкие скорости счета. Также отмечено отсутствие рекомендаций по выбору параметров рабочего режима приемника ($U_{см}$, $U_{стр}$ и т.д.), обеспечивающих получение требуемых характеристик.

Во второй главе рассматривается моделирование работы ЛФД в режиме детектирования фотонов. Расчет характеристик ЛФД позволяет определить его потенциальные возможности.

В п. 2.1 рассчитывается распределение напряженности электрического поля в слоях поглощения и умножения. Результаты расчета позволяют вычислить падение напряжения на ЛФД в различных режимах работы. Сопоставление расчетных и паспортных данных ЛФД свидетельствует о правильности выбора параметров модели.

В п. 2.2 производится оценка величины генерационно-рекомбинационного и туннельного токов при различных температурах, а также квантовой эффективности.

Известно, что статистика появления носителей заряда в обедненном слое – пуассоновская. На этом основании, с использованием расчетных данных о средней интенсивности процесса, вычисляется вероятность появления носителя во время действия стробирующего импульса.

Важным является расчет вероятности включения (или инициирования) лавинного пробоя, проведенный в п.2.2.2. Именно она, в основном, и определяет квантовую эффективность приемника фотонов. Квантовая эффективность, применительно к приемникам фотонов, традиционно понимается как вероятность срабатывания приемника при условии достижения фотоном фотодиода. Как правило, она находится в пределах 10-20% на длине волны 1,3 мкм.

В результате проведенных вычислений были получены следующие оценки:

- При температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит, в среднем, генерация в обедненном слое одного носителя за 16 мкс.
- Как правило, в экспериментах по счету фотонов значение "эффективной" длительности стробирующего импульса составляет величину около 2 нс. Под "эффективной" длительностью понимается интервал времени, в течение которого приемник регистрирует фотоны с практически постоянной вероятностью, близкой к максимальному значению. «Эффективная» длительность стробирующего импульса из-за различного рода переходных процессов, меньше реальной на 1-2 нс. При этом условии вероятность генерации носителя в момент действия импульса равна $1,25 \cdot 10^{-4}$ (для $t_{\text{стр}}=4\text{ нс}$).
- Для амплитуды стробирующего импульса, равной 5 В, вероятность инициирования лавины дыркой равна $P_d=0,17$ (в рассматриваемом ЛФД пробой иницируют дырки).
- В итоге при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ максимальная квантовая эффективность составляет 13,6% при вероятности темнового отсчета $P_{\text{то}}=3,3 \cdot 10^{-5}$. Указанное значение рабочей температуры является типичным для приемников на основе ЛФД со структурой InGaAs/InP.

По данным литературы полученные значения Q и $P_{\text{то}}$ свидетельствуют о возможности использования ЛФД в составе систем квантовой криптографии. Проведенные расчеты определяют теоретически достижимые параметры приемника фотонов на базе ЛФД рассматриваемой структуры.

Третья глава посвящена вопросам практической реализации приемника фотонов.

Пункт 3.1 содержит описание типовой структурной схемы приемника фотонов (рис. 2).

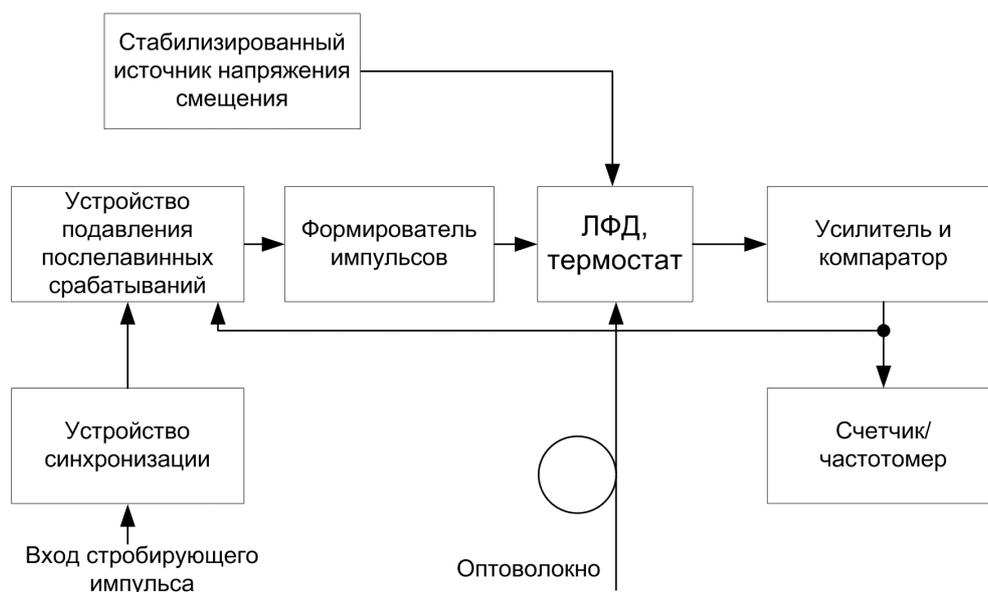


Рис.2 Структурная схема приемника фотонов

Приемник фотонов состоит из нескольких блоков. Устройство синхронизации обеспечивает совмещение по времени поступающих на ЛФД оптического и стробирующего импульсов. Оптический импульс формировался полупроводниковым лазером. Длительность оптического импульса по уровню половинной мощности составляла 200 пс, что много меньше длительности стробирующих импульсов – от 3 до 7 нс. Для обеспечения входного потока со средним числом фотонов менее 0,1 фотона/импульс, оптический импульс пропусклся через аттенюатор, имеющий коэффициент ослабления около 80 дБ (см. также рис.3).

Известно, что для периодов следования импульсов, меньших 10 мкс, становится заметным эффект послелавинного срабатывания. Вероятность послелавинного срабатывания имеет сильную зависимость от интервала между стробирующими импульсами. Схема подавления послелавинных срабатываний уменьшает указанную вероятность путем пропуска нескольких стробирующих импульсов после срабатывания приемника.

Формирователь импульсов служит для преобразования входных синхроимпульсов в стробирующие импульсы, имеющие заданную амплитуду и длительность. Детальное описание формирователя приведено в п.3.2. Он построен на диодах с накоплением заряда, что позволило с высокой точностью регулировать временное положение фронта и спада стробирующего импульса.

Усилитель и компаратор обеспечивают регистрацию тока лавинного пробоя и подавление ложных срабатываний при воздействии импульсных токов заряда емкости ЛФД. Особенности реализации данного устройства и преимущества разработанной автором схемы обсуждаются в п.3.3.

Для обеспечения охлаждения до рабочей температуры ЛФД помещен в термостатированный холодильник, построенный на элементах Пельтье. В зависимости от количества ЛФД, используемых в составе приемника, требуется обеспечить соответствующую холодопроизводительность, лежащую в диапазоне от сотен мВт до единиц Вт. Спроектированные для этих целей системы охлаждения рассмотрены в **п.3.4**. Наилучшие характеристики (отношение холодопроизводительности к потребляемой мощности) были достигнуты при использовании трехступенчатого элемента Пельтье с воздушным охлаждением. Охлаждаемым объектом являлся один ЛФД. Минимальная температура диода составила – 70°C.

Счетчик/частотомер позволяет фиксировать количество срабатываний за единицу времени.

В п.3.5 рассмотрена реализация приемника фотонов, предназначенная для работы в составе системы квантовой криптографии. В такой системе требуется применение двух приемников, имеющих идентичные характеристики.

Разработанное устройство включало в себя два приемника, имеющих общий термостатированный холодильник. Оно позволяло компенсировать как различия в характеристиках ЛФД, так и различия в передаточных характеристиках электрических схем. Устройство являлось функционально законченным и имело входные и выходные интерфейсы с ТТЛ-уровнями.

Лавинные фотодиоды, от экземпляра к экземпляру, имеют различные напряжения пробоя и величины темновых токов. Оптимизация параметров ЛФД для конкретной задачи невозможна без достаточно полного набора характеристик фотодиода в режиме счета фотонов. Разработке измерительного стенда, позволившего получить такие характеристики, и методологии измерений посвящена **четвертая глава**.

В п.4.1 рассматривается стенд, схема которого представлена на рисунке 3. Стенд позволяет автоматически получить наборы зависимостей вероятности темновых и послелавинных срабатываний, а также квантовой эффективности от температуры при различных напряжениях смещения.

Рисунок 4 поясняет методику измерения вероятности послелавинного срабатывания. Оптический импульс подавался синхронно с первым стробирующим импульсом. Цифры над импульсами показывают положение переключателя на рисунке 3. Таким образом, первый счетчик регистрирует срабатывания приемника, вызванные оптическими импульсами, а второй – послелавинные срабатывания. Темновые отсчеты регистрировались первым счетчиком при выключенном источнике излучения. Интервал времени между импульсами 1 и 2 соответствует времени релаксации ЛФД. В большинстве

экспериментов оно было равно 1 мкс, а период следования оптических импульсов – 10 мкс.

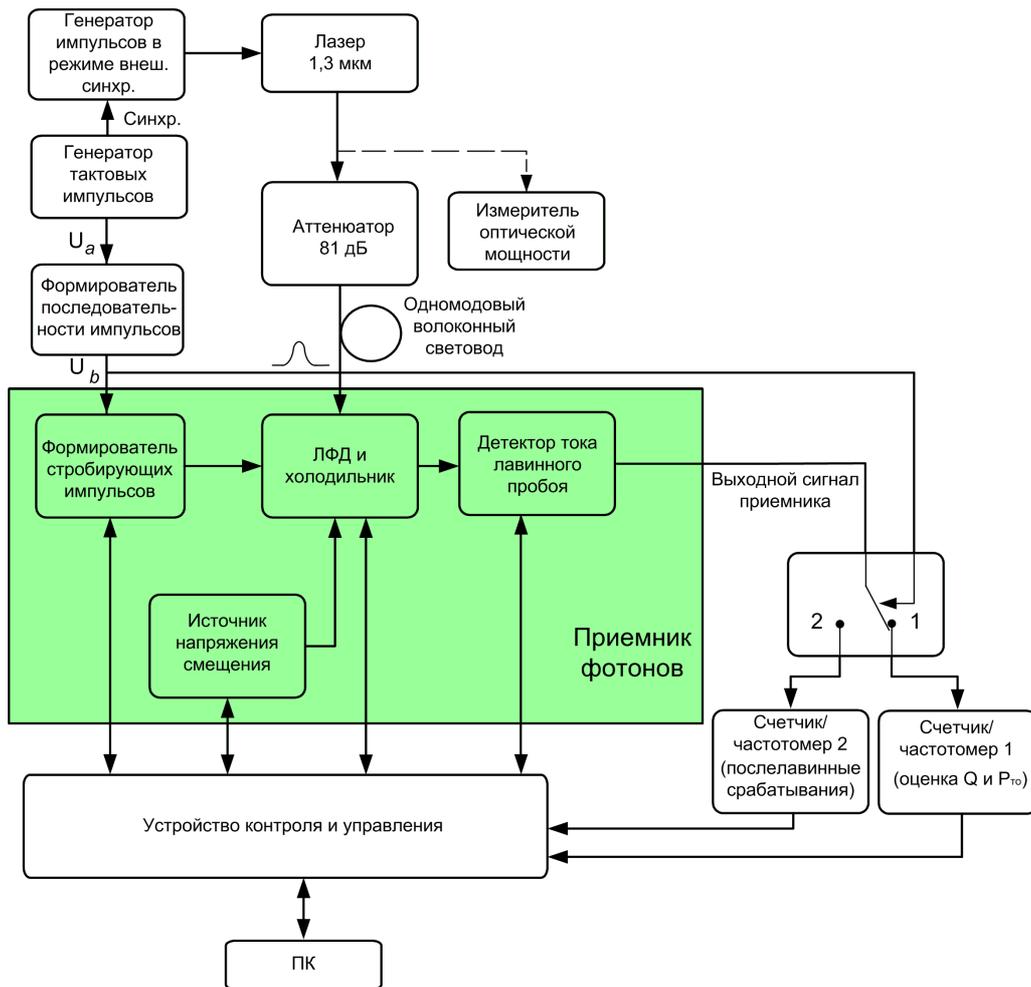


Рис.3 Схема стенда для проведения измерений

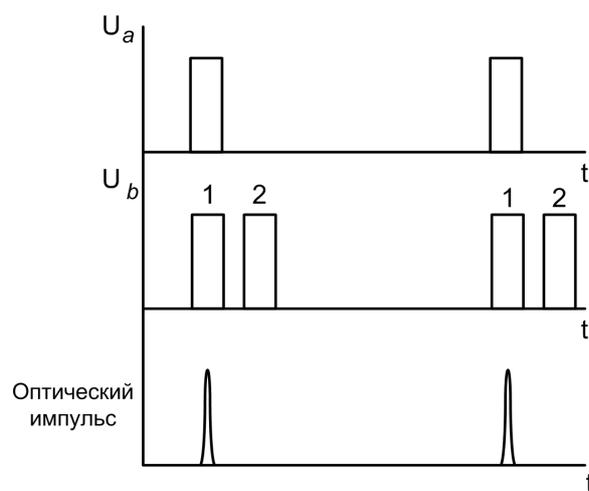


Рис. 4 Диаграмма работы стенда

В п.4.2 исследуется временное разрешение приемника. По результатам экспериментов определена возможная причина уменьшения «эффективной» длительности стробирующего импульса. Она заключается в сравнительно медленном увеличении напряженности поля в слое умножения при быстром увеличении напряжения смещения (во время действия стробирующего импульса). Таким образом, квантовая эффективность также медленно возрастает, прежде чем достигнуть установившегося значения.

В п.4.3 представлены зависимости, являющиеся результатом обработки данных, полученных на стенде, и характеризующие конкретный экземпляр ЛФД. Один из наборов таких зависимостей показан на рисунке 5.

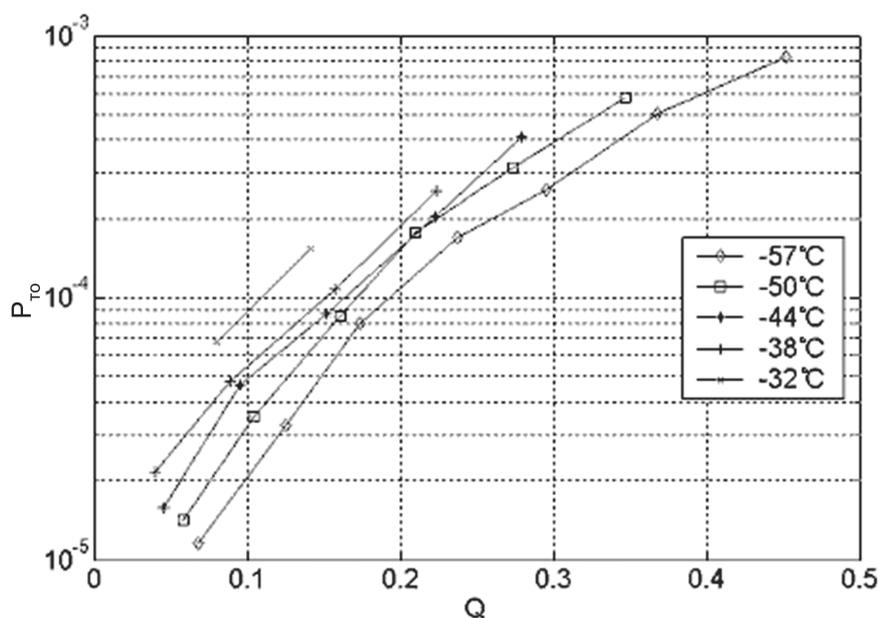


Рис.5 Зависимости вероятности темного отсчета $P_{то}$ от квантовой эффективности Q при различных температурах. Частота импульсов 100 кГц, средняя интенсивность оптического потока 0,03 фотона/импульс

На основании этих и ряда других зависимостей можно выбрать напряжение смещения, параметры стробирующих импульсов и температуру ЛФД, обеспечивающие требуемое соотношение между квантовой эффективностью и вероятностью ложных срабатываний. Процесс измерений на стенде универсален и может применяться для получения характеристик ЛФД, имеющих большой разброс напряжений пробоя, величины темного тока и чувствительности.

Пункт 4.4 посвящен схеме приемника с селектированием лавинных пробоев по времени их включения.

В ходе проведения экспериментов были выяснены особенности работы ЛФД, позволяющие добиться улучшения параметров приемника фотонов в целом. В частности, было отмечено, что моменты включения лавинных пробоев, возникающих из-за эффекта

послелавинного срабатывания, располагаются, преимущественно, в начале стробирующего импульса. Для выяснения причины появления такой закономерности были использованы результаты проведенных ранее (п. 4.2) экспериментов, выявившие наличие кратковременного возрастания напряженности электрического поля в слое поглощения ЛФД, следствием которого является увеличение вероятности туннелирования и, соответственно, послелавинных срабатываний.

Было проведено исследование зависимости квантовой эффективности от временного смещения оптического импульса относительно стробирующего. Показано, что смещение оптического импульса к спаду стробирующего не приводит к уменьшению квантовой эффективности. За счет этого оказалась возможной селекция лавинных пробоев по времени их включения, что, в свою очередь, позволило отличать ложные срабатывания от истинных.

Схемотехническая реализация указанной методики заключалась в преобразовании длительности лавинных пробоев в амплитуду с последующей селекцией при помощи компараторов с различными порогами срабатывания (рисунок 6).

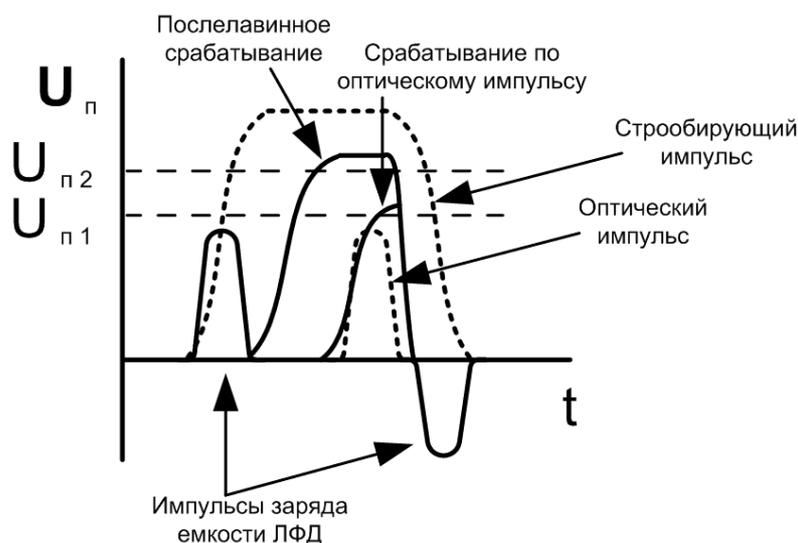


Рис. 6 Пороги срабатывания компараторов и положение оптического импульса относительно стробирующего

Оптический импульс был смещен по времени к спаду стробирующего импульса. В результате удалось снизить вероятность ложного срабатывания в 10 раз при незначительном (на 10%) уменьшении квантовой эффективности. Уменьшение вероятности ложного срабатывания за счет уменьшения длительности стробирующего импульса менее эффективно, так как переходные процессы, описанные в п.4.2, приводят к резкому уменьшению квантовой эффективности.

Созданная методика применима для любых частот повторения стробирующих импульсов и тем эффективнее, чем выше частота. Приведенные выше результаты были получены на частоте 1 МГц.

В пятой главе рассматриваются некоторые аспекты применения приемников фотонов.

В п.5.1 рассматривается вопрос измерения статистики фотонов и определяются границы применимости приемника для оценки времен корреляции потока фотонов.

Стробируемый режим работы делает возможной оценку времен корреляции потока фотонов, сравнимых с длительностью стробирующего импульса, то есть, от 2 до 10 нс. За счет этого рабочий диапазон спектроскопии корреляций интенсивности с применением ЛФД существенно расширяется. Разработанная методика проведения таких оценок заключается в исследовании характера зависимости числа отсчетов приемника от длительности стробирующего импульса.

Требование малой интенсивности входного потока (0,1 фотона/импульс и менее) и невысокая квантовая эффективность накладывают ограничение на диапазон измеряемых времен корреляции при анализе взаимной корреляции между моментами срабатывания приемника (обычная реализации спектроскопии корреляций интенсивности, [10]). Минимальное время корреляции, оцениваемое таким способом, составляет около 100 периодов следования стробирующих импульсов. На частоте 1 МГц оно равно 100 мкс, что позволяет оценить ширину линии 10 кГц и менее.

В п.5.2 рассматриваются особенности применения приемников фотонов в составе систем квантовой криптографии. Параметром, характеризующим работоспособность системы, является вероятность ошибки передачи квантового бита (QBER). В работе показано, что при QBER=10% и частоте следования стробирующих импульсов 1 МГц для получения максимальной квантовой эффективности достаточно охладить ЛФД до температуры около -40°C. Дальнейшее охлаждение не приводит к увеличению квантовой эффективности.

Одна из особенностей работы приемников фотонов – обратное излучение ЛФД - требует пристального внимания как паразитный фактор в системах квантовой криптографии и массивах фотоприемников. Изучению этих особенностей посвящен **п.5.3**. В нем описывается эксперимент по измерению интенсивности излучения ЛФД.

В эксперименте измерялась интенсивность излучения ЛФД во время действия на него стробирующего импульса такой амплитуды, что вероятность возникновения лавинного пробоя была близка к 1. Выходное излучение пропусклось через спектральный фильтр. В качестве регистрирующего устройства был применен

построенный на базе аналогичного ЛФД приемник фотонов, число срабатываний (в единицу времени) которого было пропорционально излучаемой мощности.

Как видно из рисунка 7, спектр излучения имеет максимум в диапазоне 1,4-1,5 мкм, излучаемая мощность при этом достигает величины 1 пВт и более. Указанные длины волн соответствуют ширине запрещенной зоны слоя поглощения (соединение InGaAs). Отсюда следует вывод, что область пробоя в данном случае достигает слоя поглощения. Излучение в слое умножения (InP), имеющее максимум в районе 900 нм, поглощается подложкой (InP) и его интенсивность на выходе ЛФД крайне мала.

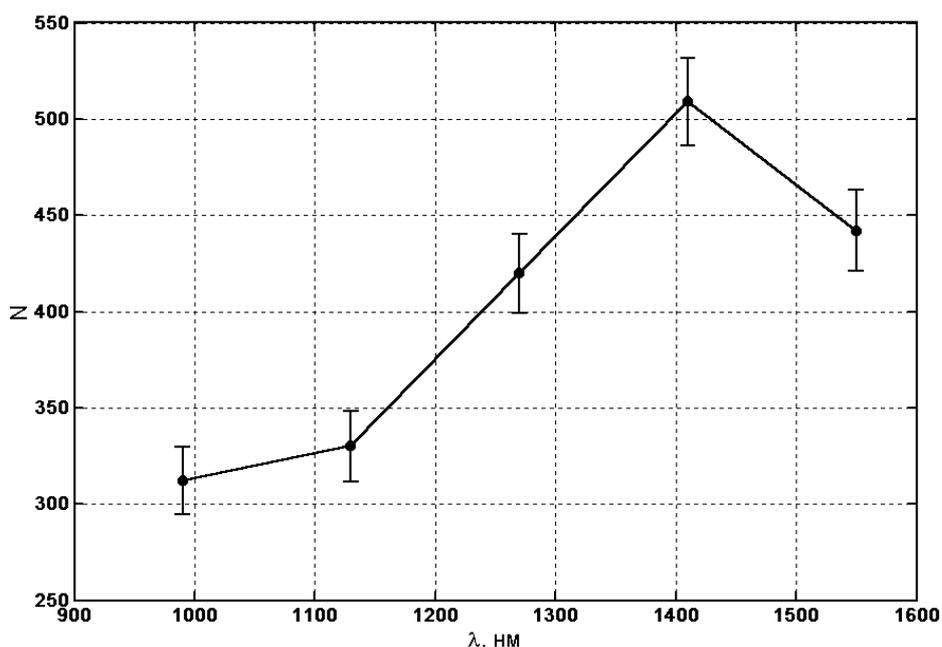


Рис. 7 Зависимость числа отсчетов от длины волны

В заключении сформулированы основные результаты работы:

- Разработан и практически реализован приемник фотонов на базе ЛФД со структурой InP/InGaAs. Произведена оценка основных параметров приемника. Выработаны методики и проведены измерения квантовой эффективности, вероятности темнового отсчета и послелавинного срабатывания при фиксированных температурах, напряжении смещения, амплитуде и длительности стробирующих импульсов, а также частоте их повторения.
- На основе проведенных измерений сделано заключение о необходимости разработки автоматизированного средства измерений. Создан стенд, удовлетворяющий поставленным требованиям. Проведены измерения в автоматическом режиме наборов основных характеристик - зависимостей квантовой эффективности, вероятности послелавинного срабатывания и темнового

отсчета от температуры при различных напряжениях смещения от 35 до 70 В. На основе полученных данных построены зависимости, при помощи которых можно выбирать рабочую точку для достижения заданных параметров приемника.

- Разработана методика улучшения параметров приемника, а именно, уменьшения вероятности послелавинного срабатывания и темнового отсчета. Продемонстрировано уменьшение указанных вероятностей в 25 и в 4 раза соответственно. Методика эффективно работает при высоких частотах повторения стробирующих импульсов.
- Показано, что приемник фотонов в рассматриваемом режиме может использоваться для оценки времени корреляции однофотонного потока и определены диапазоны времен корреляции – порядка длительности стробирующего импульса – от 0,5 до 10 нс и много больше периода следования импульсов - от 100 мкс (для частоты повторения импульсов 1 МГц).
- Измерена спектральная характеристика оптической мощности, излучаемой ЛФД во время лавинного пробоя. Характеристика имеет максимум в диапазоне 1,4-1,5 мкм. Методика измерений позволяет определить пороговое значение напряжения смещения, при котором интенсивность излучения резко уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. S. Bethune, W. P. Risk. An autocompensating fiber-optic quantum cryptography system based on polarization splitting of light // *IEEE J. Quant. Elect.*, 1998, v. 36, p. 340,
2. Д.Боумейстер, А.Экерт, А.Цайлингер. Физика квантовой информации. Москва, "Постмаркет", 2002. - 376 с.,
3. С. Я. Килин, Квантовая информация // *УФН*, 1999, т. 169, № 5, стр. 507,
4. L. E. Tarof, J. Yu et al., Design and whole wafer performance of separate absorption, grading, charge and multiplication InP/InGaAs avalanche photodiodes // *Proc. of SPIE*, 1994, v. 2149, p.290,
5. K.-S. Hyun, C.-Y. Park, Breakdown characteristics in InP/InGaAs avalanche photodiode with p-i-n multiplication layer structure // *J. Appl. Phys.*, 1997, . v. 81, № 2, p.974,
6. S. Cova, M. Ghioni, A. Lacaita, C. Samori and F. Zappa. Avalanche Photodiodes and Quenching Circuits for Single-Photon Detection // *Appl. Opt.*, 1996, v 35, n 12, pp 1956-1976,
7. D. S. Bethune, R. G. Devoe et al., United States Patent, No.: US 6,218,657 B1, 2001, Apr.17,
8. A. Tomita, K. Nakamura, A balanced gated-mode photon detector for qubit discrimination in 1550 nm // <http://xxx.arxiv.org/quant-ph/0206150> v1, 21 Jun 2002,

9. A. Yoshizawa, R. Kaji, H. Tsuchida. 10.5 km ber-optic quantum key distribution at 1550 nm with a key rate of 45 kHz // Jap. J. of Appl. Phys., 2004, v. 43, 6A, p. L735,
10. Г. Камминс, Э. Пайк. Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов. Москва, "Мир", 1978. - 584 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Анисимов А.А. Детектор единичных фотонов на лавинном фотодиоде // Тезисы докладов VI Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков, Старый Петергоф, 2002, с. 6-7,
2. Анисимов А.А. Исследование характеристик лавинных фотодиодов в режиме детектирования фотонов // Материалы VIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы "Фундаментальные исследования в технических университетах", Санкт-Петербург, 2004, с. 62,
3. Anisimov A.A., Markov S.I., Medvedev A.V. Using InP/InGaAs avalanche photodiodes for 1.3 μm photon detection // Proc. of SPIE, 2004, vol. 5447, pp 199-206,
4. Анисимов А.А., Макаров В. Исследование спектра излучения лавинного фотодиода // Материалы IX Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы "Фундаментальные исследования в технических университетах", Санкт-Петербург, 2005, с. 114-115,
5. Анисимов А.А. Однофотонный приемник для ИК-диапазона // Труды научно-технической конференции "Новая политика инновационных и наукоемких технологий", Санкт-Петербург, 2005, с. 275-277,
6. Анисимов А.А. Улучшение характеристик стробируемых детекторов фотонов // Тезисы докладов конференции "Лазеры. Измерения. Информация", Санкт-Петербург, 2005, с. 61-62.